



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS**  
**(Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V, Zn)**  
**COMO INDICADORES DEL CAMBIO GLOBAL EN REGISTROS**  
**SEDIMENTARIOS COSTEROS DEL GOLFO DE MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
**MAESTRA EN CIENCIAS**  
(QUÍMICA ACUÁTICA)

PRESENTA:

**BIOL. BRENDA BERENICE MARTÍNEZ VILLA**

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. JOAN ALBERT SÁNCHEZ CABEZA**

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNIDAD ACADÉMICA DE MAZATLÁN, UNAM

COMITÉ TUTOR:

**DR. ALFONSO VÁZQUEZ BOTELLO**

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

**DR. YOHAN ALEXANDER CORREA METRIO**

INSTITUTO DE GEOLOGÍA, UNAM

**DR. JOSÉ GILBERTO CARDOSO MOHEDANO**

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, ESTACIÓN EL CARMEN, UNAM

**DR. JORGE FELICIANO ONTIVEROS CUADRAS**

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., AGOSTO 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# **CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V, Zn) COMO INDICADORES DEL CAMBIO GLOBAL EN REGISTROS SEDIMENTARIOS COSTEROS DEL GOLFO DE MÉXICO**

## **TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

(Química Acuática)

PRESENTA:

**BRENDA BERENICE MARTÍNEZ VILLA**

Director de Tesis:

**Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza**

Comité Tutor:

**Dr. Alfonso Vázquez Botello**

**Dr. Yohan Alexander Correa Metrio**

**Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano**

**Dr. Jorge Feliciano Ontiveros Cuadras**

**MÉXICO, CD. MX.**

**AGOSTO 2020**

## **AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS**

Estoy muy agradecida con la UNAM, máxima casa de estudios que me ha permitido seguir superándome profesionalmente para enfrentar las adversidades de nuestro país y el mundo. De igual forma expreso mi gratitud al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por brindarme las facilidades para mi preparación académica que sirvieron para concluir con éxito este proyecto de investigación.

Agradezco la beca otorgada para realizar los estudios de maestría por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología durante el período 2018–2/ 2020–1.

Mi especial agradecimiento al Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza por permitirme realizar mi trabajo de investigación bajo su tutela. Su guía fue muy significativa ya que aportó en mi confianza y motivación para desarrollar habilidades que me permitieron resolver los desafíos que se presentaron en la investigación. Estaré siempre agradecida por toda la paciencia, el conocimiento que me compartió y el ánimo que me brindó.

También quiero agradecer al comité total, los cuales fueron de vital importancia en el proceso del desarrollo de la tesis. Al Dr. Alexander Correa Metrio que me ayudó en parte de la metodología estadística de esta investigación, sin sus comentarios este trabajo no hubiera tenido tan atinado desarrollo. Al Dr. Alfonso Vázquez Botello por sus aportaciones y comentarios siempre constructivos con base en su amplia experiencia. Al Dr. Gilberto Cardoso Mohedano y Dr. Jorge Ontiveros Cuadras por todas sus observaciones, sugerencias y apoyo durante todo este tiempo. Todos ellos fueron imprescindibles para que este trabajo sea de gran calidad.

No omito manifestar mi agradecimiento a la Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández por aceptarme en el Laboratorio de Geoquímica isotópica y geocronología en la Unidad Académica de Mazatlán del ICML. Durante mi corta estancia y bajo su asesoría realice hallazgos importantes que sirvieron para el análisis y redacción de este documento.

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

A mi familia: Antonio, María Elena, Edwin, Carmen y Danna. Principalmente a ellos por seguir apoyándome en todo momento. A mis amistades de siempre: Idalia, Isis, Bety, Viviana y Mariana. A las nuevas amistades que conocí durante el posgrado. Al Dr. Frank Raúl Gío Argáez y la Dra. Catalina Gómez Espinosa por apoyarme siempre. Todos los anteriores me han motivado siempre para seguir en mi desarrollo personal y profesional.

A mis compañeros del laboratorio de Cambio Global y Climático del ICML: Carlos, Ricardo, Lalito y Ernesto, quienes fueron parte importante durante el desarrollo de la maestría, porque con ellos aprendí a trabajar en equipos interdisciplinarios. Su conocimiento, asesoría académica y amistad fueron pieza clave para que este trabajo se haya concluido.

A la vida por siempre sorprenderme y darme la oportunidad de seguir adelante, aún con todas las adversidades que se presentan en este planeta, por el cual espero tener algún impacto positivo.

# ÍNDICE

## RESUMEN

## ABSTRACT

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
2.1. EVALUACIÓN DE SEDIMENTOS CONTAMINADOS CON EPT'S	3
2.2. ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS	4
2.3. CONDUCTORES DEL CAMBIO GLOBAL	4
2.4. TENDENCIAS GLOBALES DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS AMBIENTES COSTEROS – GESAMP	4
2.5. CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS (CAK)	6
<b>3. HIPOTESIS</b>	<b>8</b>
<b>4. OBJETIVOS</b>	<b>8</b>
4.1. GENERAL	8
4.2. PARTICULARES	8
<b>5. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>9</b>
5.1. LME05 GOLFO DE MÉXICO	9
5.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL GOLFO DE MÉXICO	9
<b>6. METODOLOGÍA</b>	<b>11</b>
6.1. ESTABLECIMIENTO DE LAS SUB-ZONAS DE ESTUDIO (N Y S)	11
6.2. BASE DE DATOS	11
6.3. ANÁLISIS DE TENDENCIAS	13
6.4. FUENTES DE CONTAMINACIÓN	14
6.5. TOXICIDAD DE LOS EPT'S	14
<b>7. RESULTADOS</b>	<b>15</b>
7.1. CONTENIDO DE LA BASE DE DATOS	15
7.2. SERIES DE TIEMPO	15
7.3. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN GLOBAL	19
7.4. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN EN LA REGIÓN NORTE	21
7.5. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN EN LA REGIÓN SUR	22
7.6. CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE LOS CONTAMINANTES	23
7.7. CONDUCTORES DEL CAMBIO GLOBAL	25

<b>8. DISCUSIÓN</b>	<b>29</b>
8.1. CONTAMINACIÓN COMO PRODUCTO DE LOS CONDUCTORES DEL CAMBIO GLOBAL	29
8.1.1. REGIÓN NORTE (ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA)	33
8.1.1.1. HISTORIA SOCIAL Y ECONÓMICA DE LA REGIÓN	33
8.1.1.2. ESTUDIO DE CASO: TAMPA BAY	34
8.1.1.3. CONCENTRACIONES MÁXIMAS Y TOXICIDAD	37
8.1.1.4. NORMAS AMBIENTALES	39
8.1.1.5. PROGRAMAS DE MONITOREO AMBIENTAL	40
8.1.1.6. TENDENCIAS DE ESTADOS UNIDO DE AMÉRICA	40
8.1.2. REGIÓN SUR (MÉXICO)	42
8.1.2.1. HISTORIA SOCIAL Y ECONÓMICA DE LA REGIÓN	42
8.1.2.2. CONCENTRACIONES MÁXIMAS Y TOXICIDAD	44
8.1.2.3. NORMAS AMBIENTALES	51
8.1.2.4. TENDENCIAS EN MÉXICO	53
8.2. COMPARACIÓN DE LAS TENDENCIAS REGIONALES Y GLOBAL	56
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
PERSPECTIVAS	59
<b>10. LITERATURA CITADA</b>	<b>61</b>
<b>11. ANEXOS</b>	<b>70</b>
11.1. SERIES TEMPORALES DE NÚCLEOS QUE SOBREPASAN EL TEL Y PEL	70
11.2. TENDENCIAS SUAVIZADAS DE LOS EPT'S A NIVEL GLOBAL, REGIÓN NORTE Y REGIÓN SUR	101
11.3. TABLA RESUMEN DEL CONTENIDO DE LA BASE DE DATOS	113
11.4. SCRIPTS DE ANÁLISIS	116

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOS 66 GRANDES ECOSISTEMAS MARINOS (LME, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS). FUENTE: NOAA, 2016.	6
FIGURA 2. CURVA DE KUZNETS Y CURVA AMBIENTAL DE KUZNETS: RELACIÓN ENTRE DESIGUALDAD EN LA DISTRIBUCIÓN DEL INGRESO Y EL DETERIORO AMBIENTAL CONTRA EL INGRESO PER CÁPITA.	6
FIGURA 3. ETAPAS DEL DESARROLLO ECONÓMICO-INDUSTRIAL Y LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL.	7
FIGURA 4. GRANDES ECOSISTEMAS MARINOS DE MÉXICO (LME, LARGE MARINE ECOSYSTEMS). LME03 CORRIENTE DE CALIFORNIA, LME04 GOLFO DE CALIFORNIA, LME11 COSTA DEL PACÍFICO DE AMÉRICA CENTRAL, LME05 GOLFO DE MÉXICO Y LME12 MAR CARIBE.	9
FIGURA 5. MAPA ESQUEMÁTICO DE LAS CORRIENTES MARINAS DEL GOLFO DE MÉXICO. LA CORRIENTE DE YUCATÁN LLEGA DEL CARIBE (LÍNEA VERDE) E INGRESA AL GOLFO DE MÉXICO PARA TRANSFORMARSE EN LA CORRIENTE DE LAZO, QUE PRESENTA 2 VARIACIONES, LA FASE “RETRAÍDA” (LÍNEA ROJA) Y “EXTENDIDA” (LÍNEA AZUL), DE LA CUAL SE DESPRENDE EL GRAN GIRO ANTICICLÓNICO (CÍRCULO NARANJA). TOMADO DE OTIS ET AL. (2019).	11
FIGURA 6. PÁGINA PRINCIPAL DE LA BASE DE DATOS DEL WG39 DE GESAMP, CON DATOS DE CONTAMINACIÓN DE LAS 66 LME’S. LA BASE DE DATOS ESTÁ ALBERGADA EN EL PORTAL DE UNINMAR, ICML-UNAM.	12
FIGURA 7. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE CONTAMINACIÓN MARINA EN EL REGISTRO SEDIMENTARIO COSTERO.	14
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE LOS NÚCLEOS SEDIMENTARIOS CON DATOS DE CONTAMINACIÓN POR EPT’S Y FECHADO EN LME05.	15
FIGURA 9. SERIES DE TIEMPO DE LOS EPT’S PARA EL GOLFO DE MÉXICO.	16
FIGURA 10. GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE LA SERIE DE TIEMPO DEL CR EN UN NÚCLEO DE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO COATZACOALCOS (RUIZ-FERNÁNDEZ ET AL., 2012).	16
FIGURA 11. MODELO DE REGRESIÓN LINEAL PARA LA SERIE DE TIEMPO DEL CR EN UN NÚCLEO DE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO COATZACOALCOS (RUIZ-FERNÁNDEZ ET AL., 2012).	17
FIGURA 12. MODELO DE REGRESIÓN LINEAL NO SIGNIFICATIVA PARA SERIE DE TIEMPO DE Cd DE UN NÚCLEO EN LUISIANA (DELAUNE ET AL., 2006).	17
FIGURA 13. SERIE DE TIEMPO DEL CR EN LME05. LA LÍNEA ROJA MUESTRA LA CURVA SUAVIZADA DE LA CONTAMINACIÓN. EL ÁREA SOMBREADA REPRESENTA LOS PERCENTILES 5 Y 95 % DEL MODELO DE SUAVIZADO.	19
FIGURA 14. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS EPT’S EN TODO EL GOLFO DE MÉXICO.	20
FIGURA 15. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS EPT’S EN LA REGIÓN LME05 NORTE.	21



FIGURA 16. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS EPT'S EN LA REGIÓN LME05 SUR.	22
FIGURA 17. UBICACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE LOS EPT'S EN LA LME05. ESCALA DE CONCENTRACIÓN (PPM) PARA AG Y HG ENTRE 1 Y 0; CD, CR, CU, NI, PB, V Y ZN ENTRE 1 Y 100.	25
FIGURA 18. CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO DE MÉXICO Y ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA.	26
FIGURA 19. POBLACIÓN URBANA Y RURAL DE MÉXICO (VERDE) Y ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICO (AZUL). FUENTE: INEGI, 2015 Y UNITED STATES CENSUS BUREAU, 2016.	27
FIGURA 20. PIB DE EUA, MILLÓN DE MILLONES. PIB NETO Y POR ACTIVIDAD ECONÓMICA (SECTOR AGRÍCOLA, INDUSTRIA Y MINERÍA). FUENTE: BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS, 2019 Y BANCO MUNDIAL ( <a href="https://datos.bancomundial.org/">HTTPS://DATOS.BANCOMUNDIAL.ORG/</a> ).	28
FIGURA 21. PIB DE MÉXICO: NETO Y POR ACTIVIDAD ECONÓMICA (SECTOR AGRÍCOLA, INDUSTRIA Y MINERÍA). FUENTE: INEGI, 2019 Y BANCO MUNDIAL ( <a href="https://datos.bancomundial.org/">HTTPS://DATOS.BANCOMUNDIAL.ORG/</a> ).	28
FIGURA 22. ESQUEMA DE LOS CONDUCTORES DEL CAMBIO GLOBAL Y SU RELACIÓN CON EL AUMENTO DE CONTAMINACIÓN.	29
FIGURA 23. LOS CONDUCTORES DEL CAMBIO GLOBAL, CRECIMIENTO DEMOGRÁFICO Y DESARROLLO ECONÓMICO MEDIDO A TRAVÉS DEL PIB.	31
FIGURA 24. ESQUEMA DE LAS TENDENCIAS DEL CAMBIO GLOBAL COMO PRODUCTO DE LAS CONDUCTAS DE LA SOCIEDAD.	32
FIGURA 25. UBICACIÓN DE LOS NÚCLEOS SEDIMENTARIOS QUE PRESENTARON LOS VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN DE LOS EPT'S, ASÍ COMO LOS RÍOS QUE ATRAVIESAN POR LAS ÁREAS URBANAS FUNCIONALES (CATALOGADOS POR LA OCDE) DE MÉXICO Y ESTADOS UNIDOS QUE DESEMOCAN EN EL GDM.	33
FIGURA 26. POBLACIÓN DE EUA Y ACTIVIDADES ECONÓMICAS MÁS SOBRESALIENTES (AGRICULTURA, INDUSTRIA Y MINERÍA) REPRESENTADAS EN PORCENTAJE DEL TOTAL DEL PIB. LA INDUSTRIA TIENDE A DISMINUIR DESDE LOS 80'S, LA AGRICULTURA Y MINERÍA SE MANTIENEN ESTÁTICAS. FUENTE: BANCO MUNDIAL ( <a href="https://datos.bancomundial.org/">HTTPS://DATOS.BANCOMUNDIAL.ORG/</a> ).	34
FIGURA 27. A) ZONIFICACIÓN DEL LITORAL DE LA BAHÍA DE TAMPA CON ZONAS DE MUESTRE DE DIVERSOS CONTAMINANTES (ZARBOCK ET AL., 1996); B) UBICACIÓN DEL REGISTRO SEDIMENTARIO DE LA BASE DE DATOS EN TAMPA MEDIO, RODEADA POR UNA ZONA URBANAS CON UNA POBLACIÓN MAYOR A 1.5 MILLONES DE PERSONAS (ZONIFICACIÓN EN AZUL GENERADA POR LA OCDE).	36
FIGURA 28. A) CONCENTRACIONES DE LOS EPT'S E ÍNDICES TEL Y PEL. LAS UNIDADES ESTÁN EN ESCALA LOGARÍTMICA CON VALORES DE CONCENTRACIÓN DE 0.01 A 100. LAS LÍNEAS PUNTEADAS DE COLORES REPRESENTAN LOS VALORES DE REFERENICA PARA TEL Y PEL DE CADA EPT. B) FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO DE LOS EPT'S.	37
FIGURA 29. MÁXIMAS CONCENTRACIONES EN LA ZONA LME05 NORTE DE LOS EPT'S CD, CU, PB Y ZN QUE SOBREPASAN EL TEL EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.	39

- FIGURA 30. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN EN LA REGIÓN NORTE Y SU RELACIÓN CON LAS NORMAS AMBIENTALES DE EUA. 41
- FIGURA 31. POBLACIÓN Y ACTIVIDAD ECONÓMICA (AGRICULTURA, INDUSTRIA Y MINERÍA). MIENTRAS LA AGRICULTURA DISMINUYE DENTRO DEL PORCENTAJE TOTAL DEL PIB, LA INDUSTRIA TIENDE A UN AUMENTO A PARTIR DE LOS 80'S. LA MINERÍA SIGUE CONSTANTE. FUENTE: BANCO MUNDIAL ([HTTPS://DATOS.BANCOMUNDIAL.ORG/](https://datos.bancomundial.org/)) 44
- FIGURA 32. CONCENTRACIONES DE Cd, Cr, Cu, Hg Y Zn QUE SOBREPASAN EL TEL, A PROFUNDIDADES ENTRE 1 Y 40 CM, A LO LARGO DE LA ZONA COSTERA DEL GOLFO DE MÉXICO, REGIÓN SUR. 47
- FIGURA 33. CONCENTRACIONES DE Cd, Cr, Y Ni QUE SOBREPASAN EL PEL A PROFUNDIDADES DE ENTRE 1 Y 40 CM, A LO LARGO DE LA ZONA COSTERA DEL GOLFO DE MÉXICO. 49
- FIGURA 34. ZONAS VULNERABLES A CONCENTRACIONES DE LOS EPT'S. EN VERDE, ZONAS POCO VULNERABLES, DONDE SÓLO UN EPT SOBREPASA EL LÍMITE TEL. EN NARANJA, ZONA MODERADAMENTE VULNERABLE, YA QUE EXISTEN MÁS DE 2 EPT'S QUE SOBREPASAN EL LÍMITE TEL. EN ROJO, ZONA ALTAMENTE VULNERABLE, YA QUE MÁS DE DOS CONCENTRACIONES SOBREPASAN EL LÍMITE PEL. 51
- FIGURA 35. TENDENCIAS DE CONTAMINACIÓN EN LA REGIÓN LME05 SUR Y SU RELACIÓN CON LAS NORMAS AMBIENTALES DE MÉXICO 54

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PORCENTAJE DE OBSERVACIONES ÚTILES (SPAN) PARA EL MODELO LOESS OBTENIDAS POR VALIDACIÓN CRUZADA.	18
TABLA 2. TIEMPOS DE MÁXIMA (CELDA SIN SOMBRERAR) O MÍNIMA (CELDA SOMBREADA) CONCENTRACIÓN DE CONTAMINACIÓN.	19
TABLA 3. TENDENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN A NIVEL GLOBAL DE LA LME05.	20
TABLA 4. TENDENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN REGIÓN NORTE DE LA LME05.	21
TABLA 5. TENDENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN REGIÓN SUR DE LA LME05.	22
TABLA 6. VALORES MÁXIMOS DE CONCENTRACIÓN (PPM) DE LOS EPT'S EN LME05, Y LAS SUB-REGIONES NORTE Y SUR. SE MARCAN EN ROJO LOS VALORES QUE SOBREPASAN EL PEL.	23
TABLA 7. VALORES DE CONCENTRACIÓN MÁXIMAS (PPM) QUE SOBREPASAN ÍNDICE TEL DE LA ZONA NORTE. REGISTROS DE LOS ARCHIVOS SEDIMENTARIOS DEL GOLFO DE MÉXICO. EN COLOR AZUL SE ENCUENTRAN LOS VALORES QUE SOBREPASAN EL VALOR TEL.	38
TABLA 8. CONCENTRACIONES MÁXIMAS (PPM) DE LOS EPT'S QUE SOBREPASAN LOS LÍMITES TEL EN LA REGIÓN SUR DEL GOLFO DE MÉXICO.	45
TABLA 9. CONCENTRACIONES MÁXIMAS (PPM) DE LOS EPT'S QUE SOBREPASAN LOS LÍMITES PEL EN LA REGIÓN SUR DEL GOLFO DE MÉXICO.	47
TABLA 10. ZONAS DE LA REGIÓN SUR DEL GOLFO DE MÉXICO QUE SOBREPASAN EL NIVEL TEL Y PEL	50
TABLA 11. TENDENCIAS SIGNIFICATIVAS DE CONTAMINACIÓN EN LA REGIÓN SUR DEL GOLFO DE MÉXICO.	55

## RESUMEN

El planeta Tierra está sometido a un acelerado proceso de transformación denominado cambio global. Muchas de las actividades del ser humano causan la emisión de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's; en este trabajo Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V y Zn) que pueden ser depositados en sedimentos de las zonas costeras. En ausencia de mezcla, los núcleos sedimentarios fechados con  $^{210}\text{Pb}$  proporcionan series temporales de los EPT's, los cuales pueden servir como indicadores de procesos de contaminación y del cambio global. Los registros sedimentarios permiten reconstruir impactos antropogénicos a nivel regional, pues se encuentran bajo influencia directa de los principales conductores del cambio global (crecimiento demográfico y desarrollo económico), responsables de la contaminación en la zona costera.

El Golfo de México (GdM) está rodeado por Estados Unidos de América (región norte) y México (región sur). Los ríos de la cuenca del GdM atraviesan importantes zonas urbanas, agrícolas e industriales, por lo que transportan y depositan en los sedimentos de la zona costera grandes cantidades de EPT's, los cuales pueden exceder las concentraciones naturales. Otras fuentes potenciales de contaminación son la vía atmosférica y actividades que descargan contaminantes en la propia zona marina.

La información de las concentraciones de EPT's en sedimentos del GdM fue recopilada en una base de datos, la cual fue utilizada para el análisis de tendencias a nivel regional y global a través de una regresión local *loess* de donde se obtuvieron los puntos de inflexión relevantes para cada contaminante. Estos puntos fueron usados en la determinación de las tendencias recientes a través de una regresión lineal, con lo que fue posible comparar las tendencias de contaminación en sedimentos marinos y su relación con las series temporales de los conductores del cambio global. Asimismo, se analizaron los valores máximos de concentración para compararlos con los niveles de referencia TEL y PEL y evaluar riesgos potenciales por sedimentos marinos contaminados.

Existe una marcada diferencia entre las regiones ya que las mayores concentraciones de EPT's se encuentran en la región sur, entre 0 y 40 cm de profundidad, superando en 16 casos el nivel probable de efecto (PEL, por sus siglas en inglés), por lo que se pueden manifestar frecuentemente efectos en la biota bentónica. En la zona de Laguna Verde, Veracruz y Nuevo Progreso, Campeche, se sugiere una vigilancia ambiental ya que más de dos EPT's sobrepasan el límite PEL.

Las diferencias socioeconómicas y culturales entre México y EUA permiten una mayor comprensión en las tendencias de los conductores del cambio global y su relación con el impacto ambiental. México, a diferencia de EUA, tiene un desarrollo poblacional y económico tardío, y lo mismo ha ocurrido con la generación de normas ambientales. La legislación ambiental está condicionada por las características propias del país, como la política, y desarrollo institucional y tecnológico, que impiden el progreso hacia una economía y sociedad con las condiciones suficientes para disminuir los niveles de contaminación.

En la región norte las tendencias de Ag, Cd, Cu y Pb, después de un máximo a finales de los 60's y principios de los 70's, mostraron una marcada disminución, claramente relacionada con la promulgación de normas ambientales rigurosas, y la creación de instituciones con el mandato del monitoreo y la evaluación para la protección medio ambiente. En la región sur las tendencias de Cd, Cr y V muestran máximos en épocas diferentes, que indican una respuesta tardía a las normas ambientales mexicanas. El Pb aumenta desde los 50's hasta la actualidad, lo que sugiere que existen actividades en la región, o incluso a nivel mundial, que emiten este elemento incumpliendo normas ambientales nacionales y/o internacionales. De forma global en el GdM, Ag, Cd, Cr, V y Zn muestran una reducción reciente en los registros sedimentarios. En el caso del Pb, la tendencia global es al aumento desde los años 60, aun cuando existe normatividad en ambos países sobre el control de uso gasolinas con plomo y otras actividades que lo generan.

Estos resultados señalan la importancia del cumplimiento de las normas ambientales nacionales e internacionales. Es indispensable la acción coordinada entre la ciencia y la política para generar acuerdos y normas entre los países que comparten ecosistemas marinos para reducir los niveles de contaminación y, de esta manera asegurar la protección del medio marino y por ende de los seres humanos que obtienen recursos de este.

## ABSTRACT

The Earth is undergoing an accelerated transformation process known as global change. Many human activities generate Potentially Toxic Elements (PTE's). In this work, PTE's are Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, V and Zn, which can be deposited within sediments in the coastal zone. In the absence of mixing, the sediment cores dated with  $^{210}\text{Pb}$  provide a time series of the PTE's, which can serve as indicators of pollution and global change. Sedimentary records allow the reconstruction of anthropogenic impacts at a regional scale, because they are under the direct influence of the main drivers of global change (demographic growth and economic development) the responsible for pollution in the coastal zone.

The Gulf of Mexico (GoM) is bordered by the USA (the north region) and Mexico (the south region). The rivers of the GoM basin flow across important urban, agricultural and industrial zones. These rivers can carry and deposit in the sediments of the coastal zone large amounts of PTE's, which can exceed natural concentrations. Other potential sources of pollution are the atmospheric emissions and other activities that directly discharge pollutants in the marine area itself.

The information on the concentrations of PTE's in sediments of the GoM was compiled in a database which was used for the analysis of trends at a regional and global scale through the loess (local regression) from which the relevant inflection points were obtained for each pollutant. These points were used in the determination of recent trends through a linear regression; in this way it was possible to compare the pollution trends in marine sediments and their relationship with the time series of the drivers of global change. To evaluate potential risks due to contaminated marine sediments, the maximum concentration values were analyzed to compare them with the assessment values TEL and PEL.

There is a great difference between the regions, since the highest concentrations of PTE's are found in the southern region, between 0 and 40 cm of depth, exceeding the PEL in 16 cases. Therefore, the effects can be frequently manifested in the benthic biota. An environmental surveillance is suggested in the area of Laguna Verde, Veracruz and Nuevo Progreso, Campeche, because more than two PTE's exceed the PEL limit.

The socioeconomic and cultural differences between Mexico and the United States allow an understanding of the trends of the drivers of global change and their relationship with environmental impact. Mexico, unlike the US, experienced a later population and economic development. In the same way, has happened with the creation of environmental regulations. Environmental legislation is conditioned by the country's own context - features such as politics, institutional and technological development - which inhibit progress towards an economy and society with sufficient conditions to reduce pollution levels.

In the northern region the trends of Ag, Cd, Cu and Pb, after a peak in the late 60's and early 70's, showed a marked decrease, clearly related to the promulgation of rigorous environmental regulations and the creation of institutions with the mandate of monitoring and evaluating

environmental protection. In the southern region the trends of Cd, Cr and V show maximums at different times, which indicate a late response to Mexican environmental regulations. Pb has increased from the 1950s to the present, suggesting that there are activities in the region, or even worldwide, that emit this element in violation of national and/or international environmental standards. Overall, in the GoM, Ag, Cd, Cr, V and Zn show a recent reduction in sedimentary records. In the case of Pb, the global trend increases since the 1960s, even though there are regulations in both countries to reduce the use of leaded gasoline and other activities that generate it.

These results indicate the importance of compliance with national and international environmental standards. Coordinated action between science and politics is essential to generate agreements and standards between countries that share marine ecosystems in order to reduce pollution levels and thus ensure the protection of the marine environment and, therefore, the human beings who obtain resources from the sea.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio global (CG) es el conjunto de cambios ambientales antropogénicos a escala planetaria que han modificado el funcionamiento del sistema Tierra. Esto ha generado la alteración de una amplia gama de fenómenos con efectos a escala mundial como el incremento de la temperatura, alteración de los ciclos biogeoquímicos, los ecosistemas y su biodiversidad, uso y cobertura de suelo, además de aspectos socioeconómicos como la población, economía, uso de recursos, energía, transporte y comunicación, entre otros (Steffen et al., 2006; Vitousek, 1994).

Los ambientes marinos más vulnerables al CG son las zonas costeras, debido a los numerosos impactos que reciben como el vertido de residuos domésticos, agrícolas e industriales procedentes de las grandes urbes y otras zonas de desarrollo económico. Los contaminantes de fuentes terrestres que pueden constituir la mayor amenaza en las zonas costeras y marinas son los compuestos organoclorados, metales y metaloides, productos derivados del petróleo, radionúclidos y materia orgánica. Algunos de estos contaminantes destacan por sus efectos adversos sobre la biota (UNEP, 1994).

La contaminación de la zona costera del Golfo de México (GdM) es generada en el área continental de Estados Unidos de América y México, dado que las aguas continentales atraviesan numerosos centros urbanos, industriales y rurales, transportan contaminantes que son finalmente vertidos en esta región. Además, en una parte importante del GdM se desarrolla la industria petrolera y petroquímica, la cual genera aguas residuales que son vertidas directamente al mar y generan concentraciones anómalas de metales (Schifter et al., 2015; Trefry & Presley, 1976).

Los metales y metaloides están presentes de forma natural en el ambiente, y pueden encontrarse en el medio marino debido a la degradación por intemperismo de las rocas de las cuencas y la actividad volcánica. Las fuentes antropogénicas de metales y metaloides incluyen, por ejemplo, el uso de productos domésticos (e.g. fungicidas, pilas, desinfectantes, transporte), actividades industriales (e.g. extracción de minerales, producción de energía a través de la quema de combustibles fósiles, residuos de los procesos industriales), y algunas actividades agrícolas (e.g. algunos plaguicidas, removilización de suelos contaminados) (Cearreta et al., 2000; Cundy et al., 2003).

Los metales y metaloides son considerados Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's) pues, cuando sobrepasan las concentraciones asimilables por la biota, pueden provocar toxicidad. Por ello han sido catalogados como especialmente peligrosos por diversas agencias ambientales (e.g. la lista de contaminantes prioritarios de la EPA, 2014). Para cuantificar el grado de contaminación de un sedimento se emplean comúnmente índices de contaminación, como por ejemplo los niveles de referencia compilados por la NOAA, entre los que se destacan el nivel umbral de efectos (TEL, *Threshold Effects Level*) y el nivel probable de efectos (PEL, *Probable Effects Level*), que estiman concentraciones que permiten delimitar 3 rangos:

1. Concentración < TEL: no existen o rara vez ocurren efectos sobre la biota.
2. TEL < concentración < PEL: se espera que ocasionalmente existan efectos sobre la biota.



3. Concentración > PEL: se espera frecuentemente se presenten efectos tóxicos sobre la biota (MacDonald et al., 2004; Mann & Chapman, 1999).

Los daños provocados por los EPT's a la biota marina son generalmente de alcance local, debido a la limitada dispersión de algunos contaminantes y/o su dilución en las aguas marinas. Sin embargo, la intensidad de algunas fuentes de contaminación, el comportamiento geoquímico de algunos elementos (por ejemplo, la volatilidad y solubilidad de algunas especies del mercurio) y su transporte con diferentes fluidos geofísicos (atmosfera e hidrosfera, incluyendo las corrientes marinas), permite que algunos contaminantes puedan ser transportados a grandes distancias de su fuente de origen, por lo que en algunos casos la contaminación puede traspasar fronteras nacionales y generar impactos regionales e incluso globales (GESAMP, 2001; Wilhelmsson et al., 2013).

Uno de los aspectos fundamentales de la geoquímica de los metales es su solubilidad, habitualmente cuantificada en los medios acuáticos a través del coeficiente de distribución ( $K_d$ ), que es el cociente entre la concentración del material particulado en suspensión y su concentración total en agua. Es habitual observar en el medio marino valores de  $K_d$  muy altos (e.g. del orden de  $10^7$  para el plomo) (IAEA, 2004), lo cual implica que la mayor parte de estos metales se encuentran asociados con la fase particulada y, por lo tanto, son eficientemente depositados en los sedimentos del fondo.

La asociación preferencial de los metales con los sedimentos del fondo convierte a los sedimentos no perturbados en archivos ambientales, pues tienen la capacidad de registrar los niveles presentes en la columna de agua y, por lo tanto, los niveles de contaminación de los ecosistemas estudiados. En el caso de que un sedimento inalterado pueda ser fechado, la información cobra un gran valor científico, ya que el archivo se convierte en un registro ambiental, es decir una serie temporal de los niveles de contaminación en el ecosistema e indirectamente de las actividades responsables de cada contaminante (Cundy et al., 2003; Sanchez-Cabeza & Druffel, 2009). De este modo, cada contaminante se convierte en un indicador potencial del impacto del cambio global en cada ecosistema.

Los valores preindustriales proveen información sobre la variabilidad natural de los metales en cada ecosistema y su comparación con los niveles actuales permite identificar los que pueden ser considerados contaminantes. En ausencia de programas de monitoreo a largo plazo, los sedimentos son la única posibilidad de reconstruir la evolución de los niveles de contaminación en ecosistemas específicos (Sanchez-Cabeza & Druffel, 2009). El estudio de archivos ambientales en ecosistemas marinos requiere de técnicas de análisis nucleares, como por ejemplo el análisis de  $^{210}\text{Pb}$ , utilizado para fechar sedimentos de los últimos 100 años, intervalo que cubre el mayor crecimiento industrial y demográfico experimentado a nivel mundial (Cundy et al., 2003; Sanchez-Cabeza & Ruiz-Fernández, 2012).

Los datos de sedimentos marinos fechados con  $^{210}\text{Pb}$  son herramientas multiescalares (tiempo y espacio) que permiten establecer las tendencias globales y regionales para la evaluación de la contaminación como producto de los conductores del cambio global (demografía, desarrollo económico, político-social, cultural y religioso, así como la ciencia y tecnología), que son factores que generan cambios en los ecosistemas (Nelson et al., 2005; Steffen et al., 2006).

Esta herramienta metodológica es también de utilidad para evaluar la funcionalidad de las legislaciones ambientales de los países, así como para monitorear los impactos antropogénicos y generar nuevas leyes (o modificar las existentes) que disminuyan la contaminación por los EPT's en las zonas costeras, sobre todo en naciones como México, que debido a su contexto económico, político, social y tecnológico lleva un retraso en medición, gestión y legislación ambiental.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Evaluación de sedimentos contaminados con EPT's**

La contaminación es la presencia de una sustancia en zonas donde naturalmente no debería estar, o bien con una concentración que rebasa los valores normales o naturales, sin que tenga efectos nocivos sobre la biota. Se utiliza el término polución cuando la contaminación genera daños o impactos negativos sobre los ecosistemas de modo que se presentan efectos adversos en los organismos vivos (Chapman, 2007; Wilhelmsson et al., 2013).

La polución del medio marino, según la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (Art.1.4), se entiende por “la introducción por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o de energía en el medio marino, incluidos los estuarios, que produzca o pueda producir efectos nocivos tales como daños a los recursos vivos y a la vida marina, peligros para la salud humana, obstaculización de las actividades marítimas, incluidas la pesca y otros usos legítimos del mar, deterioro de la calidad del agua del mar para su utilización y menoscabo de los lugares de esparcimiento” (Naciones Unidas, 1982).

Los sedimentos actúan como sumideros de muchos contaminantes, debido a sus características físico-químicas, entre las que sobresalen la capacidad de adsorción a la materia en suspensión (Chapman, 1990; Salomons et al., 1987). La acumulación permanente de sedimentos contaminados, como resultado de prácticas del presente o pasado, son también una fuente de contaminación a gran escala debido a su potencial removilización (Cundy et al., 2003; Salomons et al., 1987).

Los impactos de contaminantes asociados a los sedimentos incluyen efectos directos en las comunidades bentónicas y efectos en los niveles tróficos superiores a través de la biomagnificación (Burton, 2002). Por ello, las regulaciones ambientales reconocen a los sedimentos como parte crítica de los ecosistemas acuáticos, los cuales requieren ser evaluados para el dragado u otro tipo de remediaciones ambientales.

La evaluación de los impactos potenciales de los sedimentos contaminados se basa habitualmente en las Guías de Calidad de Sedimentos (SQG, por sus siglas en inglés *Sediment Quality Guidelines*) desarrolladas a partir de datos químicos y biológicos obtenidos en laboratorio y campo, de donde se infieren puntos de referencia de las relaciones entre la concentración de un contaminante en el sedimento y cualquier efecto adverso observado en la biota. Los dos valores de referencia para la evaluación de sedimentos utilizados en este trabajo son el nivel umbral de efectos (TEL, por sus siglas en inglés *Threshold Effects Level*), que es la concentración del elemento en el sedimento por

debajo de la cual se espera que no existan o rara vez ocurran efectos adversos sobre la biota, y el nivel probable de efectos (PEL, *Probable Effects Level*), definida como la concentración a partir de la cual es de esperar con frecuencia la aparición de efectos adversos en la biota (Burton, 2002; Macdonald et al., 1996a; Mann & Chapman, 1999).

## **2.2. Elementos Potencialmente Tóxicos**

El término Elemento Potencialmente Tóxico (EPT) incluye a los elementos de importancia ambiental y/o toxicológica que agrupa a los metales, no metales y metaloides. Los EPT's de mayor importancia ambiental son el As, Be, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Se, Tl, V y Zn (Volke-Sepúlveda et al., 2005). La mayor cantidad de EPT's son metales. En materia de contaminación ambiental a los metales que en estado puro presentan una densidad mayor a 5 g/cm<sup>3</sup> y son tóxicos se les define como metales pesados. Sin embargo, debido a inconsistencias y confusiones en su descripción y uso, este término no está formalmente reconocido por la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) (Duffus, 2002).

Algunos metales pueden reaccionar e inhibir una serie de sistemas enzimáticos como un veneno metabólico. Los iones Hg<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> y Ag<sup>+</sup> forman complejos tóxicos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos tóxicos para cualquier función biológica. Otros elementos como el Hg y Pb pueden formar iones organometálicos liposolubles capaces de penetrar membranas y acumularse en las células. Por otro lado, el Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> y Cr son requeridos para ciertas actividades biológicas en concentraciones bajas, por lo que son considerados elementos traza, pero por encima del límite requerido se vuelven elementos tóxicos (Volke-Sepúlveda et al., 2005).

## **2.3. Conductores del cambio global**

Según la *Millennium Ecosystem Assessment*, un conductor es un factor natural o antropogénico que directa o indirectamente causa un cambio en el ecosistema. Los conductores directos del cambio global influyen en los procesos ecosistémicos y son de origen físico o biológico, como el cambio climático, vertido de agroquímicos, alteración de los suelos, enfermedades y especies invasoras. Los conductores indirectos operan de manera difusa alterando uno o más conductores directos, como por ejemplo los factores demográficos, económicos, sociopolíticos, científicos, tecnológicos, culturales y religiosos (Nelson et al., 2005, 2006).

Los conductores interactúan a diferentes escalas espacio-temporales, pero en los últimos dos siglos se ha visto que los conductores indirectos, entre los que sobresale el crecimiento demográfico, la organización socio-política y la tecnología, son causantes de un cambio dramático en el funcionamiento del sistema Tierra, que se ve reflejado a través de la agricultura, industria, producción de energía y urbanización (Steffen et al., 2006).

## **2.4. Tendencias globales de la contaminación en los ambientes costeros – GESAMP**

El Grupo Mixto de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP, por sus siglas en inglés) es el órgano de las Naciones Unidas encargado de la evaluación

e identificación de los impactos producidos por la actividad humana en el medio marino, así como el asesoramiento para la prevención, reducción y el control de la degradación. GESAMP se encuentra formado por expertos especializados designados por los organismos patrocinadores, como la OMI, FAO, UNESCO-COI, OMM, OMS, OIEA, Naciones Unidas (Nueva York) y PNUMA, que tienen como propósito abordar íntegramente todos los temas relacionados con la entrada de sustancias en el océano procedentes de la atmósfera y del medio terrestre (GESAMP, 2001).

Con la finalidad de cubrir tópicos particulares sobre la protección del medio marino, se han creado grupos de trabajo, entre los cuales se encuentra el “Working Group 39” (WG39), establecido a petición del OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) y co-liderado por OMI (Organismo Marítimo Internacional), cuya labor ha sido establecer las tendencias globales de la contaminación en los ambientes costeros, para proporcionar a los organismos patrocinadores, científicos y la sociedad, una evaluación objetiva y global de las tendencias de la contaminación durante el último siglo en ecosistemas costeros sensibles (GESAMP, 2010).

Para cumplir con los objetivos del WG39 se generó una base de datos a partir de documentos científicos de calidad (revisados por pares) con registros sedimentarios que tuvieran información de concentraciones de contaminantes. Estos datos fueron organizados según los Grandes Ecosistemas Marinos (*Large Marine Ecosystems – LME's*). Los LME's son regiones oceánicas de 200 000 km<sup>2</sup> o más que se caracterizan por su batimetría, hidrografía, productividad y poblaciones tróficamente dependientes particulares. Comprenden la parte más baja de las cuencas fluviales y sus plumas, bahías, estuarios y lagunas, corales y otros arrecifes, plataformas continentales y taludes, así como las zonas de afloramiento donde generalmente existe una mayor productividad primaria con una gran abundancia en las pesquerías (Sherman, 1995). Actualmente se reconocen 66 regiones distribuidas en el planeta (Figura 1).

La información de los registros sedimentarios contenida en la base de datos está resguardada en la Unidad de Informática Marina (UNINMAR) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (<http://uninmar.icmyl.unam.mx/collections/wg39-gesamp>), incluye el tipo de contaminante, metodología y equipos utilizados para medir las concentraciones, las coordenadas geográficas de los sitios donde se obtuvieron los núcleos sedimentarios y el fechado. Esta fue la base para realizar la recopilación y actualizar los artículos que sirvieron para realizar el presente trabajo.

## Large Marine Ecosystems of the World

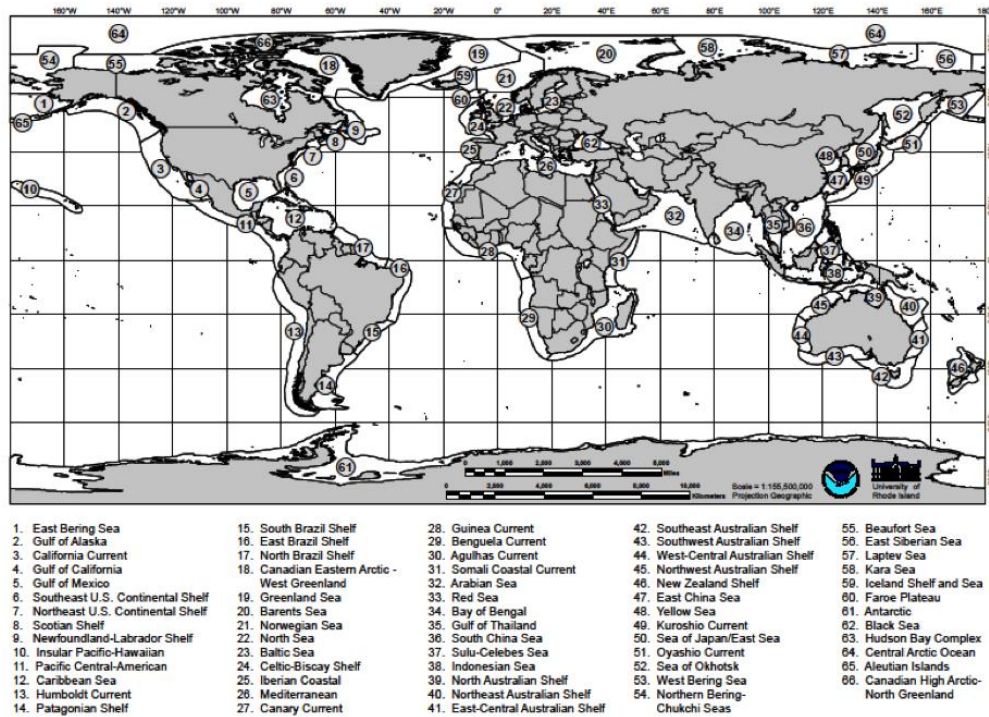


Figura 1. Los 66 Grandes Ecosistemas Marinos (LME, por sus siglas en inglés). Fuente: NOAA, 2016.

### 2.5. Curva Ambiental de Kuznets (CAK)

La curva ambiental de Kuznets (CAK) sugiere la existencia de una relación entre el nivel de ingreso per cápita y el deterioro de calidad ambiental la cual está representada por una curva con forma de U invertida (Grossman & Krueger, 1995; Stern, 1998), como la que planteó el economo Simon Kuznets (1955) donde señala la relación entre la desigualdad en la distribución del ingreso y el ingreso per cápita. Los análisis de socioeconómicos de Kuznets indican que mientras los países desarrollados tienden a tener un menor grado de desigualdad, los países en desarrollo tienden a tener un mayor grado de desigualdad (Figura 2).

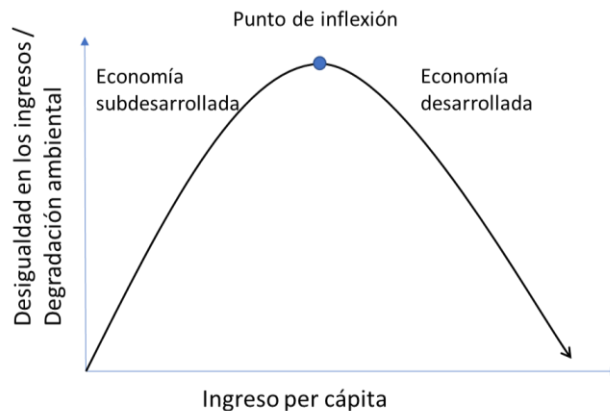


Figura 2. Curva de Kuznets y Curva Ambiental de Kuznets: relación entre desigualdad en la distribución del ingreso y el deterioro ambiental contra el ingreso per cápita.

La hipótesis de la CAK proviene de diversos estudios realizados con datos ambientales entre los que se encuentran la calidad del aire y el desarrollo económico de un país a inicios de la década de los noventa. Esto sirvió de evidencia para demostrar que un mayor nivel de ingreso per cápita corresponde a una disminución en la degradación ambiental mientras que bajos niveles de ingreso están correlacionados con un creciente deterioro en el medio ambiente (Grossman & Krueger, 1995).

A través de la CAK se han propuesto etapas del desarrollo industrial a través del desarrollo económico y degradación ambiental. En una primera fase una economía basada en el sector agrícola genera un fuerte impacto en la calidad del medio ambiente debido a una explotación excesiva en recursos naturales y la utilización de tecnologías ineficientes; en una segunda fase se desarrolla la industria, la cual genera un mayor nivel de riqueza, sin embargo es la causante de un mayor deterioro en la calidad ambiental ya que todavía utiliza tecnologías poco eficientes, además de una demanda de los recursos naturales que excede a su conservación y un aumento en la cantidad de residuos. El proceso de crecimiento económico continúa hasta que la esperanza de vida aumenta, mejora la calidad del agua y el aire, y se genera un hábitat más limpio y mejor evaluado para las decisiones marginales de la población sobre cómo gastar sus ingresos (disponibilidad a pagar), principalmente en la conservación del medio ambiente. Después de un punto de inflexión, la economía llega a una etapa posindustrial que sustenta su crecimiento en tecnologías eficientes y más limpias, principalmente en el sector servicios, lo que incide positivamente en la mejora de la calidad ambiental (Figura 3) (Catalán, 2014; Gómez-López et al., 2011).

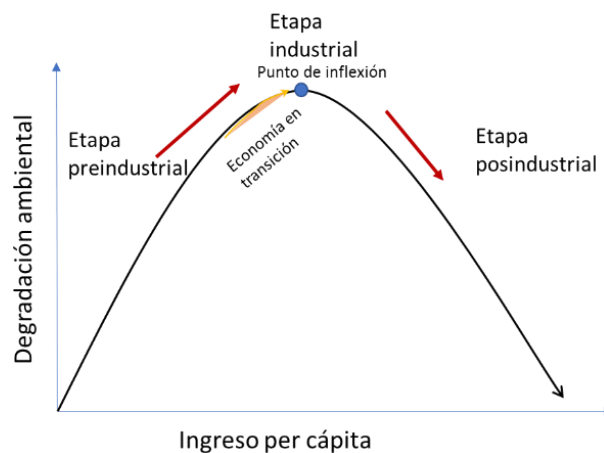


Figura 3. Etapas del Desarrollo económico-industrial y la degradación ambiental.

Los países en desarrollo se ubican en la pendiente positiva de la curva, donde sus acciones y políticas en favor del crecimiento generan un deterioro en el medio ambiente, pero al llegar a un estado mayor de desarrollo, implementan políticas para mejorar la calidad del medio ambiente y proteger los recursos naturales, y eventualmente la degradación comienza a disminuir (Nahman & Antrobus, 2005). Sin embargo existen factores tales como la innovación tecnológica, las instituciones, las regulaciones en materia ambiental o las demandas de la sociedad que están asociadas a mayor información y educación sobre las consecuencias ambientales (Catalán, 2014; Grossman & Krueger, 1995), que influirán de distinta forma en la CAK de cada una de las naciones.

### **3. HIPOTESIS**

- Los núcleos sedimentarios pueden preservar señales de tipo ambiental, y convertirse en registros geoquímicos y de contaminación a lo largo del tiempo. Cada registro tiene información que puede ser relevante para explicar fenómenos a nivel local y temporal. Se espera que a partir de los registros de los archivos sedimentarios se puedan estimar tendencias regionales.
- La contaminación por EPT's es uno de los grandes problemas del deterioro ambiental. México presenta tendencias de la contaminación asociadas al desarrollo económico y social. Si las concentraciones por EPT's muestran un máximo en relación con el desarrollo urbano e industrial en México, entonces pueden establecerse tramos de análisis ajustados a las etapas histórico-sociales del país y a nivel global.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1. GENERAL**

Cuantificar y analizar las tendencias recientes de la contaminación costera por Elementos Potencialmente Tóxicos como indicadores del cambio global a través de registros sedimentarios del último siglo en el GdM.

#### **4.2. PARTICULARES**

- Establecer una metodología para el análisis de una base de datos ambientales.
- Establecer una metodología y evaluar las tendencias de la contaminación por EPT's como indicadores del impacto antrópico a nivel local y regional en el Golfo de México, para su posible aplicación a futuro en otras regiones costeras de México y del mundo.
- Cuantificar y analizar las tendencias temporales recientes de las concentraciones de EPT's en registros sedimentarios del Golfo de México y sugerir posibles fuentes de contaminación.
- Comparar los niveles máximos observados con niveles de referencia internacional sobre toxicidad de metales en sedimentos marinos (tablas SQUIRT) para determinar los posibles impactos sobre la biota bentónica.

## 5. ÁREA DE ESTUDIO

### 5.1. LME05 Golfo de México

El área de estudio comprende la unidad operacional de las regiones marinas denominada LME05 que comprende la cuenca oceánica del Golfo de México. Esta se encuentra rodeada al norte por Estados Unidos de América, al sur por México y al este por Cuba (Figura 4).

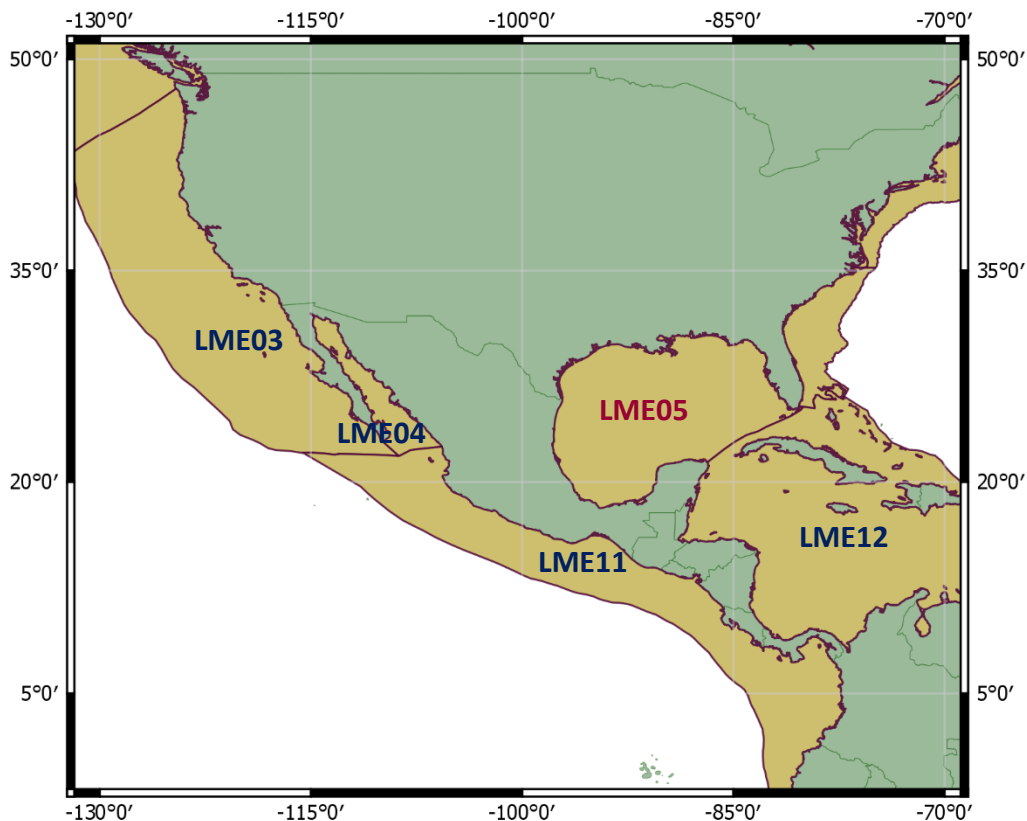


Figura 4. Grandes Ecosistemas Marinos de México (LME, Large Marine Ecosystems). LME03 Corriente de California, LME04 Golfo de California, LME11 Costa del Pacífico de América Central, LME05 Golfo de México y LME12 Mar Caribe.

### 5.2. Características generales del Golfo de México

El Golfo de México es un mar marginal semicerrado que se comunica con el Océano Atlántico por el Estrecho de Florida, y el Mar Caribe por el Canal de Yucatán. Su plataforma continental es una de las más extensas del mundo pues comprende alrededor del 30% del área total. Tiene una topografía muy variable: las partes más anchas se encuentra al oeste de Florida, en Texas-Luisiana y en el Banco de Campeche, y la más angosta en Veracruz y Tabasco (Zavala-Hidalgo et al., 2014).

La configuración geomorfológica a partir de costas de barrera permite una transición de aguas interiores protegidas por diversos componente hidrográficos como lagunas, estuarios, esteros y



bahías, escasamente diferenciados pero incluidos en una definición común de “lagunas costeras” (De La Lanza Espino et al., 2013). Estas lagunas reciben los aportes de nutrientes y sedimentos acarreados por los ríos, por ello presentan las condiciones esenciales para albergar ecosistemas altamente productivos. Los mayores aportes de aguas continentales provienen principalmente de dos desembocaduras i) en el norte los ríos Mississippi-Atchafalaya, que proveen 2/3 partes del flujo de agua del Golfo, y ii) en el sur por los flujos de los ríos Grijalva-Usumacinta.

En México se reconocen cinco regiones caracterizadas por el desarrollo de su costa, el número de ríos con diferentes caudales y su climatología (De La Lanza Espino et al., 2013) :

1. *Región Nororiental*, ubicada en el Estado de Tamaulipas: contiene 6 ríos de los cuales los principales son Bravo y Soto la Marina, así como 12 lagunas dentro de la que se conoce como Laguna Madre, 2 estuarios y 45 esteros.
2. *Región Centro*, en el Estado de Veracruz: contiene 22 ríos de los cuales los más importantes son Pánuco, Tecolutla, Tuxpan y Papaloapan, 23 lagunas, 2 estuarios y 1 estero.
3. *Región Suroriental*, que incluye a los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche: contiene 11 ríos, dentro de los que se encuentra el Grijalva-Usumacinta, Coatzacoalcos, Candelaria, Palizada y Chumpán, 33 lagunas, 40 estuarios, y 1 estero.
4. *Región Occidental* y norte de la península de Yucatán, conformada por los estados de Campeche y Yucatán: contiene sólo un río, el Champotón, 5 lagunas y 3 esteros.
5. *Región del Mar Caribe*, en el Estado de Quintana Roo: contiene 6 ríos, de los cuales el principal es el río Hondo, 15 lagunas y 3 bahías.

La circulación marina en el GdM presenta dos características semipermanentes: la Corriente del Lazo y un gran giro anticiclónico en la frontera oriental y occidental. La primera es causada por las características dinámicas de la corriente de Yucatán, que al introducirse como corriente cálida al GdM se denomina Corriente de Lazo. Una vez en el golfo, esta corriente presenta una evolución constante, y alterna entre dos estados. El estado “retraído” (otoño – invierno) se presenta cuando la corriente de Yucatán gira hacia el este a medida que ingresa al GdM, y fluye a lo largo del norte de Cuba para ingresar al estrecho de Florida. El estado “extendido” (primavera – verano) se genera cuando la corriente de Lazo se desplaza hacia el norte en el Golfo Central y se retrae en el sentido de las agujas del reloj para girar hacia el sur a lo largo de la plataforma oeste de Florida, ingresa por el Estrecho de Florida y regresa nuevamente al Atlántico hacia las costas europeas (Belkin et al., 2009; Díaz-Flores et al., 2017; Martínez-Lopez & Páres-Sierra, 1998; Otis et al., 2019; Zavala-Hidalgo et al., 2014)(Figura 5).

Cuando se extiende, la corriente de Lazo genera un gran remolino anticiclónico (> 300 km de diámetro) que se desplaza hacia el oeste antes de descomponerse en el Golfo Occidental. A medida que la corriente de Lazo desprende el gran giro anticiclónico, vuelve progresivamente a su estado retraído (Otis et al., 2019). Estas corrientes son importantes para entender la distribución de algunos contaminantes y su localización en el registro sedimentario, debido a que pueden ser transportados a grandes distancias por las corrientes marinas.

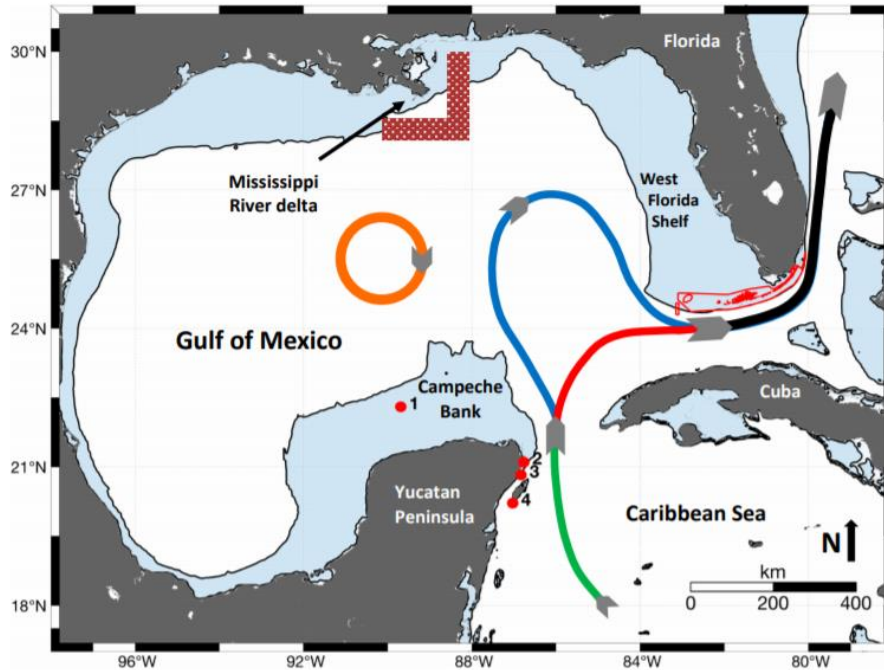


Figura 5. Mapa esquemático de las corrientes marinas del Golfo de México. La corriente de Yucatán llega del Caribe (línea verde) e ingresa al Golfo de México para transformarse en la Corriente de Lazo, que presenta 2 variaciones, la fase “retraída” (línea roja) y “extendida” (línea azul), de la cual se desprende el gran giro anticiclónico (círculo naranja). Tomado de Otis et al. (2019).

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Establecimiento de las sub-zonas de estudio (N y S)

Para agrupar y clasificar los datos se utilizaron las LME's, que son unidades racionales del espacio oceánico en las que puede aplicarse la gestión basada en los ecosistemas. Debido a las diferencias que existen en la región del GdM por las características naturales, y el desarrollo económico, político y social, se realizó una subdivisión de la LME05 en **región Norte**, que comprende a los Estados Unidos de Norte América, y **la región Sur**, donde se incluye a México.

### 6.2. Base de datos

Se empleó la base de datos realizada por el WG39, albergada en el portal de UNINMAR (<http://uninmar.icmyl.unam.mx/collections/wg39-gesamp>), del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, que incluye registros sedimentarios de contaminantes de todas las LME's hasta el año 2014 (Figura 6). Para completar los datos del LME05, objeto de este trabajo, se utilizó la misma estrategia de revisión realizada para GESAMP, con artículos publicados hasta marzo de 2018.

## Global Trends in Pollution of Coastal Ecosystems

### GESAMP Working Group 39 database

GESAMP, with the support of the IAEA and UNIDO constituted Working Group 39 with the goal to provide stakeholders, scientists and society in general, an objective and global assessment of pollution trends during the last century in coastal ecosystems.

The work is based on the collection and analysis of contaminant time series, mostly from sedimentary records, from peer-reviewed published papers. Data from selected contaminants are gathered by LME.

Quality assessed and fully referenced data are permanently stored in UNINMAR. The final report will also be available here.

Large Marine Ecosystems of the World and Linked Watersheds



Source: <https://www.st.nmfs.noaa.gov/>

Figura 6. Página principal de la base de datos del WG39 de GESAMP, con datos de contaminación de las 66 LME's. La base de datos está albergada en el portal de UNINMAR, ICML-UNAM.

La información de la base de datos WG39-GESAMP contiene:

- Series de tiempo (no menores a 5 años). Se consideraron núcleos sedimentarios fechados con  $^{210}\text{Pb}$  y/o radionúclidos de origen antropogénico como  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  y  $^{241}\text{Am}$ . Cada registro corresponde a un par de datos, es decir concentración – tiempo.

- Contaminantes:

- Inorgánicos: metales, metaloides y radionúclidos.

- Orgánicos: plaguicidas, químicos orgánicos industriales, productos orgánicos industriales, hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs).

- Otros: nutrientes y sedimentos.

- Coordenadas geográficas

- Fecha de muestreo

- Técnicas de análisis químico

- Referencias bibliográficas

Debido a su amplia distribución en el GdM, los EPT's elegidos para este trabajo fueron **cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo, vanadio y zinc**. De la base de datos de GESAMP, con información actualizada hasta 2015, se obtuvieron 7 artículos con información de 26 núcleos con 25 series de tiempo. Para complementar la información se buscaron artículos hasta el año 2018 con los criterios de GESAMP.

### 6.3. Análisis de tendencias

Los datos se organizaron, inspeccionaron y analizaron con el lenguaje de programación estadístico R (R Core Team, 2018), incluyendo estadística básica, correlaciones, regresiones, tablas y gráficos con información estadística.

Con la información en la base de datos se realizó un análisis de tendencias, para estudiar el comportamiento de las series temporales a través de i) análisis de correlaciones, para investigar la relación entre las concentraciones y el tiempo, ii) regresiones lineales, para cuantificar las tendencias temporales en los casos de correlaciones significativas, y iii) regresión local *loess* (o *lowess*, locally weighted scatter plot smooth) (A. Zuur et al., 2007, 2009), para suavizar las series de tiempo regionales.

La técnica *loess* minimiza la varianza de los residuales a través de las variables predictoras, y permite obtener diagramas que visualmente presentan mayor claridad del comportamiento de las concentraciones de contaminantes con el tiempo (Figura 7). El parámetro de suavizado utilizado (*span*) fue determinado con una validación cruzada. Para ello, se dividen los datos en  $k$  subconjuntos. Uno de los subconjuntos se utiliza como datos de prueba y el resto ( $k-1$ ) como datos de entrenamiento en un proceso que es repetido durante  $k$  iteraciones (10 para este trabajo). Durante cada iteración se calcula el error, a través de la media aritmética de los  $k$  valores de errores obtenidos a través de la fórmula:

$$cv_{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k MS E_i$$

Donde *cv* (*cross validation*) es la validación cruzada,  $k$  es el número de grupos en que se dividen los datos con el mismo tamaño y de forma aleatoria y *MSE* (*mean square error*) es el promedio de los errores. De todas las pruebas, se escogió el *span* con menor error, es decir, el que mejor reproduce el conjunto de datos. Con la curva suavizada, se determinaron los puntos de inflexión relevantes para cada contaminante. Finalmente, se realizaron regresiones lineales para determinar las tendencias recientes para cada contaminante y región. La tendencia (en unidades de % de cambio por década) se obtuvo a partir de la pendiente de la regresión.

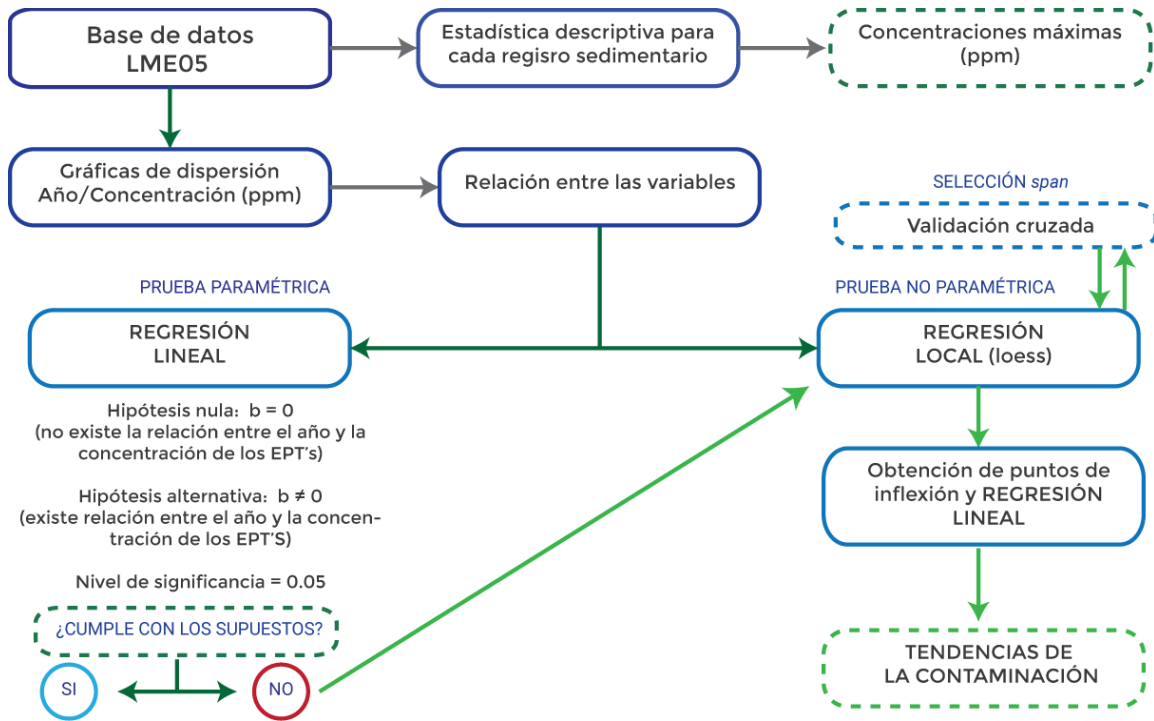


Figura 7. Metodología para el análisis de la base de datos de contaminación marina en el registro sedimentario costero.

#### 6.4. Fuentes de contaminación

La serie temporal regional de cada metal presenta un comportamiento específico que depende de la historia particular de cada fuente o conjunto de fuentes, por lo que se realizó una revisión histórica sobre conductores del cambio global de la región (demografía, desarrollo tecnológico agrícola e industrial), considerados potencialmente responsables de las tendencias de contaminación. Para cada caso se realizaron las siguientes actividades:

1. Inspección detallada de los artículos de la base de datos de la LME05, para identificar posibles fuentes.
2. Obtención de la curva demográfica de la zona de estudio.
3. Obtención de series temporales de indicadores del desarrollo económico como el PIB, indicadores del desarrollo industrial, agrícola y minero para la identificación de fuentes puntuales relevantes.

#### 6.5. Toxicidad de los EPT's

Con ayuda de la guía de la NOAA (Screening Quick Reference Tables) se obtuvieron los valores de referencia para evaluar los riesgos potenciales sobre la biota por sedimentos marinos contaminados por EPT's (Buchman, 2008). Se utilizaron los niveles de referencia TEL y PEL para estimar los posibles efectos por la concentración química de los EPT's en los organismos bentónicos (Chapman, 1990).

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Contenido de la base de datos

La base de datos actualizada hasta marzo de 2018 sobre concentraciones de EPT's en sedimentos fechados incluyó un total de 19 artículos publicados en LME05, de los cuales sólo 7 provenían de la base de datos de GESAMP (Anexo: Tabla resumen del contenido de la base de datos). En total, 12 cumplían con el tiempo mínimo requerido para realizar el estudio sobre tendencias (5 años). El total de núcleos sedimentarios fue de 42, de los cuales 16 se encuentran en la región norte y 26 en la región sur (Figura 8).

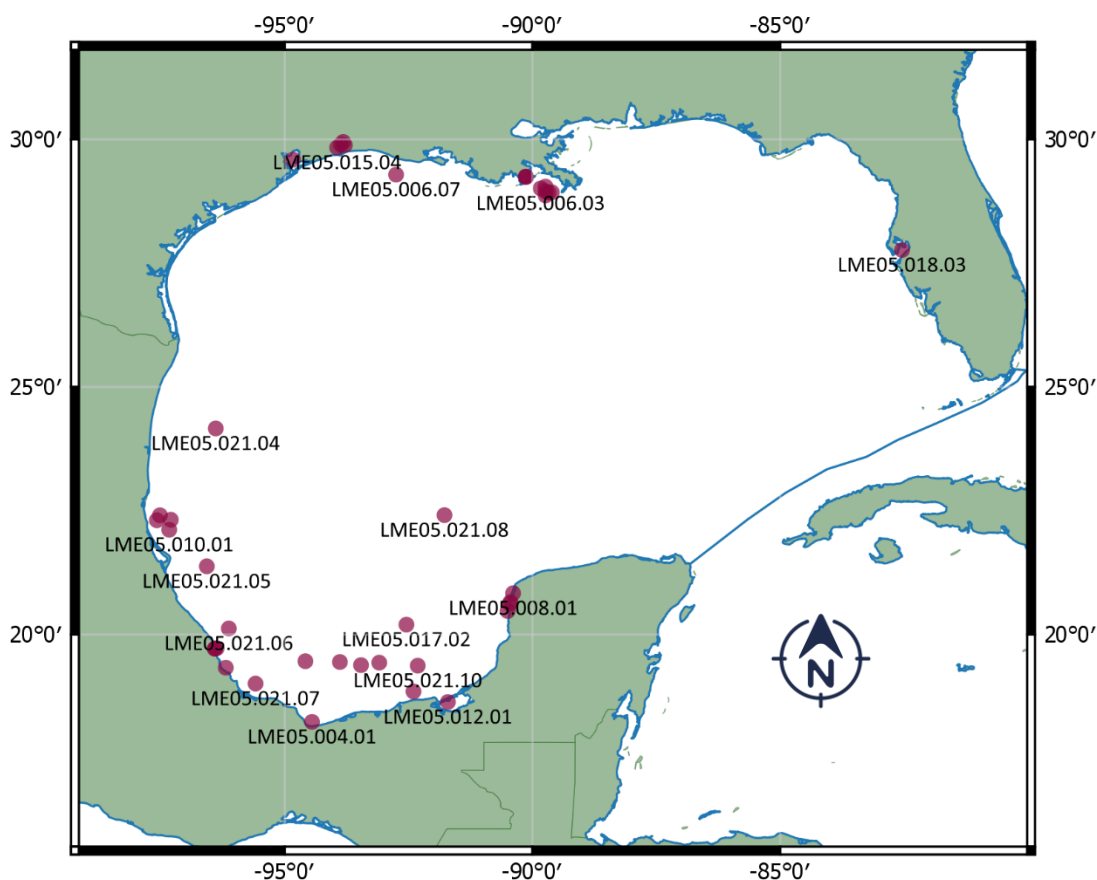


Figura 8. Distribución de los núcleos sedimentarios con datos de contaminación por EPT's y fechado en LME05.

### 7.2. Series de tiempo

El número de series de tiempo obtenidas fue de 217, de las cuales 5 son de plata, 15 de cadmio, 30 de cromo, 35 de cobre, 2 de mercurio, 30 de níquel, 35 de plomo, 30 de vanadio y 35 de zinc (Figura 9). En cuanto a su ubicación, 53 se encuentran en la región norte y 164 en la región sur. Los gráficos de dispersión muestran diferentes comportamientos para cada serie de tiempo. En algunos casos esas relaciones son positivas, es decir, la contaminación por EPT's aumenta con el tiempo; en otros

casos las relaciones son negativas; en el resto de los casos no se observa algún patrón en particular, ya que los puntos se distribuyen de manera heterogénea y por tanto la relación es débil (Figura 10).

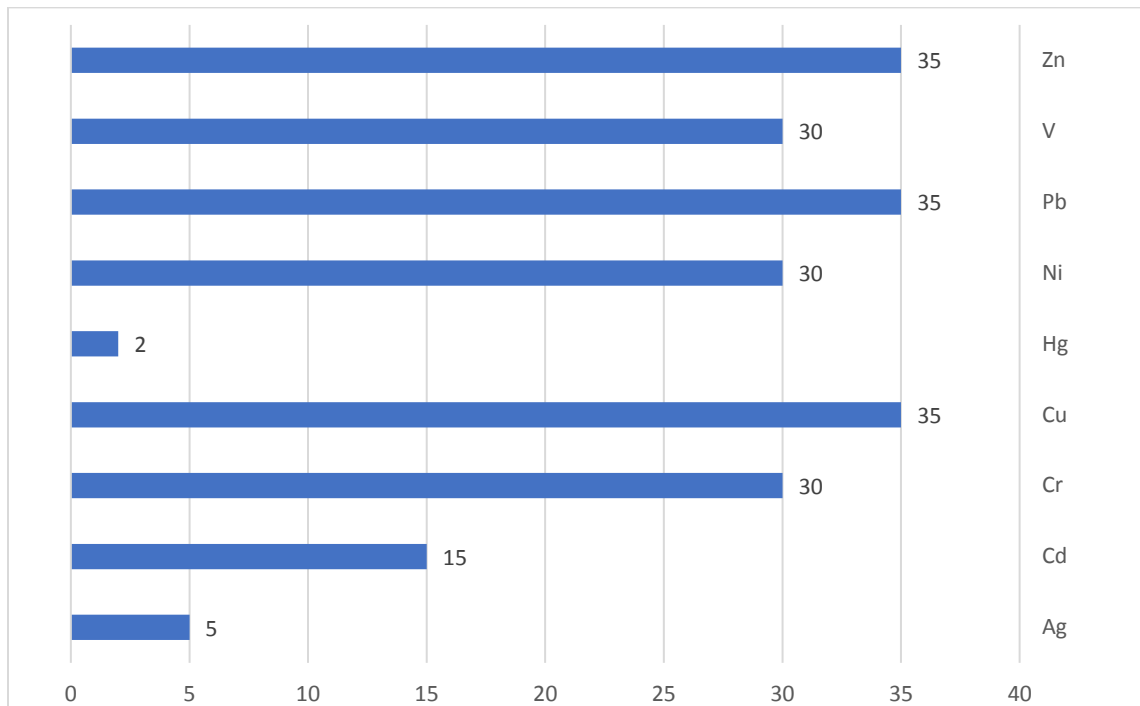


Figura 9. Series de tiempo de los EPT's para el Golfo de México.

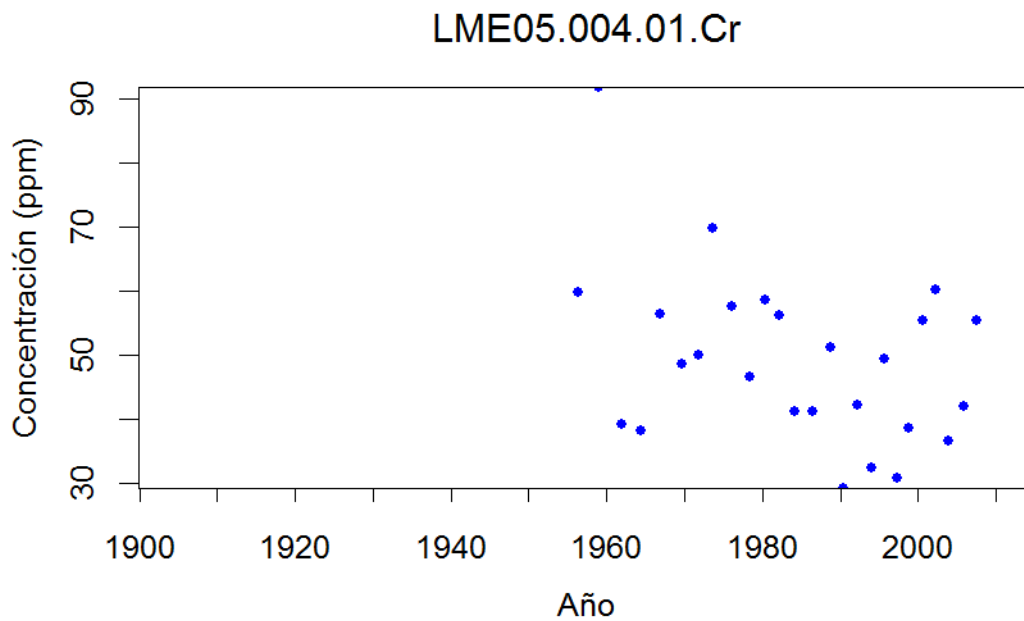


Figura 10. Gráfico de dispersión de la serie de tiempo del Cr en un núcleo de la desembocadura del Río Coatzacoalcos (Ruiz-Fernández et al., 2012).

Para cada serie de tiempo se realizó una regresión lineal para inspeccionar la dependencia de la contaminación con el tiempo (Figura 11). Sin embargo, en muchas de estas series de tiempo no se cumplen algunos supuestos (normalidad y homocedasticidad de los residuos) y el valor p obtenido es menor al nivel de alfa (0.05), por lo que no existe una asociación estadística significativa (Figura 12).

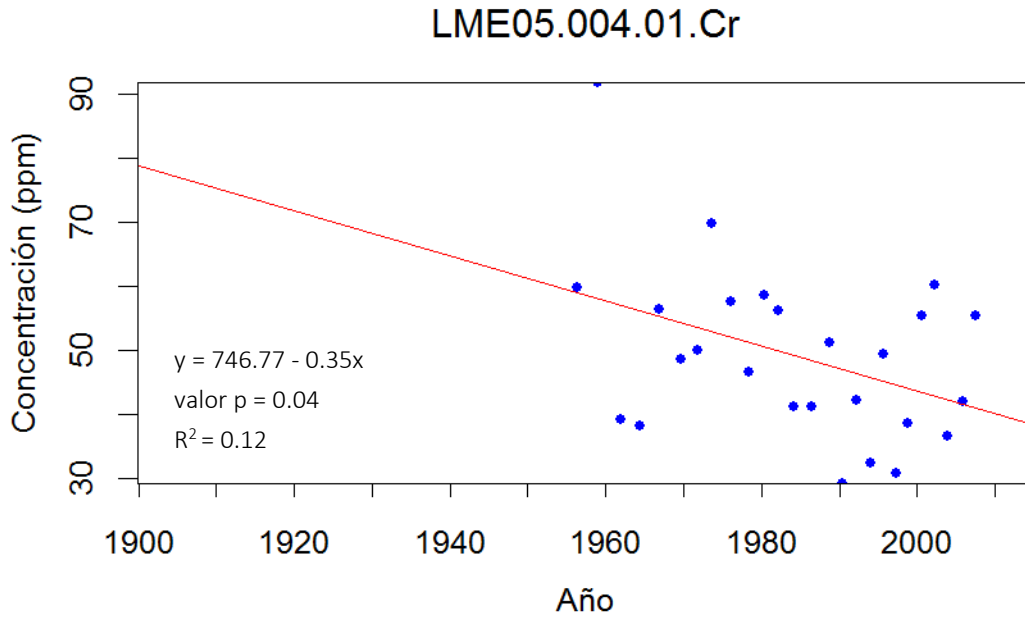


Figura 11. Modelo de regresión lineal para la serie de tiempo del Cr en un núcleo de la desembocadura del Río Coatzacoalcos (Ruiz-Fernández et al., 2012).

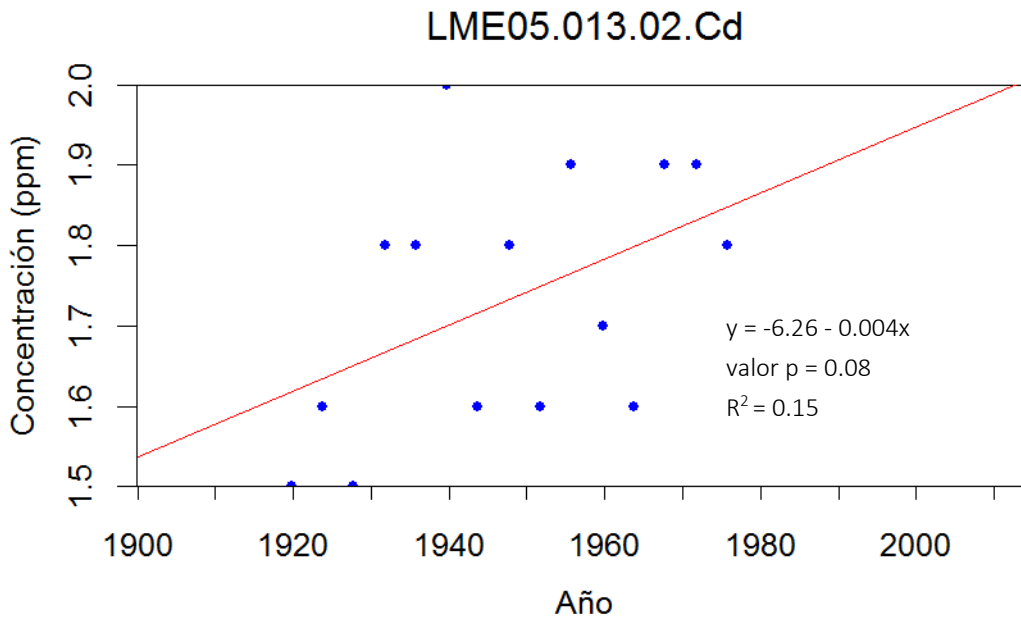


Figura 12. Modelo de regresión lineal no significativa para serie de tiempo de Cd de un núcleo en Luisiana (DeLaune et al., 2006).



Para poder comparar las tendencias de las series de tiempo en registros sedimentarios diferentes, con intervalos de concentración diferentes, se escalaron las concentraciones de los EPT's al intervalo [0, 1] a través de la fórmula:

$$\text{Valor escalado} = \frac{\text{Concentración EPT} - \text{Concentración mínima EPT}}{\text{Concentración máxima EPT} - \text{Concentración mínima EPT}}$$

Con los valores escalados se generaron modelos loess para ajustar curvas suavizadas. Los valores de *span* utilizados, obtenidos por correlación cruzada, se encuentran en la Tabla 1. Las series temporales regionales se representaron como una combinación del gráfico de dispersión de todos los datos de cada contaminante, la curva loess y la zona de incertidumbre loess al 95% (Figura 13). Finalmente, de cada curva suavizada se estimaron visualmente los puntos de cambio (mínimos o máximos, Tabla 2), a partir de los cuales se estimaron las tendencias recientes de la contaminación en la región y sub-regiones.

Tabla 1. Porcentaje de observaciones útiles (*span*) para el modelo loess obtenidas por validación cruzada.

<b>EPT</b>	<b>Global</b>	<b>Norte</b>	<b>Sur</b>
Ag	0.8	0.4	0.65
Cd	0.4	0.6	0.4
Cr	0.4	n.d.	0.4
Cu	0.45	0.6	0.5
Hg	0.4	n.d.	0.4
Ni	0.85	n.d.	0.85
Pb	0.85	0.45	0.8
V	0.6	n.d.	0.6
Zn	0.6	0.65	0.45

*n.d.: no hay datos*

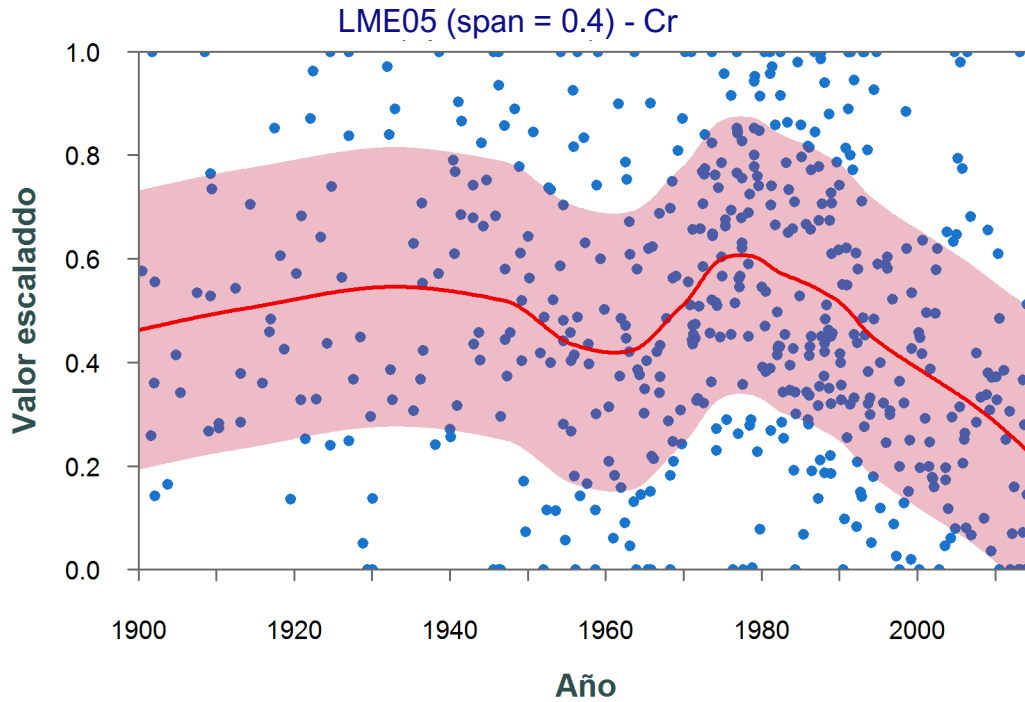


Figura 13. Serie de Tiempo del Cr en LME05. La línea roja muestra la curva suavizada de la contaminación. El área sombreada representa los percentiles 5 y 95 % del modelo de suavizado.

Tabla 2. Tiempos de máxima (celda sin sombrear) o mínima (celda sombreada) concentración de contaminación.

Contaminante	Global	Norte	Sur
Ag	1970	1970	1981
Cd	1972	1968	1987
Cr	1981	1977	1981
Cu	1950	1972	1967
Hg	1962	-	1962
Ni	1994	1968	1999
Pb	1950	1971	1950
V	1964	1970	1990
Zn	1986	1976	1991

### 7.3. Tendencias de contaminación global

Las curvas suavizadas en LME05 (Figura 14) muestran máximos de concentración para i) Ag, Cd y V a finales de la década de los 60's y principios de los 70's, y ii) Cr y Zn a finales de los 70's y principios de los 80's. A partir de los máximos, las regresiones lineales (Tabla 3) muestran tendencias de disminución significativa para Ag, Cd, Cr, V y Zn, con un valor máximo de:  $-13.1\%$  década<sup>-1</sup> para Ag, un indicador típico de residuos de tipo urbano (Feng et al., 1998; Qian et al., 2015; Sañudo-Wilhelmy

& Flegal, 1992); 8% década<sup>-1</sup> para Cd; 9.6% década<sup>-1</sup> para Cr; 3.4% década<sup>-1</sup> para V; 5.8% década<sup>-1</sup> para Zn. Estos elementos proceden principalmente de la industria metalúrgica y la quema de combustibles fósiles (Callender, 2003; Teng et al., 2006). El Pb presenta una concentración mínima en el año de 1970, y un aumento significativo de 3.8% década<sup>-1</sup> hacia la actualidad. Cu y Ni no presentan tendencias significativas.

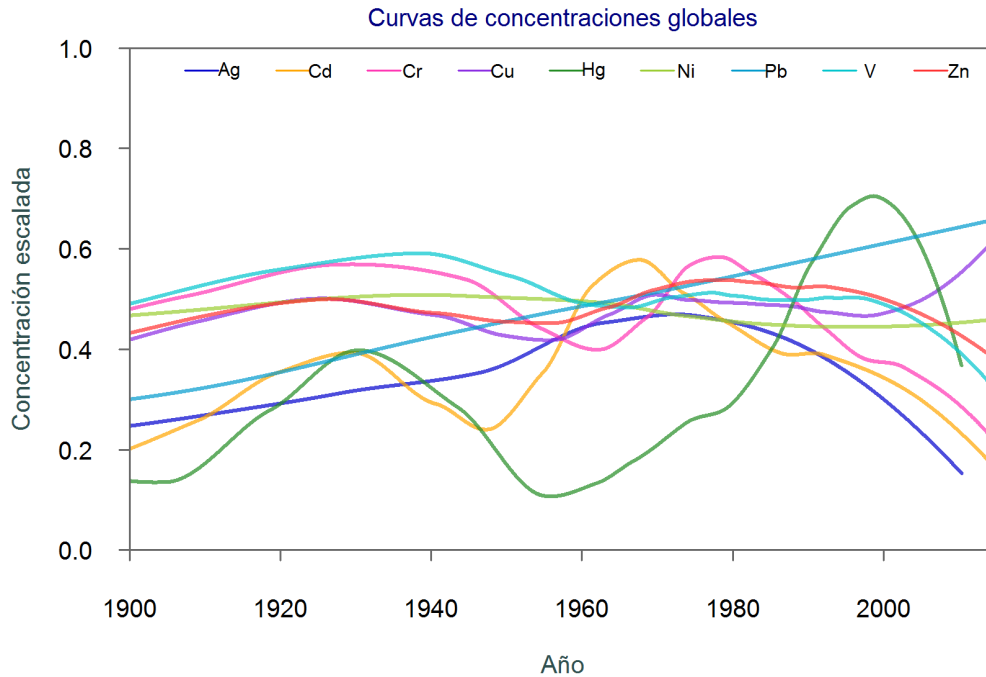


Figura 14. Tendencias de contaminación de las concentraciones de los EPT's en todo el Golfo de México.

Tabla 3. Tendencias de la contaminación a nivel global de la LME05.

EPT	Periodo	Número de datos	Número de series de tiempo	Tendencia (% década <sup>-1</sup> )	Incertidumbre	P
Ag	1972 - 2010	53	5	-13.1	0.4	4.7E-03
Cd	1968 - 2016	111	15	-8.0	0.2	7.4E-04
Cr	1978 - 2016	228	26	-9.6	0.2	8.4E-08
Cu	1971 - 2016	293	31	Neutra		0.8
Hg	1999 - 2010	10	2	Neutra		0.7
Ni	1958 - 2016	329	26	Neutra		0.5
Pb	1972 - 2016	306	31	3.8	0.1	3.3E-03
V	1974 - 2016	219	23	-3.4	0.2	3.0E-02
Zn	1983 - 2016	187	31	-5.8	0.3	2.7E-02

#### 7.4. Tendencias de contaminación en la región Norte

La región norte presenta tendencias más marcadas en todos los EPT's, con registros de máxima concentración de Cd a finales la década de los 60's, y de Ag, Cu y Pb a lo largo de la década de los 70's. Las tendencias significativas son decrecientes para Ag, Cd, Cu y Pb, con un máximo de 11.1% década<sup>-1</sup> para Ag, 15% década<sup>-1</sup> para Cd, 21.7% década<sup>-1</sup> para Cu y 22.1% década<sup>-1</sup> para Pb. La tendencia para el Zn no es significativa (Figura 15, Tabla 4).

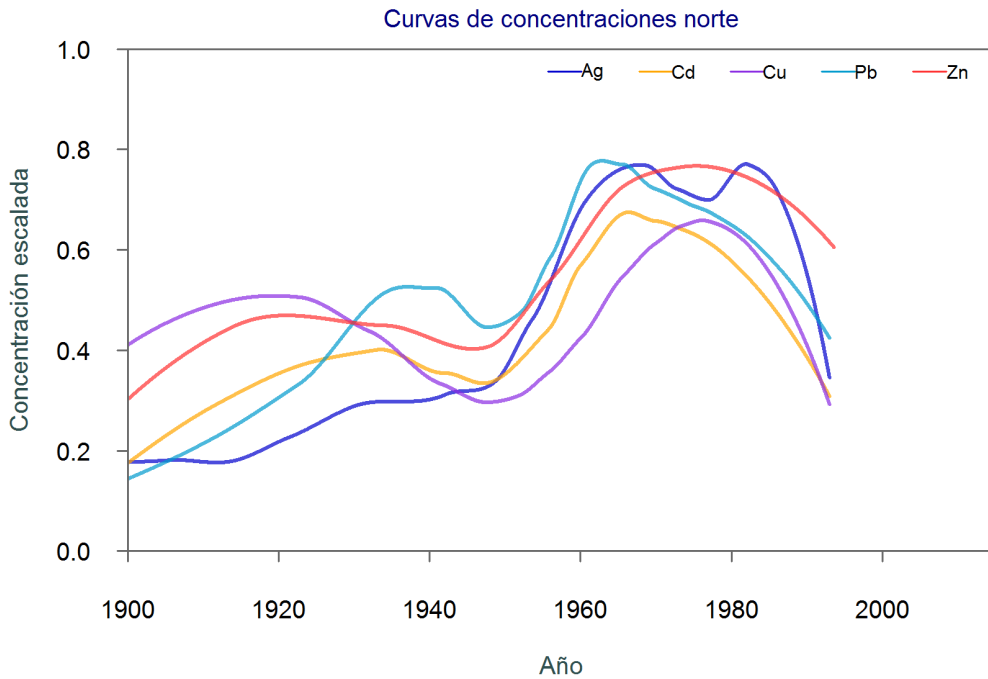


Figura 15. Tendencias de contaminación de las concentraciones de los EPT's en la región LME05 norte.

Tabla 4. Tendencias de la contaminación región norte de la LME05.

EPT	Periodo	Número de datos	Número de series de tiempo	Tendencia (% década <sup>-1</sup> )	Incertidumbre	P
Ag	1967 - 1993	36	3	-11.1	0.5	0.05
Cd	1968 - 1993	50	6	-15.0	0.5	2.1E-03
Cu	1975 - 1993	31	6	-21.7	0.8	1.0E-02
Pb	1975 - 1993	34	6	-22.1	0.7	3.7E-03
Zn	1977 - 1993	25	6	Neutra		0.1

### 7.5. Tendencias de contaminación en la región Sur

En la región sur los EPT's con tendencias recientes significativas son solo Cd, Cr, Pb y V. El Cr y V presentan las máximas concentraciones en la década de los 70's, con tendencias de disminución de 9.6 y 3.2% década<sup>-1</sup>. El Cd presenta su máxima concentración a principios del año 2000, año a partir del cual tiende a disminuir en un 27% década<sup>-1</sup> de. A diferencia de los anteriores, el Pb presenta una tendencia positiva a partir del año de 1950 con 5% década<sup>-1</sup> (Figura 16, Tabla 5).

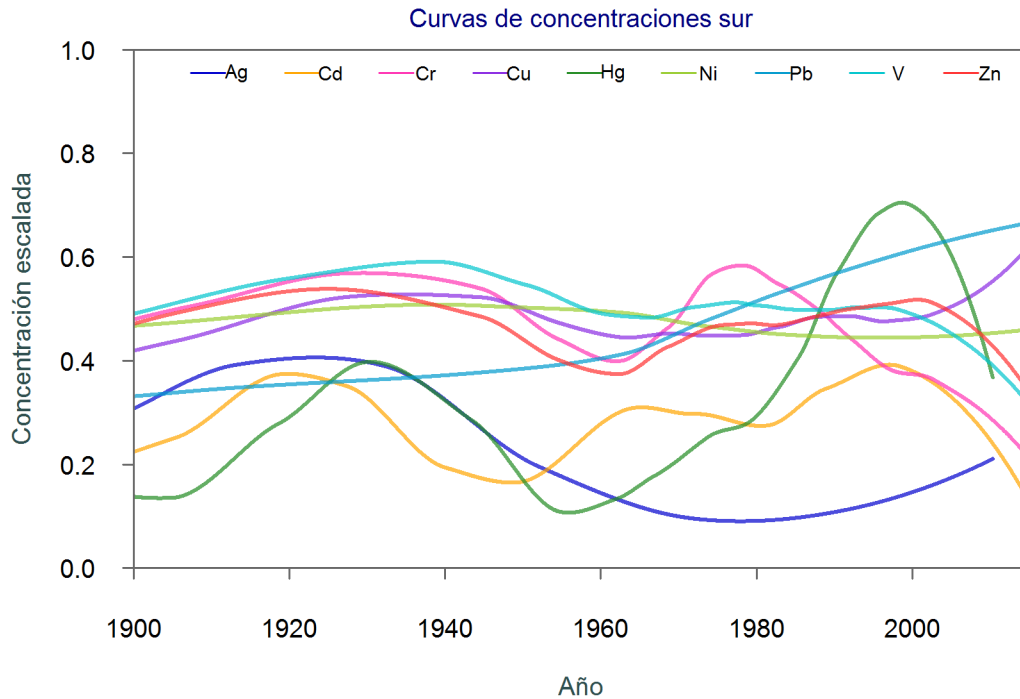


Figura 16. Tendencias de contaminación de las concentraciones de los EPT's en la región LME05 sur.

Tabla 5. Tendencias de la contaminación región sur de la LME05.

EPT	Periodo	Número de datos	Número de series de tiempo	Tendencia (% década <sup>-1</sup> )	Incertidumbre	P
Ag	1980 - 2010	19	2	Neutra		0.3
Cd	1997 - 2016	29	9	-26.7	1.3	4.9E-02
Cr	1978 - 2016	228	26	-9.6	0.2	8.4E-08
Cu	1977 - 2016	217	25	Neutra		0.1
Hg	1999 - 2010	10	2	Neutra		0.7
Ni	1950 - 2016	358	26	Neutra		0.1
Pb	1950 - 2016	356	25	5.3	0.1	5.9E-10
V	1970 - 2016	238	23	-3.2	0.1	2.2E-02
Zn	2001 - 2016	64	25	Neutra		0.1

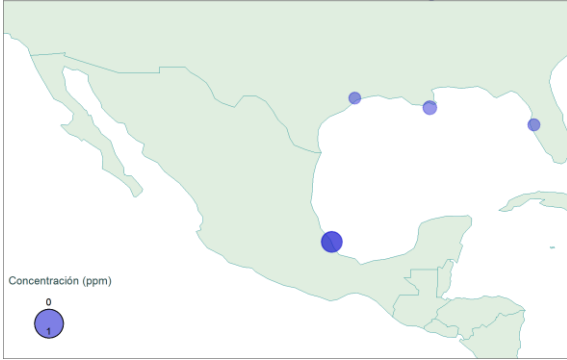
## 7.6. Concentraciones máximas de los contaminantes

Los valores máximos de concentración de los EPT's en los sedimentos marinos de la LME05 se localizaron en mayor proporción en la región sur del GdM (Figura 17). Del total de los EPT's siete (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) sobrepasaron el nivel de referencia TEL y sólo 3 (Cd, Cr y Ni) el PEL, pero con el doble de la concentración límite (Tabla 6).

Tabla 6. Valores máximos de concentración (ppm) de los EPT's en LME05, y las sub-regiones norte y sur. Se marcan en rojo los valores que sobrepasan el PEL.

EPT	Valor máximos C (ppm)			TEL (ppm)	PEL (ppm)	C / PEL
	Global	Norte	Sur			
Ag	0.5	0.2	0.5	0.73	1.77	
Cd	10.3	2.5	10.3	0.68	4.21	2.4
Cr	353	-	353	52.3	160	2.2
Cu	103	27.7	103	18.7	108	
Hg	0.3	-	0.3	0.13	0.7	
Ni	120	-	120	15.9	42.8	2.8
Pb	36.8	36.8	30	30.24	112	
V	165	-	165			
Zn	153.8	153.8	143	124	271	

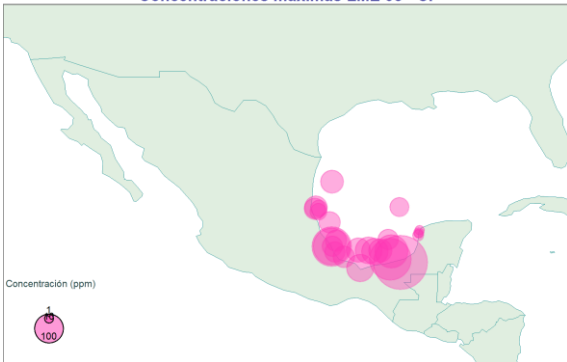
Concentraciones máximas LME 05 - Ag



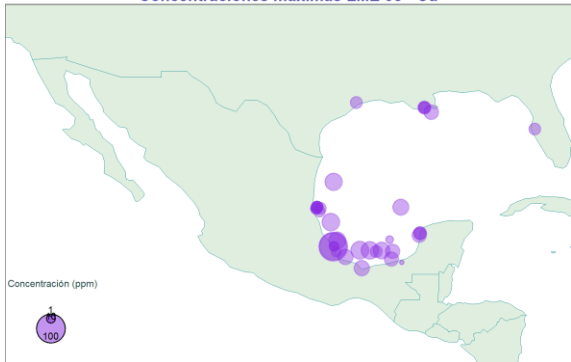
Concentraciones máximas LME 05 - Cd



Concentraciones máximas LME 05 - Cr



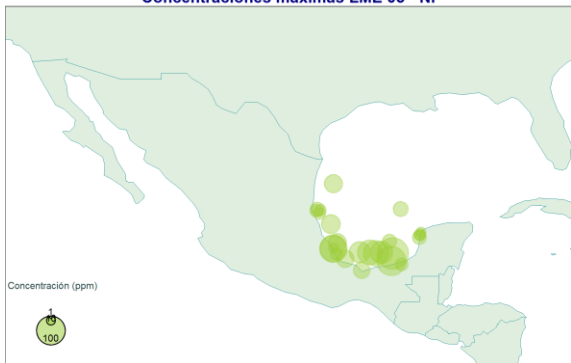
Concentraciones máximas LME 05 - Cu



Concentraciones máximas LME 05 - Hg



Concentraciones máximas LME 05 - Ni



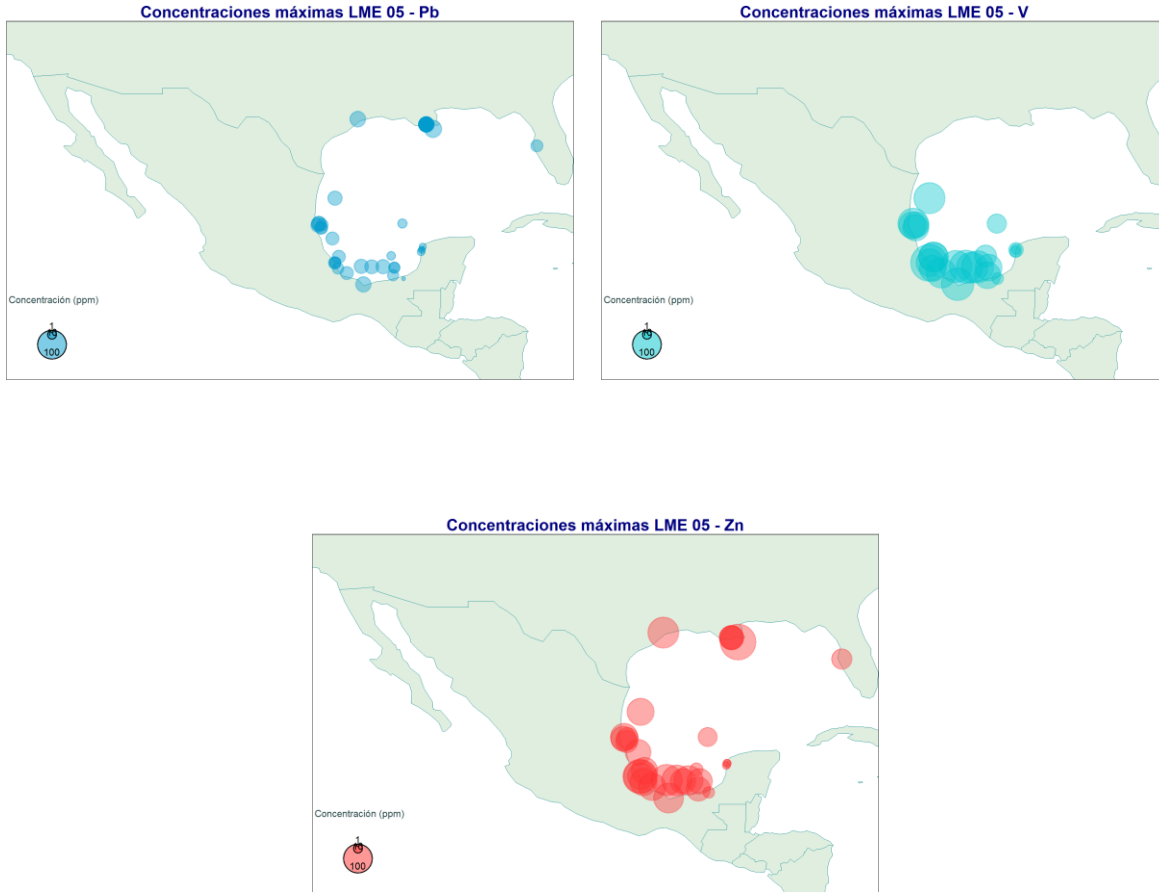


Figura 17. Ubicación de las concentraciones máximas de los EPT's en la LME05. Escala de concentración (ppm) para Ag y Hg entre 1 y 0; Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn entre 1 y 100.

### 7.7. Conductores del cambio Global

El crecimiento demográfico y el desarrollo económico son dos de los conductores del cambio global que se han reconocido como principales factores en las alteraciones del medio natural (Krausmann et al., 2009; Nelson et al., 2005). Las tendencias de crecimiento de la población en México y Estados Unidos de América indican un incremento de la población en diferentes épocas de desarrollo. En el apogeo de la revolución industrial, entre 1900 y 1910, Estados Unidos tuvo un incremento en su población de forma acelerada hasta el año 2000, cuando empieza ralentizarse. Por su parte México refleja este incremento después de 1950, hasta la actualidad (Figura 18).



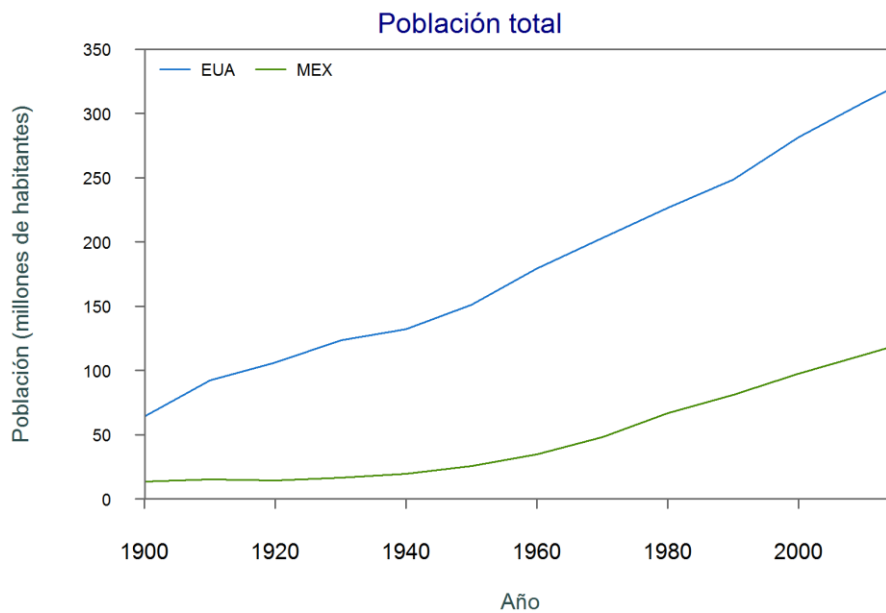


Figura 18. Crecimiento demográfico de México y Estados Unidos de América.

El crecimiento de los centros urbanos es el resultado del desarrollo económico de cada país, y son los puntos estratégicos donde se llevan a cabo las principales actividades productivas, especialmente la industria que, a nivel global, es la mayor contribuidora al Producto Interno Bruto (PIB), que es el valor monetario de la producción corriente de bienes y servicios, usado como medida del bienestar material de una sociedad. Estados Unidos de América es el tercer país con mayor población en el mundo (PAHO, 2019), debido a las dimensiones continentales y recursos naturales. Las constantes migraciones también han favorecido el crecimiento demográfico de este país. El 19.3% de la población se encuentra en las zonas rurales, que abarca el 97 % del territorio nacional (United States Census Bureau, 2016), y después de 1910 la población urbana ha ido en aumento, lo que implica mayor demanda de producción en los diversos sectores económicos (Figura 19).

En relación con EUA, México ha presentado un crecimiento tardío, pues algunos factores internos provocaron que la población tuviera una tendencia negativa en un periodo de 20 años como resultado de los conflictos sociales y catástrofes naturales, como revueltas sociales, hambrunas, migración y epidemias a principios del siglo XX (Gutmann et al., 2000; Welte-Chanes, 1994). La estabilización económica, política y social se logró después de 1950, cuando se observa una mayor tendencia hacia un crecimiento de la población, sobre todo en el área urbana (Figura 19).

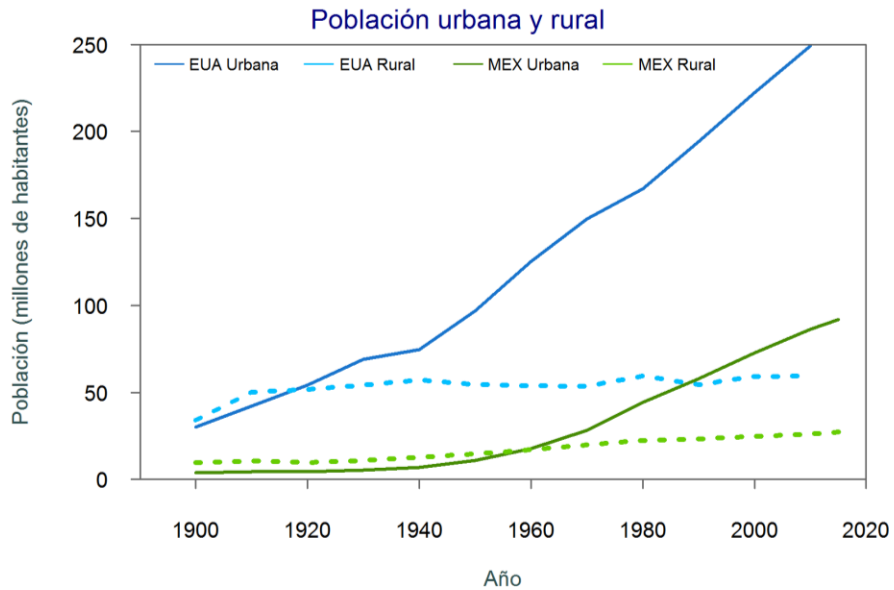


Figura 19. Población urbana y rural de México (verde) y Estados Unidos de América (azul). Fuente: INEGI, 2015 y United States Census Bureau, 2016.

Las estadísticas demográficas de los últimos 115 años demuestran la disparidad de tasas de crecimiento entre países y regiones en distintas etapas de desarrollo. La rápida aceleración del crecimiento demográfico de los países que rodean al GdM se relaciona con el desarrollo y crecimiento económico medido a través del PIB. En los periodos de más rápido crecimiento de los países desarrollados como los Estados Unidos de América se comprueba un aumento de la población y el PIB, aportado en su mayoría por el sector industrial (Figura 20). México ha logrado altas tasas de crecimiento económico paralelamente a una acelerada expansión demográfica a partir de 1980, con un mayor peso del sector industrial sobre el sector agrícola y la minería (Figura 21).

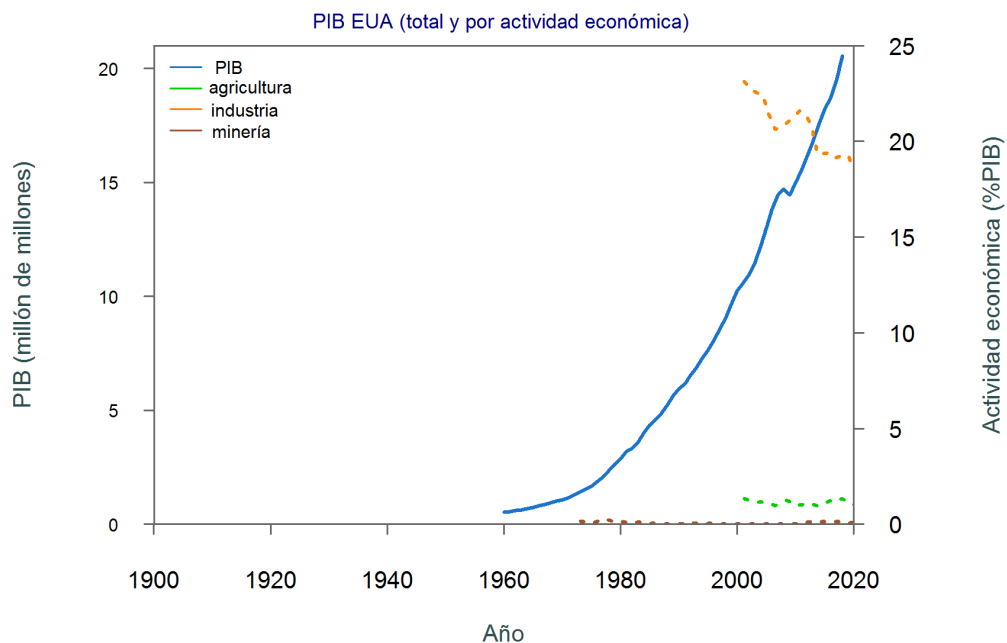


Figura 20. PIB de EUA, millón de millones. PIB neto y por actividad económica (sector agrícola, industria y minería). Fuente: Bureau of Economic Analysis, 2019 y Banco mundial (<https://datos.bancomundial.org/>).

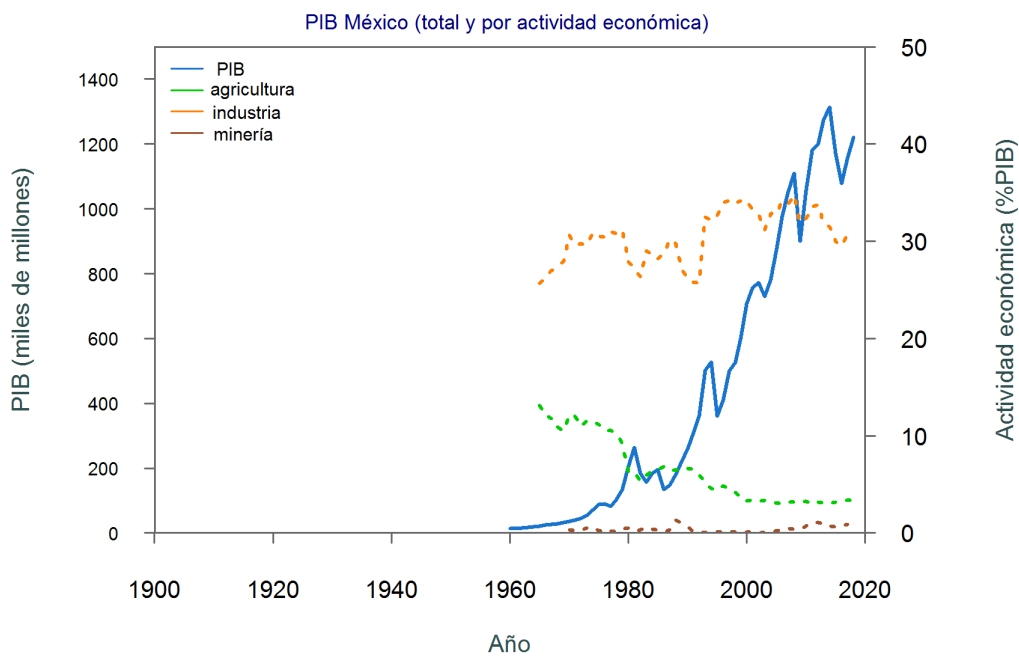


Figura 21. PIB de México: neto y por actividad económica (sector agrícola, industria y minería). Fuente: INEGI, 2019 y Banco mundial (<https://datos.bancomundial.org/>).



El PIB, índice utilizado para medir el desarrollo económico de las sociedades (INEGI, 2013), muestra los cambios de las tendencias de los sectores productivos (primarios, secundarios y terciarios) en las naciones. Este índice demuestra que a partir de mediados del siglo XX, como consecuencia de la revolución industrial y tecnológica, se han homogeneizado los patrones de consumo, extracción y producción hacia una economía o modelo global (Krausmann et al., 2009; Steffen et al., 2007).

EUA, país altamente desarrollado, se ha convertido en el modelo global a seguir por otras naciones, ya que su desarrollo económico y tecnológico ha generado un mayor PIB y por ende una mejor calidad de vida que ha repercutido en el crecimiento demográfico acelerado, sobre todo en los centros urbanos donde se concentra la mayor parte de la población. Sin embargo las consecuencias de los efectos provocados como producto de las externalidades negativas de los conductores del cambio global (desarrollo económico y crecimiento poblacional) han causado degradación ambiental, que ha aumentado de forma abrupta a partir de 1950 (Jones, 2016).

México ha seguido el modelo global generalizado, pero de forma desfasada y a una velocidad más lenta como consecuencia de su contexto histórico particular reflejado en su desarrollo económico y poblacional, los cuales han presentado un incremento a partir de 1970 y 1980 (Figura 23). Por ello las tendencias de contaminación, manifestadas en los registros sedimentarios de la LME05, también presentan diferencias entre México y EUA.

Debido a la importancia de las industrias metalmeccánica y petroquímica a principios del siglo XIX, éstas son señaladas como las mayores responsables del deterioro ambiental global, ya que la mayor parte de la producción de bienes de capital y de consumo doméstico provenían principalmente de estas actividades (Fajnzylber, 1990; Weintraub et al., 1992). Las actividades primarias, si bien han quedado rezagadas, también han contribuido a la contaminación a través del uso de agroquímicos (Nelson et al., 2006).

Los productos o residuos generados por las principales actividades económicas han provocado concentraciones anómalas de algunos metales y metaloides. Estos elementos son EPT's para la biota que habita las zonas costera de la LME05, área con mayor vulnerabilidad dado que son las zonas de deposición final de muchos de los contaminantes y donde se concentra una fracción importante de la población mundial (Sanchez-Cabeza & Druffel, 2009; Valette-Silver, 2006; Volke-Sepúlveda et al., 2005).

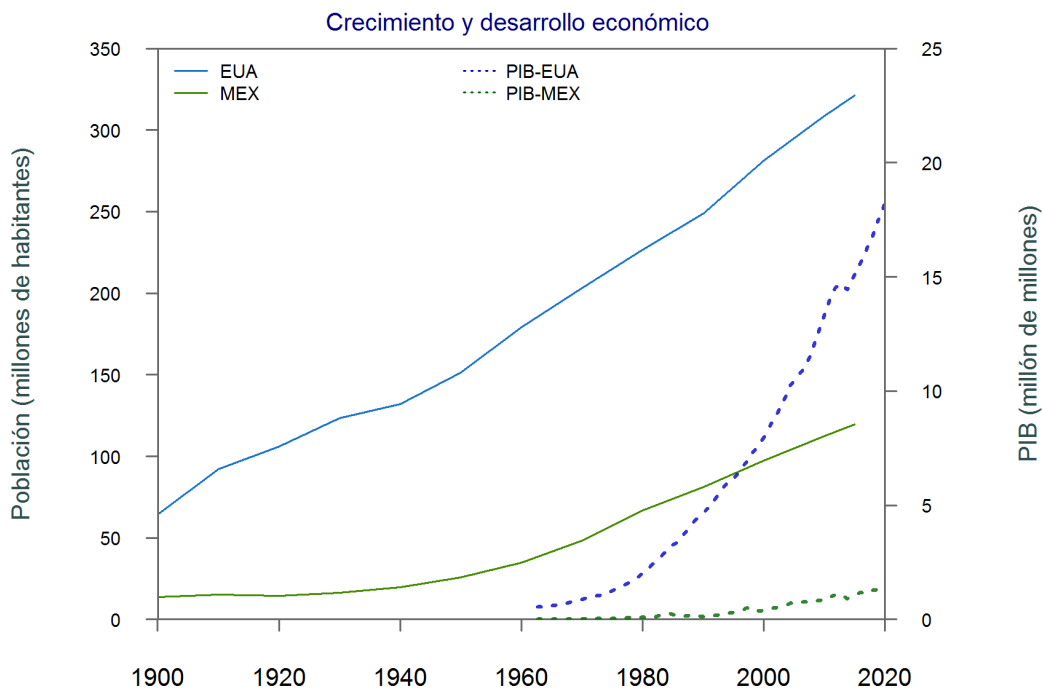


Figura 23. Los conductores del cambio global, crecimiento demográfico y desarrollo económico medido a través del PIB.

Los registros sedimentarios son una herramienta valiosa para discernir como los conductores del cambio global impactan en las zonas costeras. Estos registros pueden, por ejemplo, manifestar el impacto agudo de una práctica económica y las tendencias por el aumento o disminución de determinados impactos (Callender, 2003; Sanchez-Cabeza & Ruiz-Fernández, 2012; Valette-Silver, 2006). Los registros sedimentarios brindan información sobre las concentraciones de los EPT's, que comúnmente se asocian a la materia en suspensión en la columna de agua y son posteriormente depositados con los sedimentos del fondo. Por lo tanto, la columna sedimentaria se convierte en un archivo ambiental de las actividades antropogénicas. El fechado de los sedimentos de la columna con  $^{210}\text{Pb}$  permite reconstruir el desarrollo histórico y social de las poblaciones humanas y por ende se convierte en un archivo histórico de los conductores del cambio global (Figura 24) (Swarzenski et al., 2006).

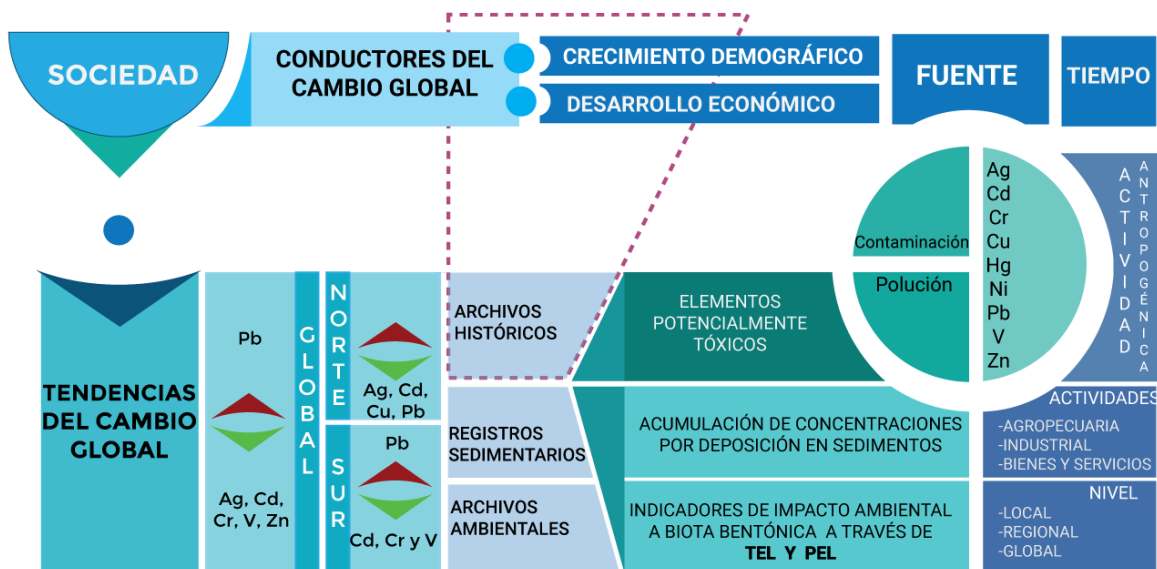


Figura 24. Esquema de las tendencias del cambio global como producto de las conductas de la sociedad.

El estudio de las concentraciones de los EPT's en los registros sedimentarios del GdM provee información valiosa sobre las concentraciones de elementos que rebasan significativamente los niveles naturales (Ali et al., 2016; Schropp et al., 1990). Los indicadores de calidad de los sedimentos (como el TEL y PEL) permiten inferir si en un determinado sedimento las concentraciones pueden causar efectos nocivos sobre la biota bentónica. Estos organismos son los más vulnerables por que se desplazan dentro y fuera del sedimento, incluso a ciertas profundidades donde pueden estar contenidas las concentraciones máximas (Chapman, 2007; Mann & Chapman, 1999).

La LME05 presenta puntos con valores máximos de concentración en zonas de alta influencia de contaminación debido al acarreo de contaminantes a través de los ríos que atraviesan por las ciudades más industrializadas y con mayor actividad económica que descargan en el GdM. Estas áreas urbanas funcionales, con mayor productividad económica y con una alta concentración demográfica, son catalogadas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). La mayor cantidad y extensión de áreas urbanas se encuentran en EUA, por lo que existe una mayor posibilidad que los puntos de máxima concentración de contaminación se localicen en la región norte. Sin embargo, estos se encuentran en la región sur (Figura 25).





Para 1945 EUA concentraba el capital internacional debido al aumento en la demanda de sus actividades primarias y desarrollo tecnológico para equipos y armamentos del conflicto bélico, que dieron como resultado una economía eficiente. Al mismo tiempo este país dotaba de inversiones a Gran Bretaña, en actividades agrícolas y extractivas (Fajnzylber, 1990).

Al observar su éxito como país inversionista, EUA creó sus empresas multinacionales (transnacionales), es decir las que un 25% o más de su inversión, producción, empleo o ventas funcionan en el extranjero en los distintos rubros de actividades como la agricultura o industria extractiva, la industria manufacturera, el comercio y los servicios. Esto ayudó a mejorar su PIB y provocó el aumento constante de su población desde los años 50's, lo que tuvo consecuencias en la demanda y por ende requería de una mayor producción industrial, la cual incremento y expandió fuera de su territorio nacional (CEPAL, 1998; Fajnzylber, 1990). Esto se ve reflejado en el porcentaje de algunas actividades económicas que redujeron su porcentaje del PIB total a partir de los 80's - 90's (Figura 26).

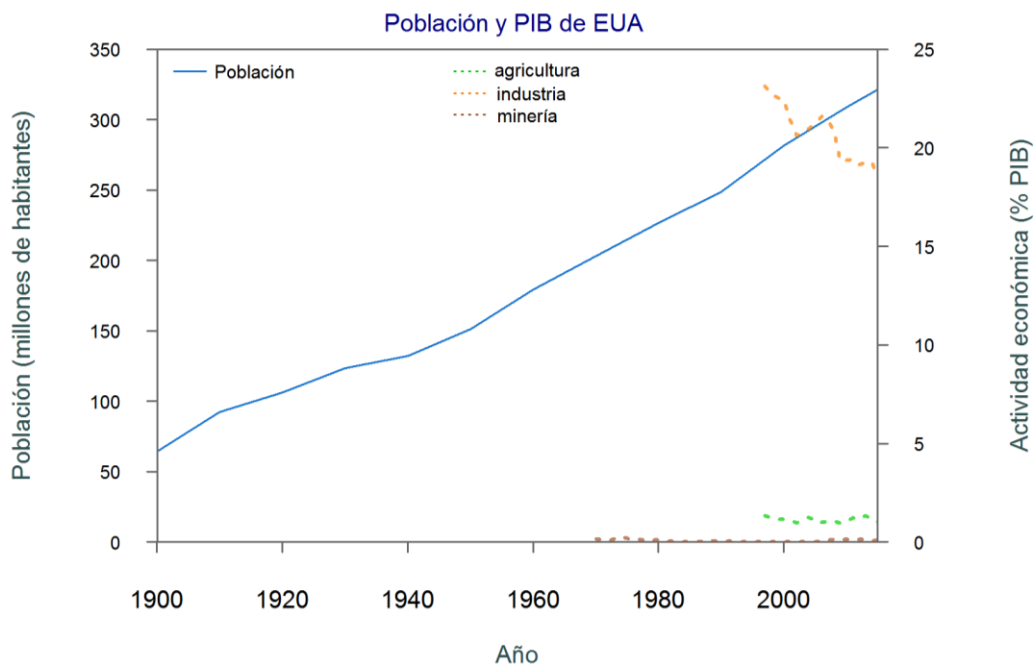


Figura 26. Población de EUA y actividades económicas más sobresalientes (agricultura, industria y minería) representadas en porcentaje del total del PIB. La industria tiende a disminuir desde los 80's, la agricultura y minería se mantienen estáticas. Fuente: Banco mundial (<https://datos.bancomundial.org/>).

### 8.1.1.2. Estudio de caso: Tampa Bay

La Bahía de Tampa es uno de los puertos más importantes de EUA debido a sus actividades comerciales, desarrollo turístico y pesca que representan una contribución importante a la economía regional. Desde 1880 la batimetría de la bahía ha sido modificada para permitir la entrada del transporte marítimo para intercambio comercial, que ha causado cambios en la hidrodinámica del estuario (Yates & Greening, 2011).

El territorio del litoral de Tampa está dominado por el uso de suelo urbano, suelos suburbanos industriales y agrícolas, y sólo en la región sur se presentan características de litoral natural. Esta zona se ha visto amenazada por su cercanía a las zonas urbanas y la influencia constante de actividad antropogénicas. Las ciudades que rodean la bahía (Tampa, San Petersburgo, Clearwater y Bradenton) son zonas con mayor densidad de población, que se ha cuadruplicado desde principios de 1950 (Long & Greening, 1999; Yates & Greening, 2011). Estas ciudades concentran las mayores fuentes (puntuales y no puntuales) de contaminación como producto de la urbanización y actividades industriales que pudieran afectar a la bahía.

En los sedimentos superficiales de la bahía de Tampa se han reportado niveles relativamente altos de diversos contaminantes, que han causado efectos biológicos adversos en muchos organismos acuáticos, sobre todo aquellos que se encuentran asociados al sedimento (Doyle et al., 1989; Macdonald et al., 1996a). El análisis de los bivalvos del Proyecto *Mussel Watch* señala concentraciones relativamente altas de los metales, metaloides y otros compuestos químicos (Long & Greening, 1999; Wolfe & Drew, 1990). También se han encontrado altos contenidos de metales tóxicos en tejidos de diversos organismos acuáticos, como los pastos marinos, los cuales al ser consumidos por otros niveles más altos han provocado alteraciones en las redes tróficas (Gerold et al., 2002).

El Programa de monitoreo ambiental en Tampa (TBNEP – Tampa Bay National Estuary Program) surgió formalmente a principios de los 90's, con la finalidad desarrollar un plan de manejo que disminuyera el impacto ambiental en la bahía. A través la evaluación periódica de parámetros ambientales observan si las regulaciones ambientales son funcionales (Karlen et al., 2008; Yates & Greening, 2011). Entre estos parámetros se encuentran medidas en sedimentos superficiales recientes, en los que se ha encontrado que los EPT'S en lugares con mayor influencia por las áreas urbanas como Boca Ciega, Tampa medio y en la zona de descarga del río Hillsborough, sobrepasan el límite TEL y en muy pocos casos el PEL (Figura 27-a) (Gerold et al., 2002; Long & Greening, 1999; Morrison & Greening, 2006; Zarbock et al., 1996).

A diferencia de las muestras superficiales, las concentraciones absolutas reportadas en el núcleo ubicado en el centro de la bahía de Tampa (Figura 27-b), señalan que los EPT's Ag, Cd, Cu, Pb y Zn no sobrepasan los límites TEL ni PEL, y solo un metal (Cu) presenta una proximidad al TEL en la década de los 80's. El incremento de las concentraciones hacia esa década está relacionado con las pocas medidas ambientales en la región, y se atribuye al vertido de aguas residuales y aguas de tormenta provenientes de las ciudades, que descargan en las diferentes partes de la bahía (Figura 28-a) (Santschi et al., 2001).

Del mismo registro sedimentario se obtuvieron los datos normalizados con Al para definir el Factor de Enriquecimiento (FE), usado en metales como un indicador de la presencia e intensidad de la acumulación de contaminantes por las características de los sedimentos y suelos de la bahía de Tampa (Alexander et al., 1993; Barbieri, 2016; Santschi et al., 2002). La evolución temporal de FE indica que los EPT's han tenido un enriquecimiento moderado desde los años 50's hasta mediados de los 80's (Figura 28-b). Sólo el Pb ha presentado un enriquecimiento significativo en los 70's, relacionado con el mayor auge de producción de automóviles y el uso de gasolinas con plomo en

EUA (Callender, 2003). Esto es comparable con un núcleo en la región de bahía Hillsborough cercano a la descarga del río, que reporta un enriquecimiento moderado de Pb, y Cd (Alexander et al., 1993).

Posterior a la década de los 80's, Ag, Cu y Zn presentan un enriquecimiento mínimo, es decir, los valores son los cercanos a la concentración natural, y sólo Cd y Pb tienen un enriquecimiento moderado. Sin embargo, en los 90's los índices de FE señalan que hay un aumento de la mayor parte de los EPT's (Cd, Cu, Pb y Zn) aunque de forma moderada, como lo muestran también las concentraciones absolutas.

Al comparar las concentraciones absolutas de los EPT's con los valores de referencia de la guía de calidad de sedimentos, así como con los índices de FE, se infiere que en la zona no existen riesgos para la biota bentónica y en general se podría definir como un ecosistema moderadamente saludable (Malloy et al., 2007). Esta estabilidad ambiental se ha logrado a través de la gestión de estuarios urbanos en EUA a principios de la década de 1980 (Duarte et al., 2006) que promovía beneficios regionales de la abundancia y diversidad de los recursos biológicos locales esenciales para el uso sostenible de la bahía. Para ello, se requirió de una regulación más estricta del dragado, gestión de aguas pluviales y legislación estatal para mejorar y actualizar las plantas de tratamiento de aguas residuales que descargan en la bahía o sus afluentes (Ley Grizzle-Figg; Sección 403.086, Estatutos de la Florida).

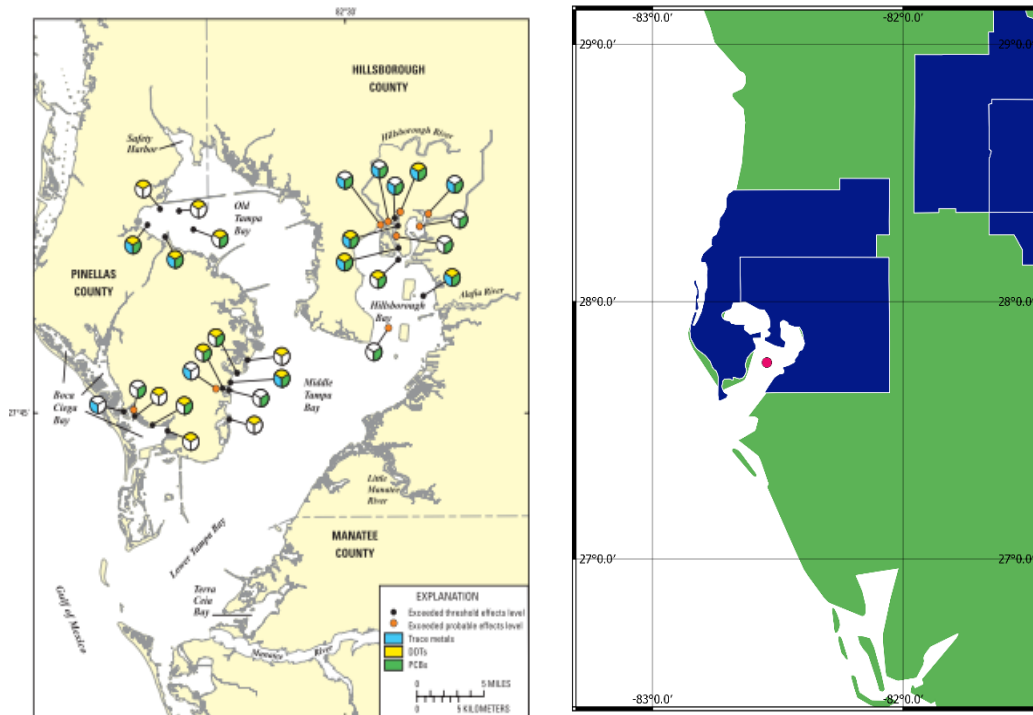


Figura 27. a) Zonificación del litoral de la Bahía de Tampa con zonas de muestra de diversos contaminantes (Zarbock et al., 1996); b) Ubicación del registro sedimentario de la base de datos en Tampa medio, rodeada por una zona urbanas con una población mayor a 1.5 millones de personas (zonificación en azul generada por la OCDE).



Figura 28. a) Concentraciones de los EPT's e índices TEL y PEL. Las unidades están en escala logarítmica con valores de concentración de 0.01 a 100. Las líneas punteadas de colores representan los valores de referencia para TEL y PEL de cada EPT. b) Factor de enriquecimiento de los EPT's.

### 8.1.1.3. Concentraciones máximas y toxicidad

Las concentraciones máximas de EPT's reportadas para la región norte que sobrepasan el límite TEL (Cd, Cu, Pb y Zn) se ubican en las marismas de Luisiana y en el delta del río Misisipi (Tabla 7). En esta zona se reciben las mayores aportaciones de contaminación debido a la agricultura, industria y aguas municipales, ya que las cuencas incluyen cerca del 42% del territorio de EUA. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1989), el 76% de la contaminación que ingresa a los ríos y lagos en los Estados Unidos proviene de fuentes no puntuales, de las cuales la agricultura contribuye con el 64%. Por otra parte, la escorrentía de aguas pluviales, particularmente de áreas urbanas, representa aproximadamente el 60% de las cargas totales de metales, incluidos Cr, Zn, Hg y Pb (Gerold et al., 2002). Es decir, las mayores aportaciones provienen de las actividades urbanas y de fuentes difusas.

En general, los valores de los EPT's Cd, Cu, Pb y Zn sobrepasan al TEL a una profundidad en la columna sedimentaria entre 10 y 30 cm (Tabla 7), lo que puede significar un riesgo para algunos

organismos bentónicos, aunque no se puede determinar con qué frecuencia o severidad suceda (Gerold et al., 2002; Macdonald et al., 1996b). Para ello se requiere el uso de otras herramientas interpretativas como el FE, que ayuden a determinar las posibles fuentes (Schropp et al., 1990) y otras técnicas de bioevaluación *in situ* y en laboratorio (Chapman, 2007; Gerold et al., 2002).

Tabla 7. Valores de concentración máximas (ppm) que sobrepasan índice TEL de la zona Norte. Registros de los archivos sedimentarios del Golfo de México. En color azul se encuentran los valores que sobrepasan el valor TEL.

Localidad	Contaminante	Concentración (ppm)	TEL (ppm)	PEL (ppm)	Profundidad (cm)	Año
Delta río Misisipi	Ag	0.2	0.7	1.8	-	1975
Marismas Luisiana	Cd	2.5	0.7	4.2	19.5	1963
Marismas Luisiana	Cd	2.5	0.7	4.2	10.5	1968
Marismas Luisiana	Cd	2.0	0.7	4.2	28.5	1940
Delta río Misisipi	Cu	27.7	18.7	108	-	1986
Marismas Luisiana	Cu	22.0	18.7	108	7.5	1972
Delta río Misisipi	Pb	36.9	30.2	112	-	1977
Bahía de Galveston	Pb	30.9	30.2	112	-	1962
Delta río Misisipi	Zn	153.8	124	271	-	1970

Las concentraciones de Pb son consistentes con lo reportado en la región ya que, al igual que en la Bahía de Tampa, el punto de inflexión máximo se encuentra entre 1960 y 1970, tiempo en el que se generaron las mayores emisiones de plomo en gasolina (Callender, 2003; Santschi et al., 2002). De la misma manera las concentraciones de Ag, Cd, Cu, Zn presentan un incremento y decremento en ese mismo intervalo de tiempo (Figura 29). Solo un registro de Cd ubicado en las marismas de Luisiana presenta su máximo en 1940, si bien en todo el núcleo no se observa un gradiente de variación significativo de este elemento, por lo que es probable que refleje las concentraciones naturales de la zona (DeLaune et al., 2006). El máximo de Cu en el delta del río Misisipi ocurre en 1986, este máximo puede ser causado por: i) las entradas atmosféricas por la quema de combustibles fósiles, ii) entrada de aguas de residuos urbanos, y iii) desechos de las industrias de cerdo y aves, que producen una gran cantidad de excremento rico en este metal. Efectivamente, el sulfato de cobre y el óxido de zinc son usados en los suplementos alimenticios. A nivel mundial la producción de animales de granja se duplicó a partir de 1980 como demanda de la población (Callender, 2003; Dębski, 2016; FAO, 1990; López Alonso et al., 2000).

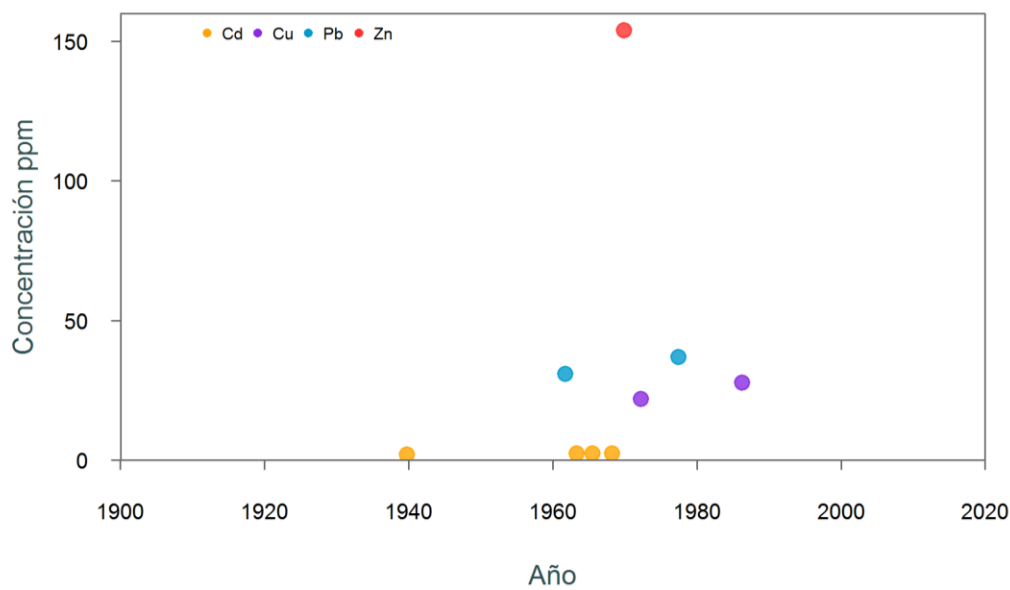


Figura 29. Máximas Concentraciones en la zona LME05 norte de los EPT's Cd, Cu, Pb y Zn que sobrepasan el TEL en función del tiempo.

En cuanto a otros EPT's, es de destacar que no existen registros de Hg. Muy pocos artículos anteriores a 1990 reportaban concentraciones de Hg porque los límites de detección de los instrumentos eran entre 0.01 y 0.05 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que las concentraciones en el ambiente son generalmente menores (Berlin et al., 2015).

#### 8.1.1.4. Normas ambientales

Las normas ambientales de EUA han tenido un claro efecto en la reducción de las concentraciones de los EPT's en la región norte. En promedio, las concentraciones aumentan hasta un máximo entre 1970 y 1980, y muestran una progresiva reducción posterior, en coincidencia con la promulgación e implementación de diversas leyes ambientales.

El 1 de enero de 1970 se firmó la Ley Nacional de Política Ambiental (*NEPA, National Environmental Policy Act*, por sus siglas en inglés), la primera ley ambiental importante en EUA y considerada como la carta nacional básica para la protección del medio ambiente. En esta ley se estableció el Consejo de Calidad Ambiental (*Council on Environmental Quality* por sus siglas en inglés *CEQ*) en la Oficina Ejecutiva del presidente para garantizar que las agencias federales cumplan con sus obligaciones (NEPA, 2019).

En diciembre 1970 se creó por Decreto Presidencial la Agencia de Protección Ambiental (*Environmental Protection Agency* por sus siglas en inglés *EPA*), con la finalidad de regular todas las actividades relacionadas con el medio ambiente. Su obligación principal es establecer e instrumentar estándares, monitorear, dirigir y analizar investigaciones de medidas ambientales para asistir a los estados y municipios en la instrumentación de sus programas de control ambiental (CEQ, 2007).

En cuanto a la protección del medio marino, la EPA regula, a través de la Ley de Protección, Investigación Marina y de Santuarios y la Ley de Manejo de la zona Costera (*Coastal Zone Management Act of 1972*), la emisión de residuos al mar. Posterior a la creación de la EPA se promulgaron nuevas leyes y normativas que tendrían efectos inmediatos en las concentraciones de los EPT's.

- En 1973 la EPA emitió una regulación para la reducción del plomo en la gasolina.
- En 1976 se firmó la Ley de Control de Sustancias Tóxicas para reducir los riesgos ambientales y para la salud, con la que se pretendía reducir los productos químicos sintéticos y orgánicos en los productos de consumo y el medio ambiente.
- En 1988, el Congreso prohibió el vertido al mar de lodos de plantas de tratamiento y desechos industriales.

Además, cada estado posee sus propias leyes en función de las necesidades locales y/o regionales.

#### **8.1.1.5. Programas de monitoreo ambiental**

A nivel regional y estatal existen planes de conservación que dependen de las características del lugar. En la bahía de Tampa la legislación estatal impulsó mejoras en las prácticas municipales de tratamiento de aguas residuales que redujeron las descargas de nutrientes a la bahía a través del Plan Integral de Conservación y Manejo en 1996. En estos programas se describen los planes de acción para abordar las prioridades ambientales a través de la asociación y la participación comunitaria, así como los mecanismos para aprovechar el recurso bajo un enfoque de gestión que ha permitido mejoras en el ecosistema (Yates & Greening, 2011).

Los programas incluyen esfuerzos de monitoreo y mapeo en agencias federales, estatales y locales, universidades, industria privada y organizaciones no gubernamentales. Las agencias científicas federales como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), han generado la mayor parte de la información para GdM (NOAA & USGS, 2019). Esta información ha servido para ubicar las fuentes y los problemas ambientales causados por los EPT's a través de reportes anuales que sirven de base para que la EPA genere nuevas normas ambientales.

#### **8.1.1.6. Tendencias de Estados Unido de América**

Para la región norte, se observa un aumento de la contaminación por los EPT's desde antes del siglo XX y es hasta 1920 - 1930 cuando se registra una disminución significativa de las concentraciones Cd, Cu y Zn, que se relaciona con la Gran Depresión, un largo periodo de crisis financiera que inicio en 1929 y duró una década (Marini, 1977).

A partir de la segunda guerra mundial existe un aumento en la población y mayor desarrollo económico reflejado en el incremento de contaminación de Ag, Cd, Cu, Pb, Zn. El primer máximo de estos metales se ubica en el intervalo de tiempo entre los 60's y 70', posteriormente se observa una disminución progresiva que llega hasta la actualidad. Esto está claramente relacionado con la aparición la NEPA en el año 1970 y las consecuentes normas que de ella emanan. También se debe considerar la aparición a finales de los 60's del movimiento ambientalista en EUA, el cual ejercía un

activismo cultural en la concientización de la sociedad para proteger los recursos naturales y disminuir la contaminación ambiental (Figura 30) (Dunlap & Mertig, 1991). En cuanto a la Ag, conocido como indicador de fuentes urbanas de contaminación, muestra un pico en los 80's y posteriormente disminuye la concentración, posiblemente vinculado a la mejora en la gestión de las plantas de aguas residuales urbanas.

A diferencia de los otros EPT's, el Zn no presenta una tendencia reciente significativa, si bien la curva muestra una forma acorde con la de otros EPT's. Datos de emisiones atmosféricas indican que este elemento ha incrementado su concentración desde 1950 hasta la década de los 90's. Este hecho está relacionado con la incineración de llantas, que incluyen un 1 % por Zn. También se ha observado que este elemento se puede encontrar adherido en las superficies de las carreteras como consecuencia de la abrasión del neumático al contacto. Dicho material puede ser transportados a las cuencas hidrográficas por la lluvia, por lo que se trata de una fuente difusa que puede llegar hasta las zonas marinas (Callender, 2003).

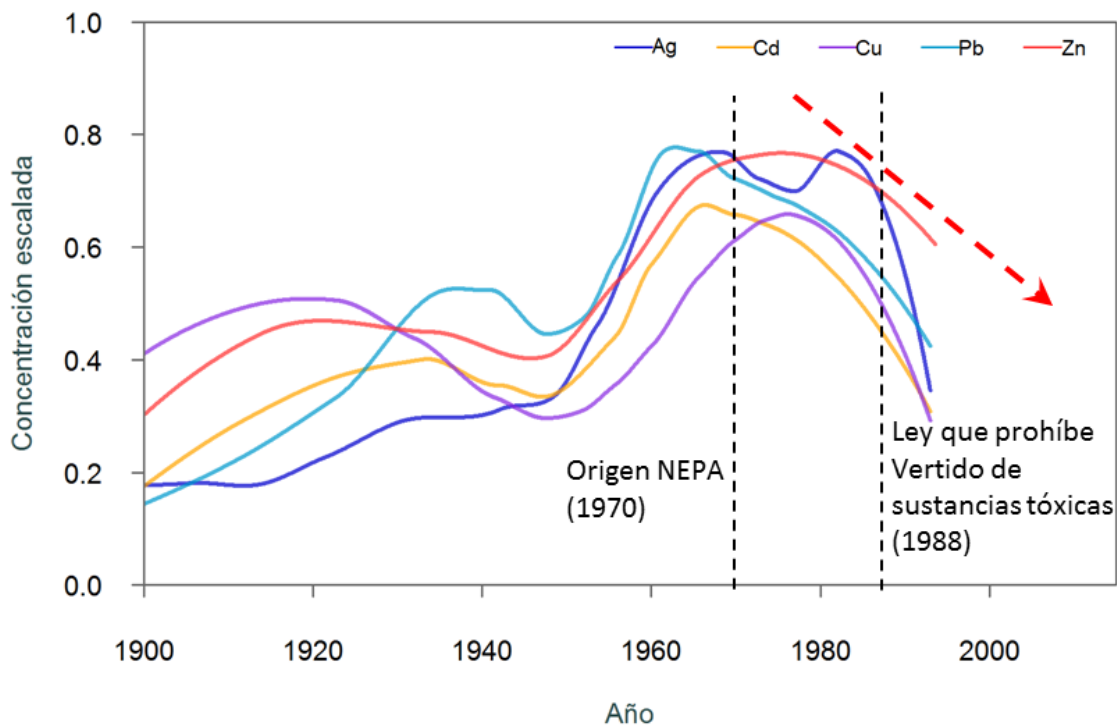


Figura 30. Tendencias de contaminación en la región norte y su relación con las normas ambientales de EUA.

Para el caso de Cd y Cu se sabe que el 70% y 50% de las concentraciones antropogénicas provienen de la industria minera y de fundición de metales. Sin embargo, en la zona del GdM se deduce que estas las aportaciones pueden ser por otra fuente, ya que la mayor cantidad de producción minera se encuentra en la región oeste de EUA, y sólo en la región de Texas se encuentran algunas áreas dedicadas a esta actividad que podrían aportar concentraciones relevantes en la zona marina. Por eso se propone que las fuentes de estos elementos puedan ser la industria de fundición de metales o recubrimientos metálicos.



## **8.1.2. Región Sur (México)**

### **8.1.2.1. Historia social y económica de la región**

Los primeros grupos que se desarrollaron en América basaron su modo de producción en la agricultura y la caza, los cuales proveían de las principales necesidades básicas a su población. En México, durante la época colonial, España dirigió el desarrollo basado inicialmente en actividades agrícolas, y en el periodo colonial tardío en las mineras. Los metales con mayor producción en esa época fueron la plata y el oro, por la demanda del mercado externo que influyó significativamente en la balanza comercial (Ibarra, 2010).

México, al igual que los demás países latinoamericanos, ha logrado un desarrollo económico y tecnológico tardío. A principios del siglo XIX aparecieron las primeras industrias para la producción textil de lana y algodón, llevadas a cabo en unidades de talleres artesanales o domésticos, a diferencia de EUA que lo realizó un siglo antes (Sánchez-Santiró, 2010). Durante la independencia, la economía evolucionó conforme a la situación política del país. Al principio las actividades agrícolas seguían siendo las más importantes, mientras que la minería se estancó. A mediados del siglo XIX se impulsó la economía a través de inversiones de capital extranjero (EUA y Gran Bretaña) que logró la modernización de la infraestructura energética, la cual ayudó a fortalecer el comercio exterior. Este hecho provocó que a finales del siglo se agilizará la industria pesada, que fue financiada principalmente por EUA, país que ha moldeado la economía a nivel global (Benítez-Zenteno, 1972; Womack, 2012).

En la década de 1910, durante el periodo revolucionario, la crisis económica produjo el colapso de los mercados y trajo como consecuencia un desarrollo más lento o con fuertes altibajos. A principios de esta década la producción e inversión se estancó por la inflación, malas políticas agrícolas, el agotamiento generalizado de los recursos naturales y la erosión del suelo, causando un deterioro salarial agravado por el crecimiento de la población de forma abrupta (Ficker, 2010b; Myers et al., 1987).

Desde primera Guerra Mundial, México se convirtió en uno de los mercados más importantes para las manufacturas, debido a que muchas naciones requerían de materia prima y para sus ejércitos y población. En los años veinte, México alcanzó un desarrollo social y económico fructífero, acompañado por una tendencia poblacional al aumento (Figura 31). La migración del campo a la ciudad se aceleró, y con ello el crecimiento demográfico en las áreas urbanas que fue esencial para la mejora de la economía nacional, ya que la nueva población requería de bienes y servicios en mayor cantidad y en menor tiempo, por lo que se requería de mayor producción industrial y desarrollo de urbanización (Vaz da Costa, 1970). A mediados de la década México aportaba una cuarta parte de la producción a nivel mundial del petróleo (Ficker, 2010a; Riguzzi, 2010).

En 1929 la gran depresión capitalista provocó una crisis mundial que también afectó a México debido a que EUA, principal inversionista, disminuyó las relaciones comerciales (Riguzzi, 2010). Para 1933 los efectos de la depresión económica mundial habían empezado a desaparecer: el crédito y el gasto público habían aumentado, y el intercambio con el exterior mejoró. Las plantas industriales creadas durante el porfiriato, las nuevas fábricas de productos químicos, alimentos y otros bienes

de consumo, y una nueva planta ensambladora de automóviles de capital extranjero, permitieron a México reestructurar su economía y convertirse en un país industrializado o en proceso de modernización a través del modelo de sustitución de importaciones, es decir, la disminución de componentes importados para sustituirlos por productos producidos nacionalmente (Ficker, 2010a).

Durante la etapa Cardenista (1934-1940), que se caracterizó por la defensa de la soberanía nacional, se realizaron obras importantes de infraestructura en el sector agrícola y energético, en particular del petróleo. El propósito estratégico fue una industrialización en fases, iniciando por los bienes de consumo no durable, bienes intermedios ligeros, hasta los bienes de consumo durable, bienes intermedios pesados y bienes de capital (Ficker, 2010b).

En la década de los años cincuenta hasta 1962 la economía mexicana experimentó un fuerte crecimiento a través de la agricultura y la industria manufacturera (Figura 31). Asimismo surgieron industrias de bienes intermedios y de capital, como las industrias de sustancias químicas, derivados del petróleo, caucho y plástico, abonos y fertilizantes, productos farmacéuticos, jabón, detergentes y cosméticos que representarían un porcentaje significativo, de más del 30 % del total del PIB nacional (Cárdenas, 2010).

Para 1970 la población duplicó en comparación con la década de los 50's, con tendencia a un aumento acelerado en las zonas urbanas. En 1976 surgió una de las mayores crisis económicas del país, caracterizada por la inflación, estancamiento en el crecimiento del PIB, y una deuda exterior voluminosa y creciente, que se controló a finales de la década cuando se descubrieron enormes yacimientos de petróleo en la zona de Cantarell. Esto fue la salvaguarda para la economía mexicana, ya que la expansión del sector petrolero impulsó otros sectores de la economía como la agricultura y otras industrias que se reforzaron a través del Plan Nacional de Desarrollo Industrial con los ingresos petroleros extraordinarios, para impulsar al país a una nueva etapa de crecimiento industrial, en específico la industria pesada que se encarga de la extracción y transformación de la materia prima (Cárdenas, 2010).

La crisis de deuda de 1982 marcó el término del periodo de expansión productiva, y a partir de entonces devinieron reformas estructurales que hicieron transitar a los países latinoamericanos de una estrategia de desarrollo basada en la industrialización a otra donde el motor de crecimiento es la inversión extranjera directa (IED) por medio de las empresas multinacionales o transnacionales. Las reformas incluyeron la firma acuerdos internacionales como el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, y otros tratados comerciales más que sirvieron para que México se integrará a la estrategia del nuevo modelo de economía global (Cárdenas, 2010).

Cuando entró en vigor el TLCAN las empresas transnacionales dominaban la economía nacional: entre el 50% y 55% de la producción industrial, el 35% al 40% del comercio, y algunas ramas estratégicas como la químico-farmacéutica, la procesadora de alimentos y la fabricación de maquinaria, mostraban la virtual ausencia de empresas nacionales (CEPAL, 2015).

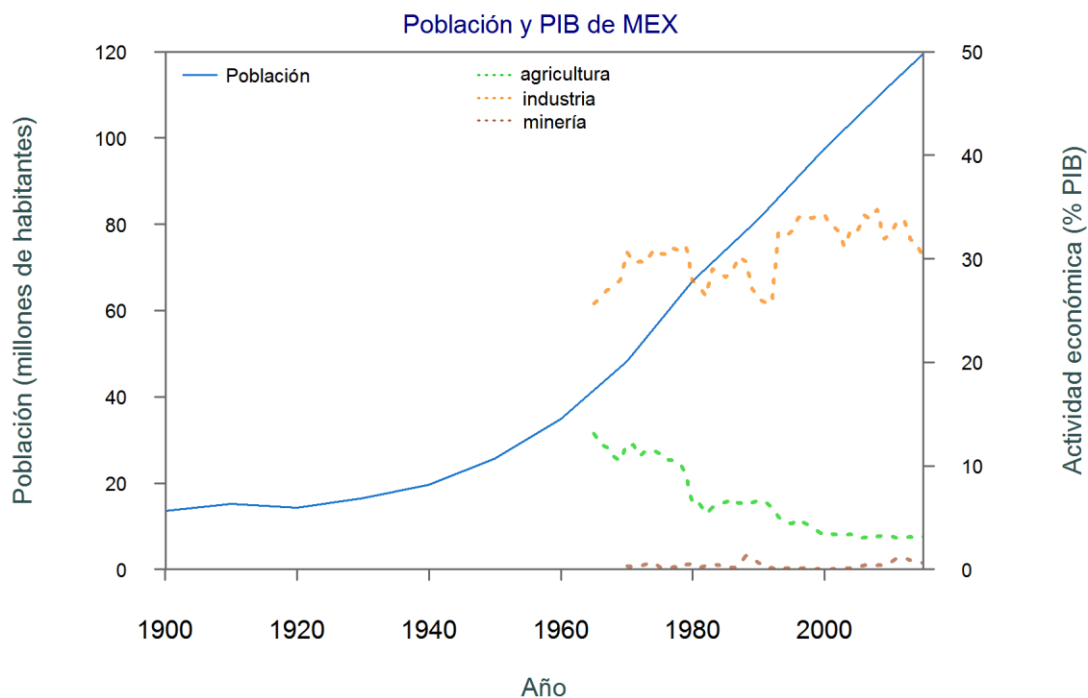


Figura 31. Población y actividad económica (agricultura, industria y minería). Mientras la agricultura disminuye dentro del porcentaje total del PIB, la industria tiende a un aumento a partir de los 80's. La minería sigue constante. Fuente: Banco mundial (<https://datos.bancomundial.org/>)

#### 8.1.2.2. Concentraciones máximas y toxicidad

##### TEL

Son 46 las concentraciones de EPT's (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Zn) que sobrepasan el TEL, en algunos casos hasta en un factor cinco. Estas concentraciones se encuentran ampliamente distribuidas en la zona costera del GdM (Tabla 8, Figura 32) a profundidades en la columna sedimentaria de 0 a 40 cm (Figura 32). Sin embargo, sobre este nivel umbral rara vez se presentan efectos adversos sobre la biota bentónica (Edokpayi et al., 2016; Long et al., 1995; Macdonald et al., 1996b).

##### Cu

En la región sur un total de 16 concentraciones de Cu sobrepasan el TEL, una de ellas es cinco veces mayor, y se encuentra a una profundidad de 20 cm. Esta concentración pertenece a un núcleo recolectado en Laguna Salada, Veracruz, localidad cercana a de la Central Nuclear de Laguna Verde, la cual recibe las aguas de refrigeración de esta planta. Sin embargo, el  $^{210}\text{Pb}$  indica que esto ocurrió sobre 1958, anterior al inicio de la construcción de la Central (OIEA, 1980). Otras posibles fuentes de Cu en la zona podrían ser la minería (Bojórquez-Sánchez et al., 2017) o la agricultura.

Durante la llamada "Revolución verde" de los años 50's los gobiernos latinoamericanos, incluido México, favorecían una agricultura comercial que requería una explotación intensiva con ayuda de fertilizantes químicos, pesticidas y herbicidas, los cuales contienen una gran cantidad de metales

entre los que sobresale el Cu (p.e. oxiclورو de cobre y sulfato de cobre) (Brambila, 1975; Tiezzi, 2008; Toro, 1995).

#### *Cd y Cr*

Para el Cd y Cr, superan el TEL en 2 y 11 de las concentraciones, respectivamente (Tabla 8). Los valores más altos sobrepasan en 2 y 4 veces el límite TEL y se ubican en el área de Atasta-Ciudad del Carmen en Campeche. Sin embargo, estos valores no están alejados de las concentraciones en la zona y los valores de la base de los núcleos, por lo que se consideran concentraciones dentro del rango natural, probablemente debido a filtraciones activas de petróleo natural en el área (Ruiz-Fernández et al., 2019).

#### *Hg*

A diferencia de la región norte, en México se han reportado concentraciones de Hg, las cuales sobrepasan 2 veces el TEL en 1999 a una profundidad de 5 cm. Este núcleo procede de la zona de Coatzacoalcos, donde se encuentran las mayores petroquímicas del México, que podrían ser origen de las anomalías. La primera refinería se estableció en 1906 y en los 50's se desarrolló ampliamente la industria petroquímica con i) el Complejo Petroquímico (CPQ) Pajaritos instalada en 1967, ii) el CPQ Cosoleacaque en 1971 y iii) el CPQ Cangrejera en 1980 (Casado-Izquierdo & Sánchez-Salazar, 2013; Sánchez-Salazar et al., 1999).

*Tabla 8. Concentraciones máximas (ppm) de los EPT's que sobrepasan los límites TEL en la región sur del Golfo de México.*

Localidad	EPT	Promedio	Min	Max	SD	CV (%)	TEL	Max/TEL	Prof. (cm)	Año
Sonda de Campeche	Cd	0.07	0.2	0.7	0.3	126	0.68	1.0	3.2	1963
<b>Campeche</b>	<b>Cd</b>	<b>2.0</b>	<b>2.2</b>	<b>3.0</b>	<b>0.4</b>	<b>16</b>	<b>0.68</b>	<b>4.4</b>	<b>15.8</b>	<b>1932</b>
Coatzacoalcos, Ver.	Cr	29.2	49.2	92.0	13.5	27	52.3	1.8	24.5	1959
Tamaulipas	Cr	36.0	43.0	56.0	4.8	11	52.3	1.1	17.0	1991
Tamaulipas	Cr	52.0	57.1	63.0	3.1	5	52.3	1.2	5.0	1995
Campeche	Cr	77.8	81.1	84.4	2.5	3	52.3	1.6	1.1	1982
Tabasco	Cr	47.8	55.8	64.9	3.5	6	52.3	1.2	10.3	1946
Tabasco	Cr	67.4	73.7	86.7	4.4	6	52.3	1.7	10.3	1939
Veracruz	Cr	52.4	65.0	71.4	4.5	7	52.3	1.4	5.1	1980
Tamaulipas	Cr	48.5	56.3	63.6	4.8	8	52.3	1.2	2.5	1981
Veracruz	Cr	41.0	50.2	55.2	3.8	8	52.3	1.1	6.5	1971
Veracruz	Cr	47.0	51.8	55.1	2.8	5	52.3	1.1	9.3	1902
Veracruz	Cr	49.5	54.3	57.7	2.6	5	52.3	1.1	5.3	1954
<b>Campeche</b>	<b>Cr</b>	<b>123.2</b>	<b>130.3</b>	<b>133.7</b>	<b>2.6</b>	<b>2</b>	<b>52.3</b>	<b>2.6</b>	<b>17.8</b>	<b>1909</b>
Coatzacoalcos, Ver.	Cu	14.8	21.4	30.2	5.2	24	18.7	1.6	7.5	1996
Laguna Salada, Ver.	<b>Cu</b>	<b>49.4</b>	<b>69.8</b>	<b>103.0</b>	<b>11.3</b>	<b>16</b>	<b>18.7</b>	<b>5.5</b>	<b>20.0</b>	<b>1958</b>
Laguna Salada, Ver.	Cu	21.2	54.3	90.9	19.9	37	18.7	4.9	16.0	1952
Tabasco	Cu	26.0	30.0	34.5	1.9	6	18.7	1.8	5.5	1964

Localidad	EPT	Promedio	Min	Max	SD	CV (%)	TEL	Max/TEL	Prof. (cm)	Año
Tabasco	Cu	32.6	34.5	38.3	1.2	3	18.7	2.0	10.3	1939
Veracruz	Cu	30.8	35.3	40.7	1.8	5	18.7	2.2	5.5	1979
Tamaulipas	Cu	32.4	34.5	37.6	1.8	5	18.7	2.0	7.3	1900
Veracruz	Cu	34.5	35.9	38.1	0.9	2	18.7	2.0	0.3	2014
Veracruz	Cu	31.3	35.1	36.4	1.5	4	18.7	1.9	9.3	1902
Veracruz	Cu	24.0	26.2	30.0	1.6	6	18.7	1.6	0.3	2014
Campeche	Cu	29.7	31.2	32.5	0.9	3	18.7	1.7	0.3	2010
Campeche	Cu	20.6	23.6	26.1	1.3	6	18.7	1.4	10.3	2006
Campeche	Cu	23.8	25.4	26.6	0.7	3	18.7	1.4	17.8	1909
Campeche	Cu	15.4	18.1	20.6	1.8	10	18.7	1.1	4.3	2005
Campeche	Cu	16.7	18.5	20.3	1.2	6	18.7	1.1	0.3	2016
Campeche	Cu	19.1	21.6	26.4	2.7	13	18.7	1.4	0.3	2016
<b>Coatzacoalcos, Ver.</b>	<b>Hg</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.1</b>	<b>38</b>	<b>0.13</b>	<b>2.2</b>	<b>5.5</b>	<b>1999</b>
Coatzacoalcos, Ver.	Ni	18.0	25.5	34.9	4.6	18	15.9	2.2	0.5	2008
Veracruz	Ni	9.7	13.3	19.0	2.9	22	15.9	1.2	2.0	2002
Tamaulipas	Ni	10.0	14.5	18.0	2.6	18	15.9	1.1	3.0	1979
Tamaulipas	Ni	14.0	17.5	21.0	2.1	12	15.9	1.3	23.0	1988
Tamaulipas	Ni	11.0	14.9	18.0	2.0	14	15.9	1.1	1.0	1993
Tamaulipas	Ni	20.0	22.9	25.0	1.5	7	15.9	1.6	15.0	1980
Sonda de Campeche	Ni	22.7	24.0	25.9	1.3	5	15.9	1.6	7.1	1928
<b>Tamaulipas</b>	<b>Ni</b>	<b>33.7</b>	<b>37.7</b>	<b>40.9</b>	<b>2.3</b>	<b>6</b>	<b>15.9</b>	<b>2.6</b>	<b>2.1</b>	<b>1988</b>
Veracruz	Ni	16.9	34.6	40.5	8.1	23	15.9	2.5	2.9	1973
Veracruz	Ni	16.3	31.9	39.4	7.5	24	15.9	2.5	5.3	1954
Campeche	Ni	26.0	27.2	28.6	1.0	4	15.9	1.8	2.9	1954
Campeche	Ni	13.0	14.2	18.0	1.9	14	15.9	1.1	0.3	2016
Campeche	Ni	16.7	20.2	24.5	3.1	16	15.9	1.5	0.3	2016
<b>Laguna Salada, Ver.</b>	<b>Zn</b>	<b>75.9</b>	<b>94.7</b>	<b>133.0</b>	<b>10.3</b>	<b>11</b>	<b>124</b>	<b>1.1</b>	<b>39.0</b>	<b>1905</b>

El desarrollo petrolero de la región de Coatzacoalcos derivó en un explosivo crecimiento demográfico inducido por la inmigración requerida como mano de obra, causando la duplicación de las tasas de crecimiento entre 1950 y 1960, y la triplicación entre 1970 y 1990. Este auge demográfico trajo consigo la expansión de superficies construidas para la población, que emergió de forma caótica y desordenada hacia el poniente de la mancha urbana preexistente, en las cercanías del río Coatzacoalcos (Casado-Izquierdo & Sánchez-Salazar, 2013).

Las altas concentraciones de Hg se han atribuido al vertido de residuos industriales y urbanos no tratados que son liberados al río, así como a descargas ex profeso y accidentes recurrentes por derrames de hidrocarburos, sin embargo la mayor parte estos valores son debidos al cambio de uso de suelo, generado para la urbanización y construcción de las petroquímicas, lo que ha tenido como consecuencia la erosión y escorrentía de los suelos contaminados hacia el medio acuático (Ruiz-Fernández et al., 2012).

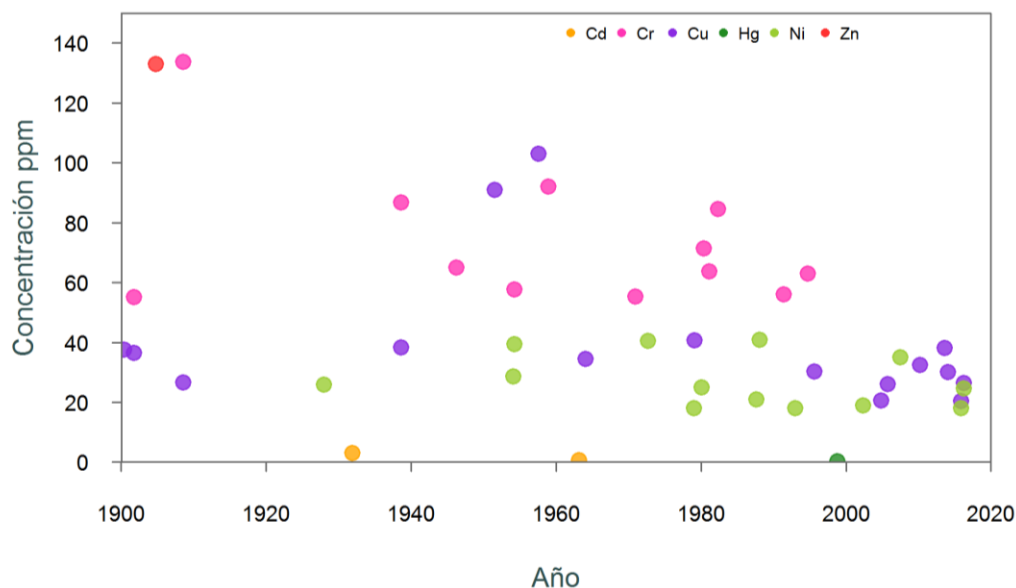


Figura 32. Concentraciones de Cd, Cr, Cu, Hg y Zn que sobrepasan el TEL, a profundidades entre 1 y 40 cm, a lo largo de la zona costera del Golfo de México, región sur.

PEL

Las 16 concentraciones que sobrepasan el PEL (Cd: 3, Cr: 4, Ni: 9) están distribuidas desde Veracruz hasta Campeche, y son entre 1 y 2 veces el valor de referencia, desde una profundidad de entre 3 y 20 cm (Tabla 9, Figura 33). Esto significa que se espera que frecuentemente se presenten efectos en la biota bentónica en estas zonas (Macdonald et al., 1996b; MacDonald et al., 2004; Mann & Chapman, 1999).

Tabla 9. Concentraciones máximas (ppm) de los EPT's que sobrepasan los límites PEL en la región sur del Golfo de México.

Localidad	EPT	Promedio	Min	Max	SD	CV (%)	PEL	Max/PEL	Prof. (cm)	Año
Campeche	Cd	3.5	2.2	6.6	1.4	40	4.21	1.6	12.8	2003
<b>Campeche</b>	<b>Cd</b>	<b>6.3</b>	<b>2.5</b>	<b>10.3</b>	<b>2.6</b>	<b>41</b>	<b>4.21</b>	<b>2.4</b>	<b>13.3</b>	<b>1925</b>
Campeche	Cd	4.0	2.0	5.7	1.3	33	4.21	1.4	10.3	1977
Laguna Salada, Ver.	Cr	128.3	96.7	189.0	17.4	14	160	1.2	3.0	2005
Laguna Salada, Ver.	Cr	94.3	52.5	165.0	17.6	19	160	1.0	0.0	2013
<b>Isla del Carmen, Camp.</b>	<b>Cr</b>	<b>291.8</b>	<b>240.0</b>	<b>353.0</b>	<b>31.1</b>	<b>11</b>	<b>160</b>	<b>2.2</b>	<b>11.0</b>	<b>1956</b>
Campeche	Cr	158.6	130.4	213.0	20.9	13	160	1.3	9.8	2006
Laguna Salada, Ver.	Ni	66.0	46.9	92.9	9.0	14	42.8	2.2	35.0	1916
Laguna Salada, Ver.	Ni	56.8	27.4	85.8	14.7	26	42.8	2.0	16.0	1952
Campeche	Ni	70.2	63.8	79.2	7.4	11	42.8	1.9	9.1	1910
Tabasco	Ni	41.8	29.9	59.8	7.6	18	42.8	1.4	5.5	1964
Tabasco	Ni	56.8	48.4	74.4	6.6	12	42.8	1.7	10.3	1939

Localidad	EPT	Promedio	Min	Max	SD	CV (%)	PEL	Max/PEL	Prof. (cm)	Año
Veracruz	Ni	45.3	34.3	55.6	4.5	10	42.8	1.3	19.8	1944
Veracruz	Ni	37.9	32.3	44.5	3.1	8	42.8	1.0	13.3	1946
Campeche	Ni	75.6	55.0	104.4	11.0	15	42.8	2.4	9.3	2007
<b>Campeche</b>	<b>Ni</b>	<b>96.0</b>	<b>86.9</b>	<b>120.8</b>	<b>12.1</b>	<b>13</b>	<b>42.8</b>	<b>2.8</b>	<b>8.8</b>	<b>1974</b>

### *Cd*

El valor más alto del Cd se ubica en la zona de Campeche, al sureste de la Isla Arena, en el área de manglares dentro de la Reserva Natural de Petenes, a una profundidad de 13 cm. Esta concentración se encuentra en la parte basal del núcleo estudiado y el fechado indica que ocurrió en 1925 (Ruiz-Fernández et al., 2019), antes de la construcción de la infraestructura petrolera en la sonda de Campeche, que comenzó su actividad en 1979 (Romo, 2015). Debido a sus propiedades geoquímicas, el Cd es sensible a las condiciones redox del sedimento (Zhang et al., 2014), por lo que es probable que la presencia de máximos de este elemento sea debida a su migración vertical en la columna sedimentaria y su precipitación en zonas anóxicas (Gobeil et al., 1987). Muy probablemente los niveles observados son debidos a procesos naturales.

### *Cr*

En La Laguna de Términos, frente a la Isla del Carmen, se observa la mayor concentración de Cr, que sobrepasa en un factor 2 el PEL a una profundidad de 11 cm (año 1956). En esta localidad, la población en 1950 era de 23,999 personas. Se trataba de un centro urbano que basaba su economía en actividades como la pesca y extracción de resinas de forma artesanal (SEN, 1930) que no son fuente de este elemento. Desde 1940 se inició la construcción de la carretera federal 180, que comunicaba a la isla con las otras zonas de Campeche. Esta construcción generó una barrera que afectó la hidrodinámica natural y provocó una acumulación sedimentos finos de origen terrígeno (Madrid et al., 2018), enriquecido en Cr y probablemente otros metales.

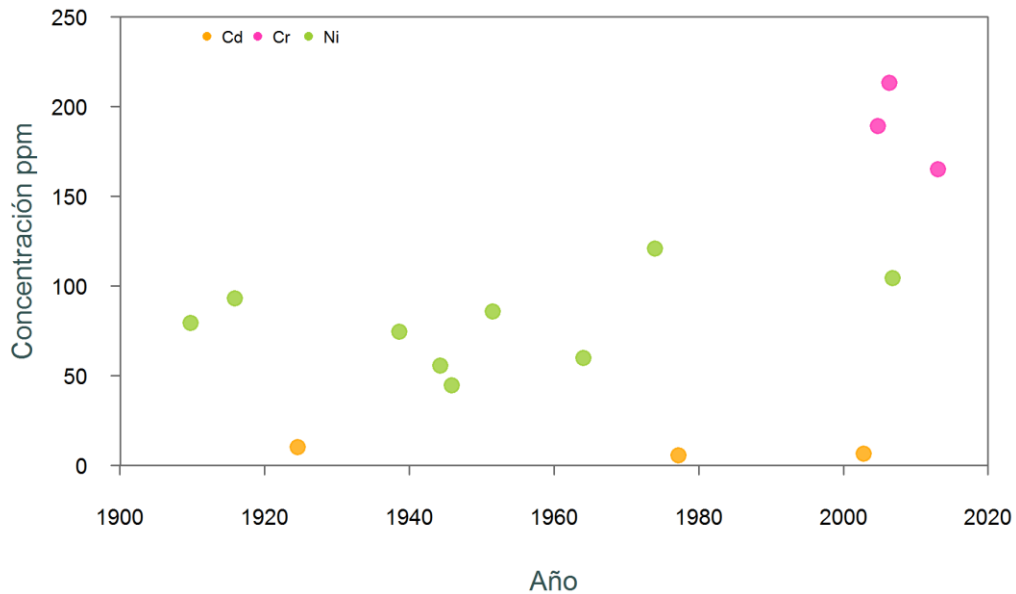


Figura 33. Concentraciones de Cd, Cr, y Ni que sobrepasan el PEL a profundidades de entre 1 y 40 cm, a lo largo de la zona costera del Golfo de México.

#### Ni

La máxima concentración del Ni sobrepasa 2.8 veces el PEL y se ubica en las cercanías del pozo de perforación Ixtoc-I, a una profundidad 8.8 cm (1974). Las actividades petroleras en esta zona iniciaron formalmente 1979, por lo que podrían ser la causa del nivel observado. Sin embargo, no se presenta gran variabilidad a lo largo de la columna sedimentaria por lo que los niveles son probablemente de origen natural, debido a aportes minerales ricos en Ni, o incluso el impacto crónico de emanaciones naturales de hidrocarburos líquidos conocidos como "chapopoterías" (Romo, 2015). La zona geológica donde se ubica el núcleo se caracteriza por altos contenidos en carbonatos (Ruiz-Fernández et al., 2019), que tienen la capacidad de retener materia orgánica e hidrocarburos (Hunt, 1967), por lo que los altos niveles de Ni podrían ser derivados del petróleo crudo (Lewan & Maynard, 1982).



### Vulnerabilidad

Los EPT's que sobrepasan el PEL pueden causar frecuentemente efectos a la biota bentónica, y los que superan en TEL pueden hacerlo ocasionalmente (EPA, 1997; Juracek, 2004). Del análisis se desprende que en la región sur existen áreas sensibles a los daños causados por EPT's y en algunos casos los riesgos son debidos a la presencia de dos o más EPT's (Burton, 2002; Juracek, 2004). En todas las zonas identificadas se recomienda algún tipo de monitoreo especial que permita regular y proteger de forma más estricta estas zonas. Debido a la presencia de algunos EPT's con más de dos concentraciones > PEL, se sugiere una vigilancia especial Laguna Verde, Veracruz, y Nuevo Progreso, Campeche (Figura 34). Para un mejor análisis en las concentraciones que rebasan el TEL o PEL, pero con poca variabilidad dentro del registro sedimentario, se propone que se realice un estudio de la biota bentónica de la región, ya que pueden existir falsos-positivos y falsos-negativos que resulten o no en efectos adversos, como se ha demostrado en diversos casos (Burton, 2002; Long et al., 1998; Mann & Chapman, 1999).

Tabla 10. Zonas de la región sur del Golfo de México que sobrepasan el nivel TEL y PEL

Ubicación	TEL<EPT'S<PEL				EPT'S>PEL	
Coatzacoalcos, Ver.	Cr	Cu	Hg	Ni		
Atasta-Ciudad del Carmen, Campeche	Cd	Cr	Cu		Ni	
Alvarado, Veracruz	Cr	Cu	Ni			
Nautla-Laguna Verde, Veracruz	Cr	Cu	Ni			
Laguna Madre y Delta del río Bravo, Tamaulipas	Cr	Cu	Ni			
Sonda de Campeche	Cd	Ni				
Frente a Catemaco, Veracruz	Cr	Cu			Ni	
Tampico, Tamaulipas	Cr	Ni				
Tampico, Tamaulipas	Cr	Ni				
Frontera, Tabasco	Cr	Cu			Ni	
La Venta, Tabasco	Cr	Cu			Ni	
Tuxpan, Veracruz	Cr	Cu			Ni	
Campeche, Campeche	Cu	Ni				
Petenes, Campeche	Cu	Ni			Cd	
Laguna Salada, Veracruz	Cu	Zn			Cr	Ni
Petenes, Campeche	Cu	Ni			Cd	
Paraiso, Tabasco	Cr				Ni	
Laguna Salada, Veracruz	Cu				Cr	Ni
Petenes, Campeche	Cu					
Nuevo Progreso, Campeche	Cu				Cd	Cr Ni
Laguna de Tamiahua, Campeche	Ni					
Tampico, Tamaulipas	Ni					
La Antigua, Veracruz	Ni					
Isla del Carmen, Campeche					Cr	

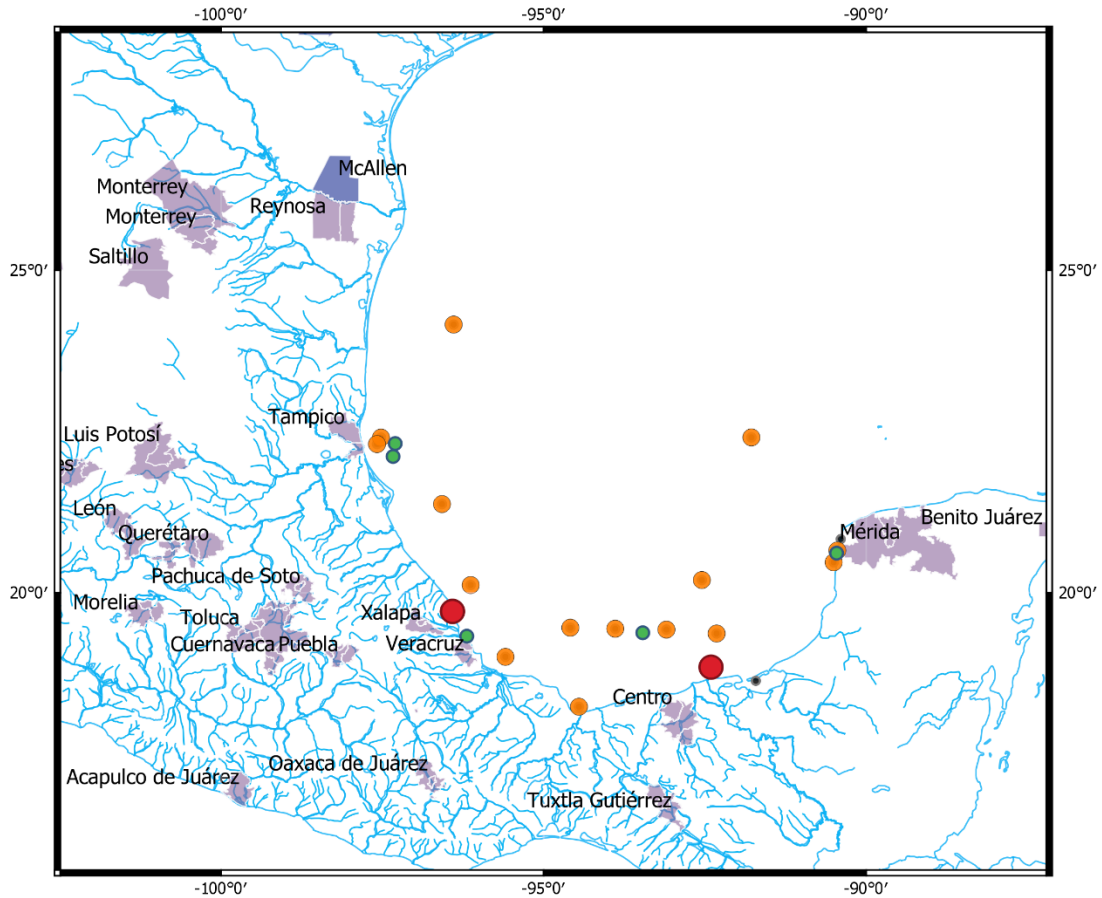


Figura 34. Zonas vulnerables a concentraciones de los EPT's. En verde, zonas poco vulnerables, donde sólo un EPT sobrepasa el límite TEL. En naranja, zona moderadamente vulnerable, ya que existen más de 2 EPT's que sobrepasan el límite TEL. En rojo, zona altamente vulnerable, ya que más de dos concentraciones sobrepasan el límite PEL.

### 8.1.2.3. Normas ambientales

A diferencia de EUA, México incorporó las primeras normas ambientales en 1971, en el artículo 73 fracción XVI de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Ésta se centró en garantizar la seguridad y sobrevivencia del ser humano, por lo que fue competencia del Consejo de Salubridad General, con supervisión del Congreso de la Unión (DOF, 2020; Soberanes & Treviño, 1997). En marzo de ese mismo año se promulgó la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación, cuya administración estaba a cargo de la Secretaría de Salubridad y Asistencia. Esta contenía tres reglamentos:

1. Reglamento para la Prevención y el Control de la Contaminación Atmosférica originada por la Emisión de Humos y Polvos (17 de septiembre de 1971).
2. Reglamento para la Prevención y el Control de la Contaminación de las Aguas (29 de marzo de 1973).

3. Reglamento para la Prevención y el Control de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias (23 de enero de 1979).

El tercer reglamento generado para la prevención y control de la contaminación del mar señala que la Secretaría de Marina es la autoridad competente para el ejercicio de todas y cada una de las funciones contenidas en el “Convenio Internacional para la Prevención de contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias”, también conocido como convenio de Londres, que señala la prohibición del vertimiento de determinados materiales potencialmente peligrosos (OMI, 2020). Entre los elementos que menciona el Reglamento (anexo II) se encuentran el Cu, Pb, Ni, V y Zn. En el artículo 12 se resalta que para otorgar un permiso de vertimiento, la autoridad competente deberá tomar en cuenta el dictamen sanitario de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, y en algunos casos podría consultar la opinión de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, así como otras instituciones o dependencias (DOF, 1979).

En 1982 la Ley Federal de Protección Ambiental abrogó la ley de 1972, y 6 años después la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) reemplazaría a ambas para convertirse en el principal instrumento jurídico que en la actualidad sigue vigente (Soberanes & Treviño, 1997). La LGEEPA, reformada en 1996, otorgaba las atribuciones al Poder Ejecutivo Federal a través de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP, creada en 1994), de modo que la Secretaría de Defensa Nacional y de Marina solo serían un apoyo cuando por la naturaleza o gravedad de un problema se le determinará alguna función (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

En 1986 se promulgó la Ley Federal del Mar la cual dedica su capítulo IV a la Protección y Preservación del Medio Marino y de la Investigación Científica Marina. En su artículo 21, señala que para prevenir, reducir y controlar la contaminación del medio marina se aplicarían la Ley Federal de Protección al Ambiente, La Ley General de Salud y sus reglamentos, la Ley Federal de Aguas, así como normas pertinentes del derecho internacional, como la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del mar (publicada en 1982).

Los avances de las leyes mexicanas han sido más lentos que en otras naciones. Las primeras legislaciones dejaban la responsabilidad en dependencias que no fueron creadas para temas ambientales, por lo que en muchos casos omitían el tema de la contaminación para atender otras necesidades. Fue a partir de la promulgación de la LGEEPA que la protección ambiental tomó mayor relevancia en todos los niveles políticos. En el artículo 5° se establece que la Federación tiene las facultades para la formular y conducir la política ambiental, la evaluación del impacto ambiental de diversas actividades y el control de las acciones para la protección, preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección, preservación, restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en la zona federal de los cuerpos de agua nacionales (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

En el año de 1994 se creó la SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) con la finalidad de crear una secretaría especializada, que atendiera políticas ambientales y manejo de recursos naturales. En el 2000 cambió su nombre a SEMARNAT (Secretaría del medio Ambiente

y Recursos Naturales) y la pesca, como actividad productiva, pasó a la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación), para dar formalidad y un mayor impulso a una política nacional y de estado de protección ambiental. Esta nueva estructura se apoya principalmente de tres instancias ambientales: el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

El artículo 119 de la LEGEEPA señala como prevenir y controlar la contaminación de aguas nacionales. El artículo 123 plantea que todo tipo de descarga en las redes colectoras, así como en ríos, diferentes cuencas y aguas marinas, deben satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, señalando que quien generó dichas descargas deberá realizar el tratamiento previo requerido. El artículo 130 señala que el vertido de aguas residuales en aguas marinas es autorizado por la SEMARNAT, en coordinación con la Secretaría de Marina. En cuanto al control de la contaminación del medio marino, el artículo 132 menciona que SEMARNAT, Secretaría de Marina, de Energía, de Salud, Turismo y de Comunicaciones y Transportes serán las que intervengan en la prevención y control. Finalmente, el artículo 133 establece la participación de la Secretaría de Salud, para realizar un sistemático y permanente monitoreo de calidad de las aguas, para detectar presencia de contaminantes o excesos de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan.

En años recientes, se publicó la Política Nacional de Mares y Costas de México (DOF - 30/11/2018), donde se indica que existen diferentes tipos de contaminación, entre ellos los metales pesados generados como residuos de procesos industriales, que resultan dañinos en una primera instancia para la salud humana y como segundo término, para la biota marina, es decir con una visión antropocéntrica. También se señala el monitoreo de los contaminantes marinos, pero debido al alto costo económico se ha limitado su desarrollo y ejecución periódica, con amplia cobertura, con metodologías uniformes y que abarque un amplio espectro de contaminantes. Este vacío se ha complementado con la información generada por las instituciones gubernamentales y la academia, que han generado un compendio de información sobre el GdM, donde se ha encontrado presencia de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn y V, entre otros (DOF, 2018).

Sin embargo, en ninguna de las leyes y normas se toma en cuenta la contaminación de los sedimentos costeros, por lo que los monitoreos normalmente sólo consideran el estudio de la calidad del agua. En algunos trabajos se han adoptado para el estudio de metales en sedimentos la Norma Oficial Mexicana de Criterios para la Determinación de Suelos Contaminados por Metales Pesados (NOM-147-SEMARNAT/ SSA1, 2004), que puede ser una fuente de error, puesto que los factores bióticos y abióticos no son equiparables.

#### **8.1.2.4. Tendencias en México**

A través de las tendencias y datos de desarrollo económico de México se ha observado que la presencia de algunos EPT's se puede relacionar con los conductores del cambio global y normas ambientales (Figura 35).

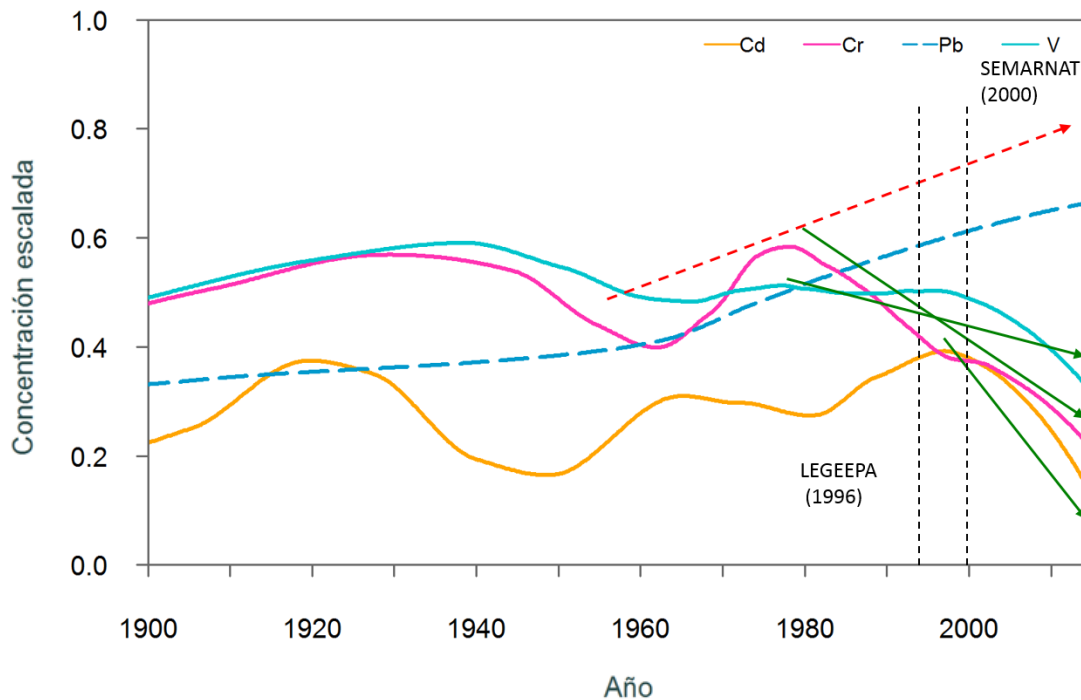


Figura 35. Tendencias de contaminación en la región LME05 sur y su relación con las normas ambientales de México

#### Incremento

El Pb presenta una tendencia de crecimiento de  $+5.3\%$  década<sup>-1</sup> (Tabla 11) a partir de 1950, época en la que se produce la “Gran Aceleración”. El punto de inflexión es muy probablemente debido al incremento global del consumo de productos con este elemento. Las principales fuentes de contaminación son la industria, zonas urbanas, la minería y los automóviles (Callender, 2003). En México, a partir de los 1960s se incrementó el parque automovilístico, como consecuencia del incremento de la población y mayor poder adquisitivo (Sánchez et al., 2015).

En 1981 se emitió la NMX-AA-57-1981 (modificada en 1992) para el análisis de Pb agua, con la cual se evalúan las descargas industriales y urbanas. Posteriormente, y debido a los daños a la salud humana como producto de la contaminación atmosférica con Pb, se reguló su emisión a través de la NOM-026-SSA1-1993, que establece los criterios para evaluar la calidad del aire como medida de protección a la salud de la población. Por ello, después de 1991 se empezó a utilizar gasolina libre de este elemento lo que marcaría una disminución en las concentraciones atmosféricas (Fernández-Bremauntz et al., 2004), no observada en nuestro análisis de sedimentos costeros mexicanos, indicando que otras fuentes dominan la contaminación, bien sea a nivel regional como global (por ejemplo China) (Wilhelmsson et al., 2013).

Tabla 11. Tendencias significativas de contaminación en la región sur del Golfo de México.

EPT	Periodo	Número de datos	Número de series de tiempo	Tendencia (% década <sup>-1</sup> )	Incertidumbre	P
Pb	1950 - 2016	356	25	5.3	0.1	5.9E-10
Cd	1997 - 2016	29	9	-26.7	1.3	4.9E-02
Cr	1978 - 2016	228	26	-9.6	0.2	8.4E-08
V	1970 - 2016	238	23	-3.2	0.1	2.2E-02

### Disminución

En la región sur solo 3 EPT's (Cd, Cr, V) presentan una tendencia a la disminución significativa. En el caso del Cd, se observan oscilaciones desde 1900, un máximo en 1997, y una disminución reciente de los niveles a una tasa de 26.7% década<sup>-1</sup>. Esta disminución podría ser debida a la implementación de normativas ambientales de fuentes puntuales y no puntuales del Cd. De hecho, la NOM-001-ECOL-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, que incluyen al Cd.

Las principales fuentes de Cd en México después de 1950 han sido relacionadas principalmente con las actividades agrícolas (Villanueva & Vázquez-Botello, 1992), ya que el uso de fertilizantes fosfatados durante la revolución verde fue imprescindible para la obtención de productos agrícolas (Fajnzylber, 1990). Otras fuentes son del desgaste de llantas de carros en el pavimento y las sustancias contenidas en las pilas. Estas fuentes aparecieron con el desarrollo de la industria automotriz y la industria química en los años 60's (Moreno-Brid & Ros, 2010; Weintraub et al., 1992). El Cd también puede ser transportado desde distancias remotas por vía atmosférica, procedente de fundidoras de metales, combustión de combustibles fósiles, incineración de residuos urbanos, y la industria petrolera asociada a las zonas costeras del GdM (Callender, 2003; Villanueva & Vázquez-Botello, 1992).

La disminución del Cr inicia en 1978 con una tendencia de -9.6% década<sup>-1</sup>. Hasta entonces, el incremento es probablemente debido a la industrialización de la zona, ya que el Cr está asociado a aguas industriales y producción de fertilizantes (Villanueva & Vázquez-Botello, 1992). La disminución reciente puede ser atribuida a medidas de regulación y revisión de este elemento en aguas residuales (NOM DGN-AA-44, publicada en 1977 y modificada en 1982 como NMX-AA-044), que pueden haber limitado las descargas de este elemento al ambiente.

A partir de 1970, el V disminuye una tasa de -3.2% década<sup>-1</sup>, la menos intensa de los EPT's. El V procede de los residuos de diversos procesos industriales para la manufactura de caucho, plásticos, cerámicas y otros productos químicos. El óxido de vanadio es empleado principalmente en la aleación con el acero, en partes de automóviles y también como catalizador en la industria de plásticos (Volke-Sepúlveda et al., 2005). Además, en las zonas costeras de producción petrolera

este elemento puede encontrarse de manera natural en los sedimentos marinos, ya que se presenta en forma de complejos metálicos y organometálicos en todos los petróleos crudos y materiales de origen fósil (Baroch, 2000). Desde el punto de vista normativo, es considerado peligroso en la NOM-054-SEMARNAT-1993, aunque no está incluido en las normas de calidad de agua como el Cd y Cr. La reducción del V puede ser causa de una acción indirecta, ya que las fuentes antropogénicas son las mismas del Cd, que sí está regulado.

## **8.2. Comparación de las tendencias regionales y global**

La base de datos del LME05 presenta un desequilibrio del número de registros sedimentarios entre la región sur (26) y norte (16). La interpretación de los resultados es difícil pues no siempre los patrones son claros en series de tiempo largas (A. Zuur et al., 2007). Sin embargo, en la región norte el patrón es más claro, con un máximo en los 70's y una posterior disminución, claramente atribuible a los conductores del cambio global. En la región LME05 sur el comportamiento no es tan claro.

Teniendo en cuenta todo el LME05, se observa que para algunos EPT's (Ag, Cd, Cr, V y Zn), el máximo se produce en los 70's, seguido de una tendencia a la disminución, siguiendo un patrón similar a la región norte. Sin embargo, para el Pb la tendencia es creciente desde 1970 (+3.8% década<sup>-1</sup>), probablemente dominada por la tendencia de la región sur, pues si bien la regulación de las gasolinas con plomo ocurrió en EUA en los 60's, esto no ocurrió hasta los 90's en México (Fernández-Bremauntz et al., 2004; Sánchez et al., 2015).

La presencia de dos países con historias socioeconómicas y culturales diversas en el GdM permiten profundizar en las tendencias de los diferentes conductores del cambio global en el tipo de desarrollo y sus impactos ambientales. Algunos modelos económicos sugieren que países con mayor desarrollo y PIB per cápita tienen la capacidad de proveer a su población de mayor calidad de vida y bienestar social, incluyendo una mayor educación y una disminución en la degradación ambiental (Grossman & Krueger, 1995). Una tasa de alfabetización alta genera una demanda social en la reducción de los niveles de contaminación para mejorar su entorno y en beneficio de la salud pública, por lo que se eleva su calidad de vida. Esta actitud social influye satisfactoriamente en las decisiones políticas para la generación de normas ambientales más rigurosas (Torras & Boyce, 1998).

La curva ambiental de Kuznets (CAK) puede explicar las diferentes fases que atraviesan las problemáticas ambientales en función del desarrollo (Grossman & Krueger, 1995). En una primera fase, las economías se basan en el sector agrícola, como lo hizo México y EUA, con un claro impacto en la calidad del medio ambiente. En una segunda fase se desarrolla la industria, que, si bien genera un mayor PIB nacional, también implica un mayor deterioro de la calidad ambiental, incluyendo la contaminación por EPT's. Después de un punto de cambio, la economía sustenta su crecimiento en tecnologías eficientes y limpias, principalmente en el sector de servicios, y los niveles de contaminación tendrían que disminuir (Catalán, 2014; Grossman & Krueger, 1995; Torras & Boyce, 1998).

Las sociedades son las responsables de moldear el desarrollo económico, pero también las normas ambientales. Las tendencias de la contaminación en EUA reflejan su condición actual de nación desarrollada, con estrictas normas ambientales y programas de monitoreo, que se reflejan en tendencias recientes de contaminación decrecientes. Sin embargo, no siempre fue así: EUA forjó su desarrollo, ya desde los siglos XVIII y XIX, a través del desarrollo industrial, pero en los 60's y 70's se crearon organizaciones gubernamentales, legislaciones y normativas dedicadas a la protección del medio ambiente.

El desarrollo industrial en México ocurre durante el siglo XX, y la mayor parte de las normas ambientales se promulgan a finales de ese siglo. Las tendencias de la contaminación en las últimas décadas no son claras, e indican que México se encuentra en la segunda fase de la CAK, quizás en transición progresiva hacia la tercera fase. Esta contradicción indica que hay otros factores, propios de cada país, que afectan al tránsito de una economía por las fases de la CAK.

En México, el diseño político, la estructura institucional, la innovación y el apoyo a la investigación para obtener tecnologías eficientes y alternativas energéticas no han sido suficientes para generar estas condiciones (Catalán, 2014). Además, el hecho de que no existan las normas suficientes y una baja o nula aplicación de las leyes ambientales ha propiciado que empresas transnacionales, con la finalidad de minimizar los costos de protección ambiental, ubiquen sus industrias y/o actividades más contaminantes, entre las que sobresalen la agricultura, minería, manufactureras, construcción, transporte y el sector energético (electricidad y gas). Algunas empresas, entre las que resaltan las de EUA, trabajan con tecnologías que no son las mismas que se emplean en su país de origen (CEPAL, 2015).

Los resultados de este trabajo han permitido utilizar las tendencias de la contaminación para identificar el grado de desarrollo económico y ambiental de dos países que comparten un gran ecosistema marino (GdM). Pero además, los valores reportados de contaminación tienen un valor intrínseco, pues los EPT's persisten en los sedimentos y pueden ser liberados a la columna de agua (Visviki & Rachlin, 1991). Estos elementos pueden estar disponibles para la biota marina, principalmente la bentónica, y pueden ser transferidos (a veces con biomagnificación) a través de la cadena trófica, causando deterioro ambiental. Finalmente, los productos marinos contaminados de consumo humano pueden poner en riesgo la salud pública (UNEP, 2013). La contaminación de ecosistemas marinos puede tener consecuencias nacionales e internacionales, por lo que su resolución requiere de la acción coordinada de los científicos y tomadores de decisiones de todos los países afectados.



## 9. CONCLUSIONES

Las tendencias de los EPT's observadas en sedimentos son una potente herramienta para reconstruir algunos procesos del cambio global durante el último siglo. Un sedimento inalterado y fechado provee información temporal que permite reconstruir los impactos a nivel local. En este trabajo, se ha demostrado que la síntesis de información publicada en el GdM permite establecer tendencias regionales que resaltan las diferentes historias socioeconómicas y políticas de cada país. Esta herramienta también puede ofrecer información para diagnosticar el grado de desarrollo de una región y la efectividad de la legislación, y ofrecer indicadores que permitan catalogar zonas de potencial riesgo por la contaminación, lo que debe facilitar la regulación y la promulgación de normas específicas para la protección de la zona costera.

La contaminación marina en la región procede principalmente de fuentes difusas, por vía terrestre a través de los ríos que atraviesan por las grandes ciudades y zonas de importancia agrícola e industrial de Estados Unidos de América (región norte) y México (región sur). Otras fuentes son la vía atmosférica (industrias de producción y extracción, así como quema de combustibles fósiles) y fuentes directas cercanas a la zona costera (plataformas petroleras, industria petroquímica y ciudades en la zona ribereña).

Las tendencias de Ag, Cd, Cu y Pb en la región norte señalan que después de un máximo a finales de los 60's y principios 70's, se observa una marcada disminución relacionada con la promulgación de normas rigurosas y la creación de instituciones con el mandato del monitoreo y la evaluación para la protección medio ambiente. En la región sur las tendencias de Cd, Cr y V muestran máximos en épocas diferentes a la región norte, normalmente con una respuesta tardía a las normas ambientales mexicanas. Además, el Pb aumenta desde los 50's hasta la actualidad, lo que sugiere que existen actividades que siguen desarrollándose en esta región, o incluso fuera de México, donde no se cumplen rigurosamente las normas ambientales. A diferencia de EUA, México aún no tiene una legislación y estructura administrativa que provea de información exhaustiva y sólida sobre la contaminación de la zona costera. Además, no se dispone de indicadores ambientales ni metodologías oficiales adecuados a los sedimentos marinos del GdM. Debido a las regulaciones menos estrictas en la México, algunas empresas transnacionales y nacionales han ubicado sus industrias más contaminantes y con tecnologías obsoletas que favorecen la contaminación por EPT's en las zonas costeras de la LME05.

De forma global, en el GdM, Ag, Cd, Cr, V y Zn muestran una reducción reciente en los registros sedimentarios. Sin embargo, en general los EPT's siguen tendencias diversas, atribuidas a las distintas actividades causantes de la contaminación y de las regulaciones ambientales de los países ribereños. En el caso del Pb, la tendencia global es al aumento desde los años 60, aun cuando existe normatividad en ambas regiones sobre el control de uso gasolinas con plomo y otras actividades que lo generan. Aunque existen legislaciones estrictas y eficientes en los países desarrollados, en otros países (especialmente aquellos en rápido desarrollo) se pueden aún generar grandes cantidades (p.e. de la industria, minería y zonas urbanas) que, debido a su volatilidad, puede dispersarse atmosféricamente de forma global, y ser registrado en zonas como el GdM.

La información obtenida también provee una visión útil para estudiar el impacto ambiental de los EPT's en los ecosistemas marinos. La presencia de concentraciones de los EPT's por encima de los rangos naturales en sedimentos y de índices de calidad internacionales muestra la magnitud del impacto antropogénico en algunas zonas costeras de la región. Las mayores concentraciones de EPT's se encuentran en la región sur, entre 0 y 40 cm de profundidad. Se superan los niveles PEL en 16 casos, respectivamente, en los cuales la biota bentónica puede manifestar frecuentemente efectos debidos a la contaminación. Las zonas más afectadas entre las que se encuentran Laguna Verde, Veracruz y Nuevo Progreso, Campeche deberían ser objeto de un monitoreo especial. Los riesgos a la biota por altos niveles de EPT's pueden ser transferidos a los distintos niveles tróficos, de manera que pueden representar un daño a los ecosistemas y una amenaza a la salud pública a través del consumo humano. Las consecuencias de la contaminación del LME05 son de interés nacional y regional, y para su manejo se requiere de la acción coordinada entre científicos y tomadores de decisiones de la región.

Las tendencias de los EPT's en las dos regiones del GdM denotan las diferentes etapas de desarrollo económico y social, que influyen directamente en los impactos sobre el medio marino. Estas tendencias demuestran que México tiene una respuesta tardía al desarrollo económico – social, y por tanto ambiental, en comparación con EUA. Actualmente México atraviesa por una etapa de industrialización, en la que anteriormente se encontraba EUA, en la que el nivel de bienestar alcanzado aún no es suficiente para revertir la tendencia creciente de sus impactos. Se requiere de un mayor desarrollo económico (PIB per cápita) y social (altas tasas de alfabetización) para influir notoriamente en la demanda de mejores y más eficientes regulaciones ambientales que puedan modificar las tendencias de contaminación por los EPT's.

Los principales conductores (desarrollo económico y crecimiento demográfico) son los responsables de las modificaciones de los niveles de contaminación. Sin embargo, el cambio de actitud en la sociedad a través de la exigencia del cumplimiento de las normas ambientales para una mejor calidad de vida global puede tener efectos positivos, y convertirse en un nuevo conductor o factor del cambio global.

### **Perspectivas**

Las estrategias diseñadas para la protección de ecosistemas costeros deberían incluir, además del monitoreo sistemático de la calidad de agua y de los ecosistemas, el análisis de los sedimentos superficiales y la generación de series temporales largas a través de registros sedimentarios. Éstos pueden permitir dirigir las acciones de protección y la legislación ambiental de una forma más efectiva a las causas reales de los problemas identificados. Para ello, se debe ampliar la base de datos de contaminación en sedimentos marinos con la finalidad de disponer de una mejor perspectiva temporal de las tendencias, de los riesgos a la biota bentónica e, indirectamente, a la salud pública.

Para completar este estudio, es necesario incorporar a los denominados en general “contaminantes orgánicos”, como por ejemplo los hidrocarburos, compuestos organoclorados y dioxinas. Estas

substancias pueden aportar información valiosa sobre nuevas fuentes de contaminación y complementar la información necesaria para describir el desarrollo histórico de una sociedad.

Como se ha demostrado en este trabajo, es necesario estudiar zonas con diferentes contextos sociales, económicos y políticos (del mismo continente y entre continentes), con el objetivo de investigar las debilidades y fortalezas de cada uno de los territorios para un control global de la contaminación.

Este trabajo pretende promover que la información generada sea útil a los tomadores de decisiones para visualizar las áreas vulnerables que requieren especial protección, y muy especialmente las zonas donde no existe información.

## 10. LITERATURA CITADA

- Alexander, C. R., Calder, F. D., Schropp, S. J., & Windom, H. L. (1993). The Historical Record of Metal Enrichment in Two Florida Estuaries. *Estuaries*, 16(38), 627–637.
- Ali, M. M., Ali, M. L., Islam, M. S., & Rahman, M. Z. (2016). Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 5, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.002>
- Barbieri, M. (2016). The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5(1), 1–4. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>
- Baroch, E. F. (2000). Vanadium and Vanadium alloys. In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (pp. 1–21). New York: Wiley.
- Belkin, I. M., Cornillon, P. C., & Sherman, K. (2009). Fronts in Large Marine Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 81(1–4), 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.04.015>
- Benítez-Zenteno, R. (1972). Consideraciones sobre la población, el desarrollo y la política de población en México. *Demografía y Economía*, 6(3), 291–297.
- Berlin, M., Zalups, R. K., & Fowler, B. A. (2015). Mercury. In G. F. Nordberg, B. A. Fowler, & M. Nordberg (Eds.), *Handbook on the Toxicology of Metals*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59453-2.00046-9>
- Bojórquez-Sánchez, S., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-González, A., Sánchez-Cabeza, J. A., Bojórquez-Leyva, H., & Pérez-Bernal, L. H. (2017). Trace element fluxes during the last 100 years in sediment near a nuclear power plant. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 343–353. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.05.005>
- Brambila, A. L. (1975). El marco socio-económico de la crisis política de 1958-1959 en México. *Revista Mexicana de Sociología*, 37(2), 349–362.
- Buchman, M. (2008). *NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1, Seattle WA, Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration*.
- Burton, G. A. (2002). Sediment quality criteria in use around the world. *Limnology*, 3, 65–75. <https://doi.org/10.1007/s102010200008>
- Callender, E. (2003). Heavy Metals in the Environment — Historical Trends. In H. D. H. & K. K. Turekian. (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Vol. 9, pp. 67–105).
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. *Ley General Del Equilibrio Ecológico Y La Protección Al Ambiente.* , (2018).
- Cárdenas, E. (2010). La economía mexicana en el dilatado siglo XX, 1929-2009. In S. K. Ficker (Ed.), *Historia económica general de México* (pp. 503–548). Colegio de México.
- Carpenter, S. R., Bennett, E. M., & Peterson, G. D. (2006). Editorial: Special Feature on Scenarios for Ecosystem Services. *Ecology and Society*, 11(2). <https://doi.org/10.5751/es-01609-110232>
- Casado-Izquierdo, J. M., & Sánchez-Salazar, M. T. (2013). Coatzacoalcos: Reestructuración urbana e inversión privada en una ciudad media mexicana. *Eure*, 39(117), 91–116. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612013000200005>

- Catalán, H. (2014). Curva ambiental de Kuznets: implicaciones para un crecimiento sustentable. *Economía Informa*, 389, 19–37. [https://doi.org/10.1016/s0185-0849\(14\)72172-3](https://doi.org/10.1016/s0185-0849(14)72172-3)
- Cearreta, A., Irabien, M. J., Leorri, E., Yusta, I., Croudace, I. W., & Cundy, A. B. (2000). Recent Anthropogenic Impacts on the Bilbao Estuary, Northern Spain : Geochemical and Microfaunal Evidence. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50, 571–592. <https://doi.org/10.1006/ecss.1999.0582>
- CEPAL. (1998). El impacto de las empresas transnacionales en la reestructuración industrial de México. El caso de las industrias de partes para vehículos y de televisores. In J. Carrillo, M. Mortimore, & J. A. Estrada (Eds.), *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Retrieved from [http://snap3.uas.mx/RECURSO1/publicaciones\\_seriadas/SERIE\\_DESARROLLO\\_PRODUCTIVO/50.pdf](http://snap3.uas.mx/RECURSO1/publicaciones_seriadas/SERIE_DESARROLLO_PRODUCTIVO/50.pdf)
- CEPAL. (2015). *La Inversión Extranjera Directa en América Latina y el Caribe* (A. Bárcenas, A. Prado, M. Cimoli, & R. Pérez, Eds.). Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- CEQ. (2007). *A citizen's guide to NEPA*.
- Chapman, P. M. (1990). The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation. *The Science of the Total Environment*, 97/98(1990), 815–825.
- Chapman, P. M. (2007). Determining when contamination is pollution - Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environment International*, 33(4), 492–501. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.09.001>
- Cundy, A. B., Croudace, I. W., Cearreta, A., & Irabien, M. J. (2003). Reconstructing historical trends in metal input in heavily-disturbed, contaminated estuaries: Studies from Bilbao, Southampton Water and Sicily. *Applied Geochemistry*, 18(2), 311–325. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00127-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00127-0)
- De La Lanza Espino, G., Pérez, M. A. O., & Pérez, J. L. C. (2013). Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. *Investigaciones Geograficas, Boletín Del Instituto de Geografía*, 81, 33–50.
- Dębski, B. (2016). Supplementation of pigs diet with zinc and copper as alternative to conventional antimicrobials. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 19(4), 917–924. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0113>
- DeLaune, R. D., Reddy, C. N., & Patrick, W. H. (2006). Accumulation of Plant Nutrients and Heavy Metals through Sedimentation Processes and Accretion in a Louisiana Salt Marsh. *Estuaries*, 4(4), 328. <https://doi.org/10.2307/1352157>
- Díaz-Flores, M. Á., Salas-de-León, D. A., & Monreal-Gómez, M. A. (2017). Origen y evolución del giro ciclónico de la Bahía de Campeche, Golfo de México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(3), 441–450. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572017000300003>
- DOF. *Reglamento para prevenir y controlar la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias*. , (1979).
- DOF. *DOF: 30/11/2018. ACUERDO mediante el cual se expide la Política Nacional de Mares y Costas de México*. , (2018).
- DOF. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: Artículo 73*. , (2020).
- Doyle, L. J., Brooks, G. R., Fanning, K. A., Van Vleet, E. S., Byrne, R. H., & Blake, N. J. (1989). A

*characterization of Tampa Bay sediments.*

- Duarte, C. M. (coord. ., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo, M., ... Valladares, F. (2006). *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. (January 2006), 166. Retrieved from [https://portal.uc3m.es/portal/page/portal/grupos\\_investigacion/sociologia\\_cambio\\_climatico/Pardo - Libro Cambio Global Impacto de la actividad huma.pdf%5Cnhttp://documenta.wi.csic.es/alfresco/downloadpublic/direct/workspace/SpacesStore/bb2c7774-25c2-49e5-](https://portal.uc3m.es/portal/page/portal/grupos_investigacion/sociologia_cambio_climatico/Pardo_Libro_Cambio_Global_Impacto_de_la_actividad_huma.pdf%5Cnhttp://documenta.wi.csic.es/alfresco/downloadpublic/direct/workspace/SpacesStore/bb2c7774-25c2-49e5-)
- Duffus, J. H. (2002). "Heavy Metals" — A meaningless term? ( IUPAC Technical Report ). *Pure Appl. Chem.*, 74(5), 793–807.
- Dunlap, R. E., & Mertig, A. G. (1991). The evolution of the U . S . environmental movement from 1970 to 1990 : An overview. *Society and Natural Resources*, 4(April 2015), 209–218. <https://doi.org/10.1080/08941929109380755>
- Edokpayi, J. N., Odiyo, J. O., Popoola, O. E., & Msagati, T. A. M. (2016). Assessment of Trace Metals Contamination of Surface Water and Sediment : A Case Study of Mvudi River , South Africa. *Sustainability*, 8(135), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8020135>
- EPA. (1997). *The incidence and severity of sediments contamination in surface waters of the United States: Volume 1: National Sediment Quality Survey*.
- EPA. (2014). *Appendix A to 40 CFR, Part 423*. Retrieved from <https://www.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act>
- Fajnzylber, F. (1990). Industrialización en América Latina: De la "Caja Negra" al "casillero vacío" de Fernando Fajnzylber. In *Revista Economía* (Vol. 13).
- FAO. (1990). *Pollution from industrilized livestock production*.
- Feng, H., Cochran, J. K., Brownawell, B. J., & Hirschberg, D. J. (1998). Distribution of Heavy Metal and PCB Contaminants in the Sediments of an Urban Estuary: The Hudson River. *Marine Environmental Research*, 45(1), 69–88.
- Fernández-Bremauntz, A., Yarto-Ramírez, M., & Castro-Díaz, J. (2004). *Las sustancia tóxicas persistentes*. INE.
- Ficker, S. K. (2010a). De las reformas liberales a la Gran Depresión, 1856-1929. In S. K. Ficker (Ed.), *Hist* (pp. 305–352). Colegio de México.
- Ficker, S. K. (2010b). La trayectoria de largo plazo de la economía mexicana. In S. K. Ficker (Ed.), *Historia económica general de México* (pp. 791–799). Colegio de México.
- Gerold, B., Amec, M., Greening, H., & Bay, T. (2002). *Chapter 7. Sediment Contaminants and Benthic Habitat Quality*. 203–238.
- GESAMP. (2001). Protecting the oceans from land-based activities – Land-based sources and activities affecting the quality and uses of the marine, coastal and associated freshwater environment. In *Reports and Studies* (Vol. 71). <https://doi.org/71>
- GESAMP, (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). (2010). *Report of the Thirty-Seventh session of GESAMP, Bangkok, 14-19 February 2010*. Rep. Stud. GESAMP.

- Gobeil, C., Silverberg, N., Sundby, B., & Cossa, D. (1987). Cadmium diagenesis in Laurentian Trough sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 589–596.
- Gómez-López, C. S., Barrón Arreola, K. S., & Moreno Moreno, L. (2011). Crecimiento económico y medio ambiente en México. *El Trimestre Económico*, LXXVIII(311), 547–582.
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic Growth and the Individual. *The Quarterly Journal of Economics*, (112), 353–377. <https://doi.org/10.2307/2977834>
- Gutmann, M. P., McCaa, R., Gutiérrez-Montes, R., & Gratton, B. (2000). Los efectos demográficos de la Revolución Mexicana en Estados Unidos. *Historia Mexicana*, 1, 145–165.
- Hunt, J. M. (1967). The origin of Petroleum in Carbonate Rocks. In V. Chilingar, H. J. Bissell, & R. W. Fairbridge (Eds.), *Carbonate rocks: physical and chemical aspects* (pp. 1–413). Elsevier.
- IAEA. (2004). Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment. In *Technical Reports Series No.422*. Retrieved from [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS422\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS422_web.pdf)
- Ibarra, A. (2010). LA EDAD DE PLATA: MERCADOS, MINERÍA Y AGRICULTURA EN EL PERIODO COLONIAL TARDÍO. In S. K. Ficker (Ed.), *Historia económica general de México* (pp. 211–243). Colegio de México.
- INEGI. (2013). *Sistema de Cuentas Nacionales de México año base 2013 Sistema de Cuentas Nacionales de México*. Retrieved from [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)
- Jones, C. I. (2016). The Facts of Economic Growth. In *Handbook of Macroeconomics* (1st ed., Vol. 2). <https://doi.org/10.1016/bs.hesmac.2016.03.002>
- Juracek, K. E. (2004). *Sedimentation and Occurrence and trends of selected chemical constituents in bottom sediment of 10 small reservoirs, eastern Kansas: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5228*.
- Karlen, D. J., Dix, T., Goetting, B. K., Markham, S. E., Meyer, C., Flock, M., & Blanchard, G. (2008). *Tampa Bay Benthic Monitoring Program Interpretive Report : 1993-2004*. (September), 133. Retrieved from <http://www.epchc.org/home/showdocument?id=176>
- Kim, S. (2007). Immigration, Industrial Revolution and Urban Growth in the United States, 1820-1920: Factor Endowments, Technology and Geography. In *NBER Working Paper*. <https://doi.org/10.3386/w12900>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K. H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Kuznets, S. (1955). Kuznets-Aer-1955.Pdf. *The American Economic Review*, 45(1), 1–28.
- Lewan, M. D., & Maynard, B. (1982). Factors controlling enrichment of vanadium and nickel in the bitumen of organic sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 2547–2560.
- Long, E., Field, L. J., & MacDonald, D. D. (1998). PREDICTING TOXICITY IN MARINE SEDIMENTS WITH NUMERICAL SEDIMENT QUALITY GUIDELINES. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 17(4), 714–727.
- Long, E. R., Bin, C., Smith, S. L., & Calder, F. D. (1995). Incidence of Adverse Biological Effects Within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediments. *Environmental*

*Management*, 19(1), 81–97.

- Long, E. R., & Greening, H. S. (1999). *Chemical Contamination in Tampa Bay: Extent, toxicity, potential sources and possible sediment quality management plans*.
- López Alonso, M., Benedito, J. L., Miranda, M., Castillo, C., Hernández, J., & Shore, R. F. (2000). The effect of pig farming on copper and zinc accumulation in cattle in Galicia (North-Western Spain). *Veterinary Journal*, 160(3), 259–266. <https://doi.org/10.1053/tvjl.2000.0503>
- Macdonald, D. D., Carr, R. S., Calder, F. D., Long, E. R., & Ingersoll, C. G. (1996a). Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5(4), 253–278. <https://doi.org/10.1007/BF00118995>
- Macdonald, D. D., Carr, R. S., Calder, F. D., Long, E. R., & Ingersoll, C. G. (1996b). Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5(4), 253–278. <https://doi.org/10.1007/BF00118995>
- MacDonald, D. D., Carr, R. S., Eckenrod, D., Greening, H., Grabe, S., Ingersoll, C. G., ... Smorong, D. E. (2004). Development, Evaluation, and Application of Sediment Quality Targets for Assessing and Managing Contaminated Sediments in Tampa Bay, Florida. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 46(2), 147–161. <https://doi.org/10.1007/s00244-003-2270-z>
- Madrid, H. C., Rosales Hoz, L., Márquez García, A. Z., & Carranza Edwards, A. (2018). Environmental assessment of a mangrove protected area in the southeast Gulf of Mexico through sediment core analysis. *Environmental Earth Sciences*, 77(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7160-1>
- Malloy, K. J., Wade, D., Janicki, A., Grabe, S. A., & Nijbroek, R. (2007). Development of a benthic index to assess sediment quality in the Tampa Bay Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 54, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.06.011>
- Mann, G. S., & Chapman, P. M. (1999). Sediment Quality Values (SQVs) and Ecological Risk Assessment (ERA). *Marine Pollution Bulletin*, 38(5), 339–344. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00033-8)
- Marini, R. M. (1977). La acumulación capitalista mundial y el subimperialismo. *Cuadernos Políticos*, 12(10), 20–39. Retrieved from <http://www.geopolitica.ws/media/uploads/CP.12.4.Marini.pdf>
- Martínez-Lopez, B., & Páres-Sierra, A. (1998). Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Ciencias Marinas*, 24(1), 65–93. <https://doi.org/10.7773/cm.v24i1.740>
- Moreno-Brid, J. C., & Ros, J. (2010). La dimensión internacional de la economía mexicana. In S. K. Ficker (Ed.), *Historia económica general de México* (pp. 757–788). Colegio de México.
- Morrison, G., & Greening, H. (2006). Chapter 5 . Water Quality. *Integrating Science and Resource Management in Tampa Bay, Florida: U.S. Geological Survey Circular 1348*, 105–156.
- Myers, N., Oxon, M. A., California, P. D., Meadow, U., & Road, O. (1987). *Population , Environment , and Conflict \* by*. 14(1), 15–22.
- Naciones Unidas. (1982). *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar*. Retrieved from [http://www.un.org/Depts/los/convention\\_agreements/texts/unclos/convemar\\_es.pdf](http://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/convemar_es.pdf)
- Nahman, A., & Antrobus, G. (2005). The environmental Kuznets curve: A literature survey. *South African Journal of Economics*, 73(1), 105–120. <https://doi.org/10.1111/j.1813->



6982.2005.00008.x

- Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A. A., Cassman, K., DeFries, R., Dietz, T., ... Zurek, M. (2006). Anthropogenic drivers of ecosystem change: An overview. *Ecology and Society*, 11(2). <https://doi.org/10.5751/ES-01826-110229>
- Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A., Cassman, K. G., DeFries, R., Dietz, T., ... Zurek, M. B. (2005). Drivers of Change in Ecosystem Condition and Services. In M. B. Carpenter, S.R., Prabhu, L. P., Bennet, E.M., Zurek (Ed.), *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios - Volume 2* (pp. 175–222). <https://doi.org/citeulike-article-id:4423649>
- NOAA, & USGS. (2019). *Council Monitoring and Assessment Program ( CMAP ) Inventory of Existing Habitat and Water Quality Monitoring , and Mapping Metadata for Gulf of Mexico Programs*. <https://doi.org/10.25923/gwpx-ff30>
- OIEA. (1980). Laguna Verde - Una historia en fotografía. *OIEA Boletín*, 22(2), 2–10.
- OMI. (2020). Convenio de Londres de 1972 sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias. Retrieved from <http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/Convention-on-the-Prevention-of-Marine-Pollution-by-Dumping-of-Wastes-and-Other-Matter.aspx>
- Otis, D., Le Hénaff, M., Kourafalou, V., McEachron, L., & Muller-Karger, F. (2019). Mississippi River and Campeche Bank (Gulf of Mexico) Episodes of Cross-Shelf Export of Coastal Waters Observed with Satellites. *Remote Sensing*, 11(6), 723. <https://doi.org/10.3390/rs11060723>
- Qian, Y., Zhang, W., Yu, L., & Feng, H. (2015). Metal Pollution in Coastal Sediments. *Curr Pollution Rep*, 1, 203–219. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0018-9>
- R Core Team. (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. Retrieved from <https://www.r-project.org/>
- Riguzzi, P. (2010). México y la economía internacional, 1860-1930. In S. K. Ficker (Ed.), *Historia económica general de México* (pp. 377–409). Colegio de Mexico.
- Romo, D. (2015). El campo petrolero Cantarell y la economía mexicana. *Revista Problemas Del Desarrollo*, 183(46), 141–164.
- Ruiz-Fernández, A. C., Sanchez-Cabeza, J. A., Alonso-Hernández, C., Martínez-Herrera, V., Pérez-Bernal, L. H., Preda, M., ... Quejido-Cabezas, A. J. (2012). Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico). *Continental Shelf Research*, 37, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.02.005>
- Ruiz-Fernández, A. C., Sánchez-Cabeza, J. A., Pérez-Bernal, L. H., & Gracia, A. (2019). Science of the Total Environment Spatial and temporal distribution of heavy metal concentrations and enrichment in the southern Gulf of Mexico. *Science of the Total Environment*, 651, 3174–3186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.109>
- Salomons, W., de Rooij, N. M., Kerdijk, H., & Bril, J. (1987). Sediments as a source for contaminants? *Hydrobiologia*, 149, 13–30.
- Sanchez-Cabeza, J. A., & Druffel, E. R. M. (2009). Environmental records of anthropogenic impacts on coastal ecosystems: An introduction. *Marine Pollution Bulletin*, 59(4–7), 87–90. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.06.002>
- Sanchez-Cabeza, J. A., & Ruiz-Fernández, A. C. (2012). <sup>210</sup>Pb sediment radiochronology: An

- integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.024>
- Sánchez-Salazar, M. T., Martínez Laguna, N., & Martínez Galicia, M. (1999). Industria petroquímica y cambios socioeconómicos regionales en la costa del Golfo de México. El caso del sureste de Veracruz. *Investigaciones Geográficas*, 1(40), 127–147. <https://doi.org/10.14350/rig.59099>
- Sánchez-Santiró, E. (2010). El desempeño de la economía mexicana , 1810-1860 : de la Colonia al Estado-nación. In S. K. Ficker (Ed.), *Historia económica general de México* (pp. 275-30|). Colegio de México.
- Sánchez, A., Islas, S., & Sheinbaum, C. (2015). Demanda de gasolina y la heterogeneidad en los ingresos de los hogares en México. *Investigacion Economica*, 74(291), 117–143. <https://doi.org/10.1016/j.inveco.2015.07.004>
- Santschi, P. ., Garcia-Romero, B., Baskaran, M., Wade, T. ., & Presley, B. . (2002). Historical contamination of PAHs, PCBs, DDTs, and heavy metals in Mississippi River Delta, Galveston Bay and Tampa Bay sediment cores. *Marine Environmental Research*, 52(1), 51–79. [https://doi.org/10.1016/s0141-1136\(00\)00260-9](https://doi.org/10.1016/s0141-1136(00)00260-9)
- Santschi, P. H., Presley, B. J., Wade, T. L., Garcia-Romero, B., & Baskaran, M. (2001). Historical contamination of PAHs, PCBs, DDTs, and heavy metals in Mississippi River Delta, Galveston Bay and Tampa Bay sediment cores. *Marine Environmental Research*, 52(1), 51–79. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(00\)00260-9](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(00)00260-9)
- Sañudo-Wilhelmy, S. A., & Flegal, A. R. (1992). Anthropogenic Silver In the Southern California Bight : A New Tracer of Sewage in Coastal Waters. *Environmental Science and Technology*, 26, 2147–2151.
- Schifter, I., González-Macías, C., Salazar-Coria, L., Sánchez-Reyna, G., & González-Lozano, C. (2015). Ecological and human risk assessment of long-term produced water discharge to the ocean at the Sonda de Campeche, Gulf of México. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 5813–5826. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4599-9>
- Schropp, S. J., Graham Lewis, F., Windom, H. L., Ryan, J. D., Calder, F. D., & Burney, L. C. (1990). Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element. *Estuaries*, 13(3), 227–235. <https://doi.org/10.2307/1351913>
- SEN. (1930). *Quinto Censo de Población (15 de mayo de 1930). Estado de Campeche*.
- Sherman, K. (1995). Achieving regional cooperation in the management of marine ecosystems: the use of the large marine ecosystem approach. *Ocean and Coastal Management*, 29(1–3), 165–185. [https://doi.org/10.1016/0964-5691\(96\)00015-4](https://doi.org/10.1016/0964-5691(96)00015-4)
- Soberanes, J., & Treviño, F. (1997). Capítulo cuarto: Derecho Ambiental Mexicano. In S. F. J. L. & T. M. F.J. (Eds.), *El derecho ambiental en América del norte y el sector eléctrico mexicano* (pp. 149–172). Retrieved from <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/1/146/10.pdf>
- Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *Ambios*, 36(8), 614–621.
- Steffen, W., Sanderson, R. A., Tyson, P., Jäger, J., Matson, P., Moore III, B., ... Wasson, R. . (2006). *Global change and the earth system: a planet under pressure* (1st editio). Springer Science & Business Media.

- Stern, D. I. (1998). Progress on the environmental Kuznets curve? *Environment and Development Economics*, 3(2), 173–196. <https://doi.org/10.1017/S1355770X98000102>
- Swarzenski, P. W., Baskaran, M., Rosenbauer, R. J., & Orem, W. H. (2006). Historical trace element distribution in sediments from the Mississippi River delta. *Estuaries and Coasts*, 29(6 B), 1094–1107. <https://doi.org/10.1007/BF02781812>
- Teng, Y., Ni, S., Zhang, C., Wang, J., Lin, X., & Huag, Y. (2006). Environmental geochemistry and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25, 379–385.
- Tiezzi, E. (2008). La revolución verde tragedia en dos actos. *Revista Ciencias*, 1(91), 21–29.
- Toro, J. V. (1995). *La política agrícola y agraria de Adolfo Ruiz Cortines* (I. de I. H.-S. U. Veracruzana, Ed.).
- Torras, M., & Boyce, J. K. (1998). Income, inequality, and pollution: A reassessment of the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 25(2), 147–160. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00177-8)
- Trefry, J. H., & Presley, B. J. (1976). Heavy metals in sediments from San Antonio Bay and the northwest Gulf of Mexico. *Environmental Geology*, 1(5), 283–294. <https://doi.org/10.1007/BF02676717>
- UNEP. (1994). *Regional Overview of Land-Based Sources of Pollution in the Wider Caribbean Region*.
- UNEP. (2013). *Report of the United Nations Environment Programme ( UNEP ) UNEP Activities as They Relate to the 2013 Proposed Thematic Priorities of the UN - Permanent Forum on Indigenous Issues : Health , Education and Culture as well as Other Environmentally Related*.
- Valette-Silver, N. J. (2006). The Use of Sediment Cores to Reconstruct Historical Trends in Contamination of Estuarine and Coastal Sediments. *Estuaries*, 16(3), 577. <https://doi.org/10.2307/1352796>
- Vaz da Costa, R. (1970). Crecimiento de la población y desarrollo económico. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 4(02), 210. <https://doi.org/10.24201/edu.v4i02.1534>
- Villanueva, S., & Vázquez-Botello, A. (1992). Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: una revisión. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 8(1), 47–61.
- Visviki, I., & Rachlin, J. W. (1991). The toxic action and interactions of copper and cadmium to the marine Alga *Dunaliella minuta*, in both acute and chronic exposure. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 20(2), 271–275. <https://doi.org/10.1007/BF01055915>
- Vitousek, P. (1994). Beyond Global Warming: Ecology and Global Change. *Ecology*, 75(7), 1861–1876. <https://doi.org/doi:10.2307/1941591>
- Volke-Sepúlveda, T., Velasco-Trejo, J. A., & Rosa-Pérez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Weintraub, S., Rubio, L., & Alan, F. (1992). *INTEGRACION INDUSTRIAL MEXICO- ESTADOS UNIDOS : el reto de libre comercio* (Primera). México: Diana.
- Welti-Chanes, C. (1994). La Demografía en México, las etapas iniciales de su evolución y sus

aportaciones al desarrollo nacional. *Papeles de Población*, 17(69), 9–47. Retrieved from <https://bit.ly/2mIMXF3>

- Wilhelmsson, D., Thompson, R. C., Holmström, K., Lindén, O., & Eriksson-Hägg, H. (2013). Marine pollution. In K. J. Noone, U. R. Sumaila, & R. J. Diaz (Eds.), *Managing ocean environments in a changing climate. Sustainability and economic perspectives* (1st ed., pp. 127–169). <https://doi.org/10.1093/oso/9780198726289.001.0001>
- Wolfe, S. H., & Drew, R. D. (1990). An ecological characterization of the Tampa Bay watershed. In *U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report*.
- Womack, J. J. (2012). La Economía en la Revolución (1910-1920). Historiografía y Análisis. *UAM- Unidad Xochimilco*, 13–56. Retrieved from <https://goo.gl/7D4G8S>
- Yates, K. K., & Greening, H. (2011). Chapter 1 . An Introduction to Tampa Bay. In K. K. Yates, H. Greening, & G. Morrison (Eds.), *Integrating Science and Resource Management in Tampa Bay, Florida* (pp. 1–16). U.S. Geological Survey Circular.
- Zarbock, H. W., Janicki, A. J., Logan, D. T., & MacDonald, D. . (1996). *An Assessment of sediment contamination Tampa Bay, Florida using the sediment quality triad approach*. St. Petersburg, Florida.
- Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Mateos-Jasso, A., Morey, S. L., & Martínez-López, B. (2014). The response of the Gulf of Mexico to wind and heat flux forcing: What has been learned in recent years? *Atmosfera*, 27(3), 317–334. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(14\)71119-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(14)71119-1)
- Zhang, C., Yu, Z. gang, Zeng, G. ming, Jiang, M., Yang, Z. zhu, Cui, F., ... Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.010>
- Zuur, A., Ieno, E. N., & Smith, G. M. (2007). *Analysing Ecological Data* (A. F. Zuur, E. N. Ieno, & G. M. Smith, Eds.). New York: Springer-Verlag New York.
- Zuur, A., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). Things Are Not Always Linear ; Additive Modelling. In Alain Zuur, E. N. Ieno, N. Walker, A. A. Saveliev, & G. M. Smith (Eds.), *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R* (pp. 35–69). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>

#### BASES DE DATOS:

Banco Mundial. (mayo 2019). *Datos banco mundial*. <https://datos.bancomundial.org/pais/mexico>

UNINMAR. (marzo 2018). *Global Trends in Pollution of Coastal Ecosystems: GESAMP Working Group 39 database*. <http://uninmar.icmyl.unam.mx/collections/wg39-gesamp>

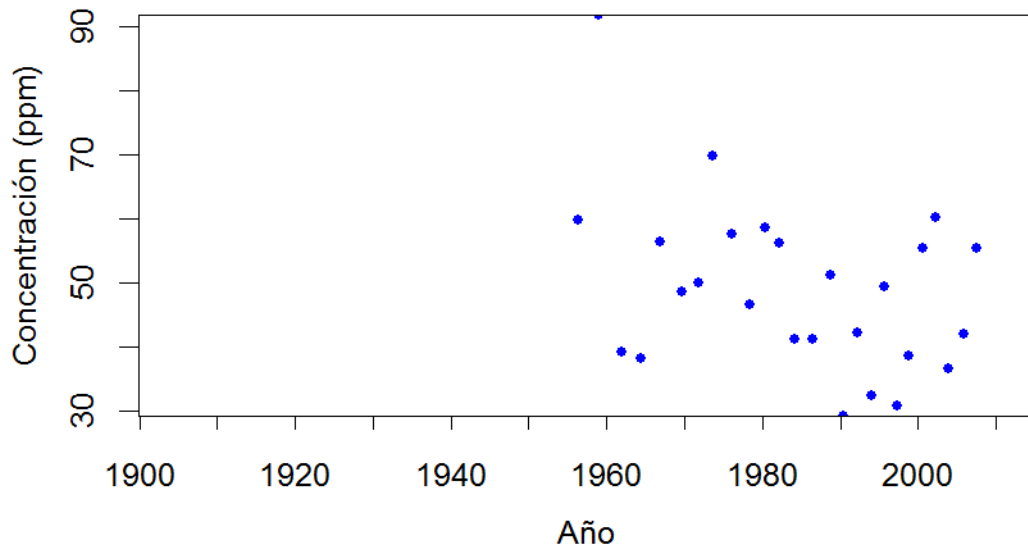
United states census bureau. (mayo 2019). *Population projections dataset*. <https://www.census.gov/>

## 11. ANEXOS

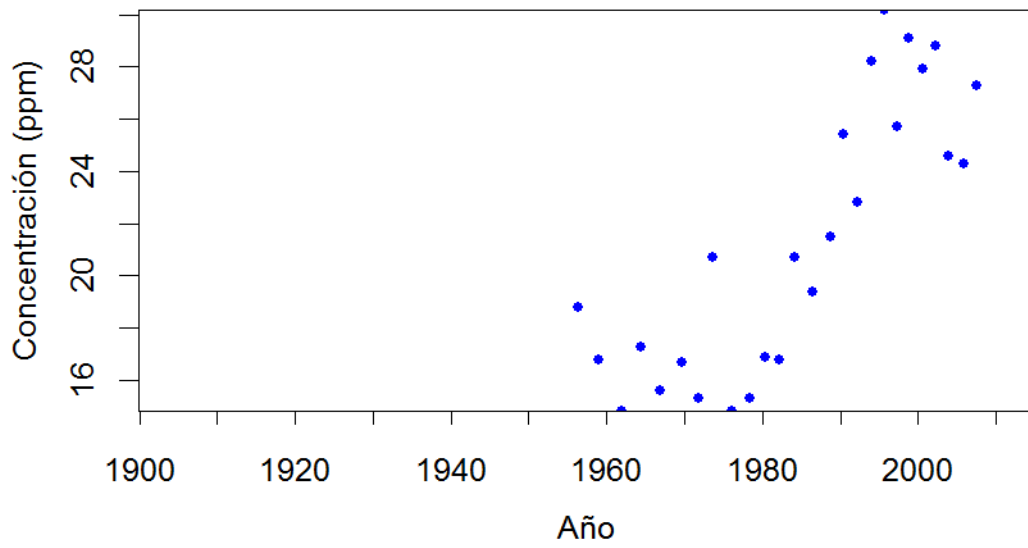
### 11.1. Series temporales de núcleos que sobrepasan el TEL y PEL

Código LME	Ubicación	TEL<EPT'S<PEL	EPT'S>PEL
LME05.004.01	Coatzacoalcos, Ver.	Cr Cu Hg Ni	
LME05.021.10	Atasta-Ciudad del Carmen, Campeche	Cd Cr Cu	Ni
LME05.021.07	Alvarado, Veracruz	Cr Cu Ni	
LME05.021.06	Nautla-Laguna Verde, Veracruz	Cr Cu Ni	
LME05.021.04	Laguna Madre y Delta del río Bravo, Tamaulipas	Cr Cu Ni	
LME05.017.02	Sonda de Campeche	Cd Ni	
LME05.021.03	Frente a Catemaco, Veracruz	Cr Cu	Ni
LME05.010.04	Tampico, Tamaulipas	Cr Ni	
LME05.010.02	Tampico, Tamaulipas	Cr Ni	
LME05.021.01	Frontera, Tabasco	Cr Cu	Ni
LME05.021.02	La Venta, Tabasco	Cr Cu	Ni
LME05.021.05	Tuxpan, Veracruz	Cr Cu	Ni
LME05.021.08	Campeche, Campeche	Cu Ni	
LME05.021.13	Petenes, Campeche	Cu Ni	Cd
LME05.011.01	Laguna Salada, Veracruz	Cu Zn	Cr Ni
LME05.021.12	Petenes, Campeche	Cu Ni	Cd
LME05.017.01	Paraiso, Tabasco	Cr	Ni
LME05.011.02	Laguna Salada, Veracruz	Cu	Cr Ni
LME05.021.11	Petenes, Campeche	Cu	
LME05.021.09	Nuevo Progreso, Campeche	Cu	Cd Cr Ni
LME05.010.01	Laguna de Tamiahua, Campeche	Ni	
LME05.010.03	Tampico, Tamaulipas	Ni	
LME05.009.01	La Antigua, Veracruz	Ni	
LME05.012.01	Isla del Carmen, Campeche		Cr

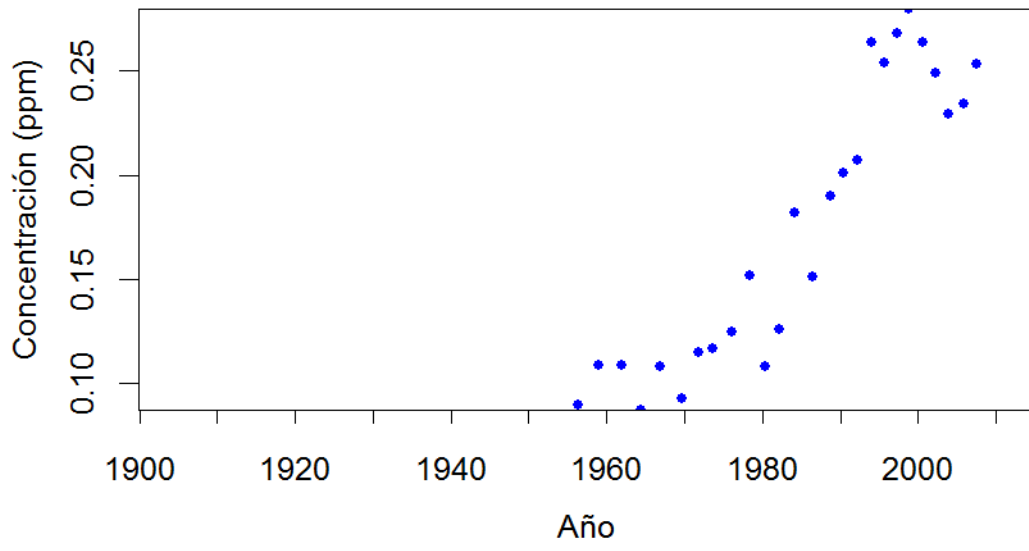
LME05.004.01.Cr



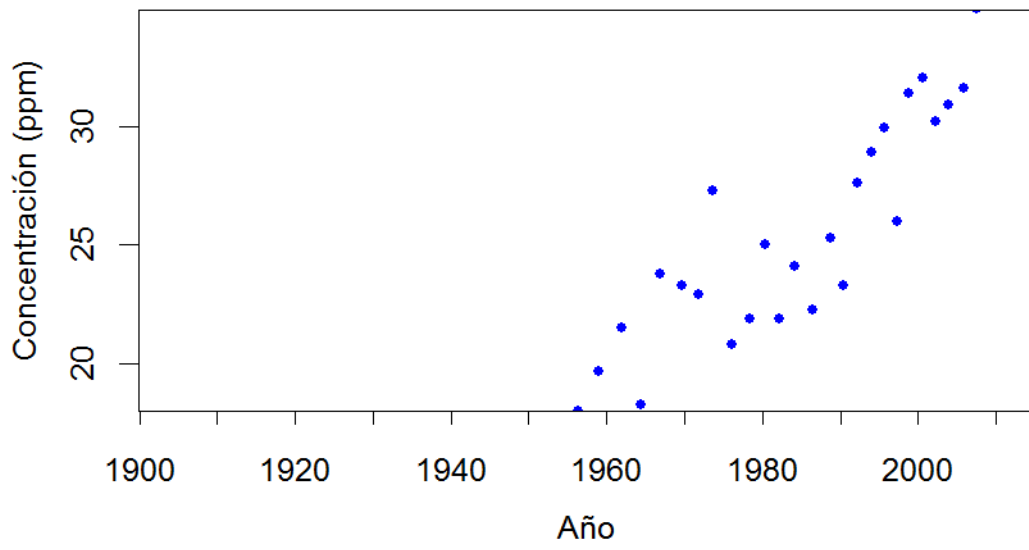
LME05.004.01.Cu



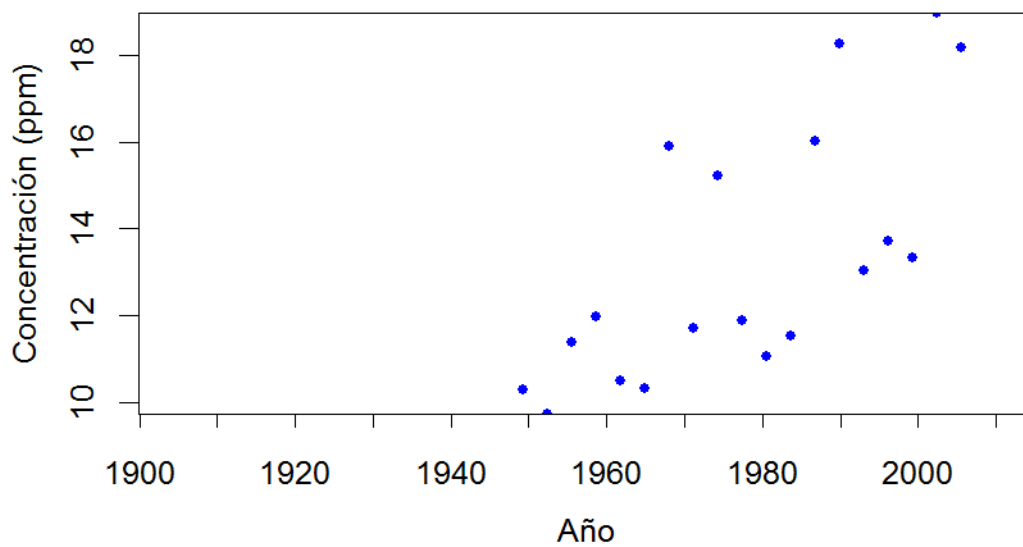
LME05.004.01.Hg



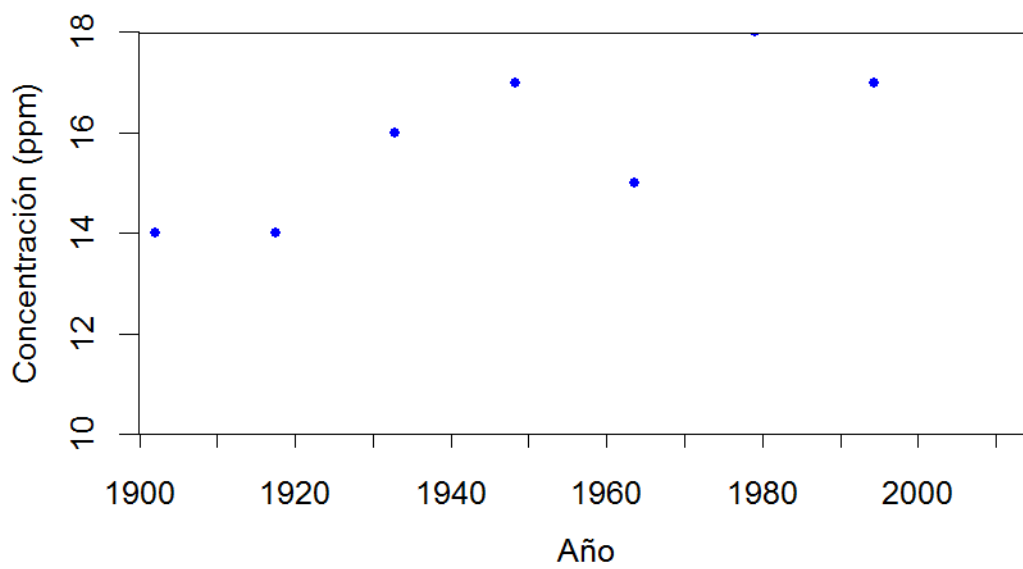
LME05.004.01.Ni



LME05.009.01.Ni

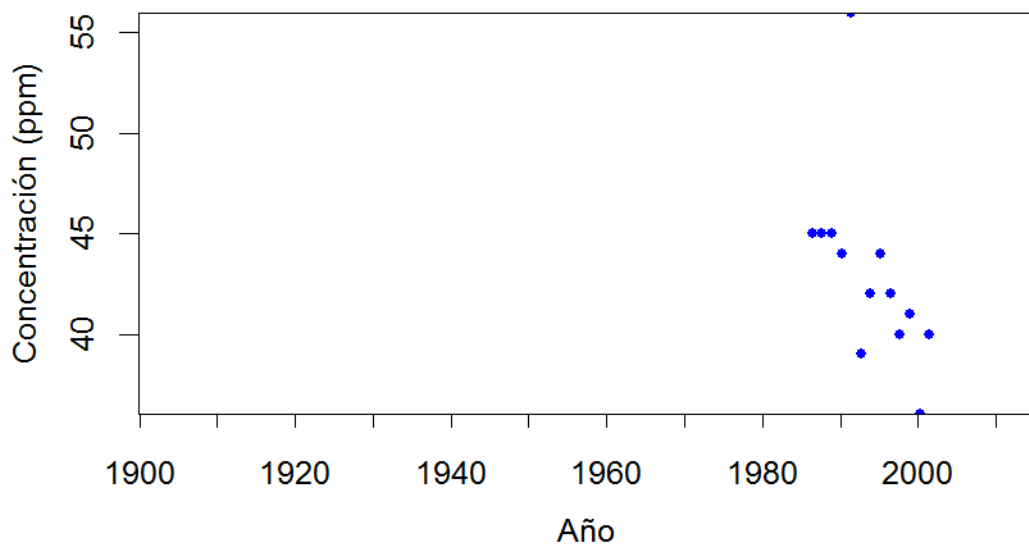


LME05.010.01.Ni

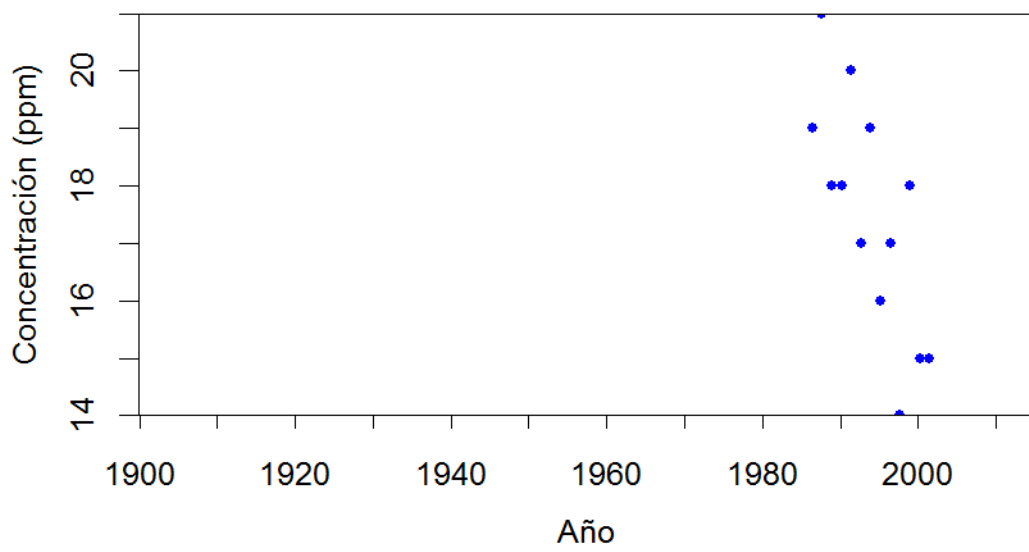




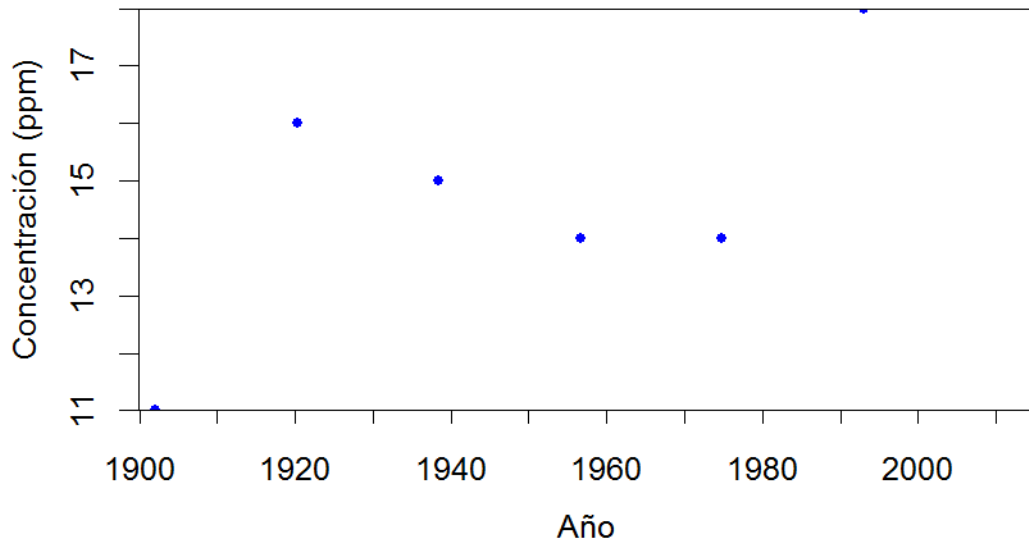
LME05.010.02.Cr



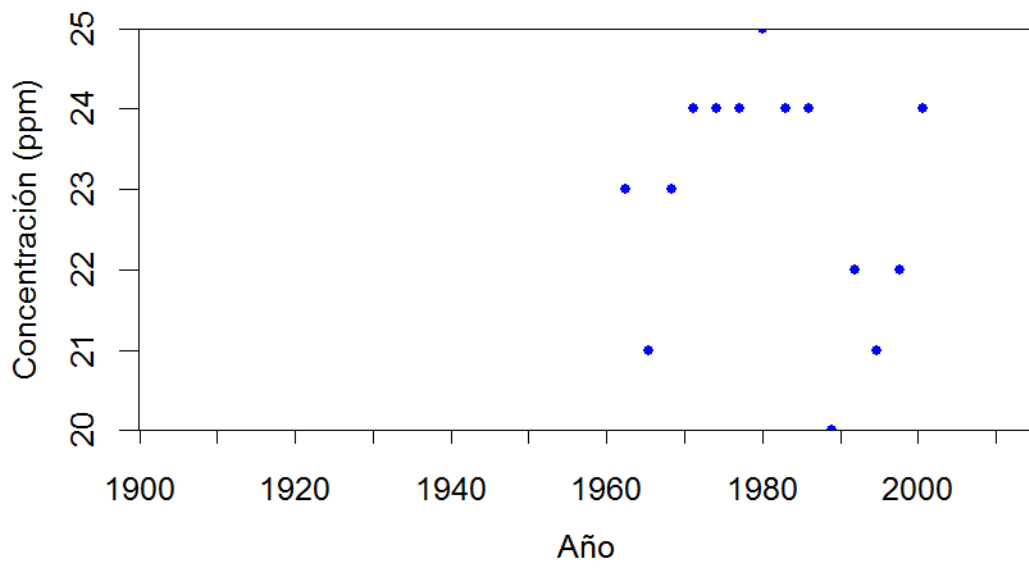
LME05.010.02.Ni



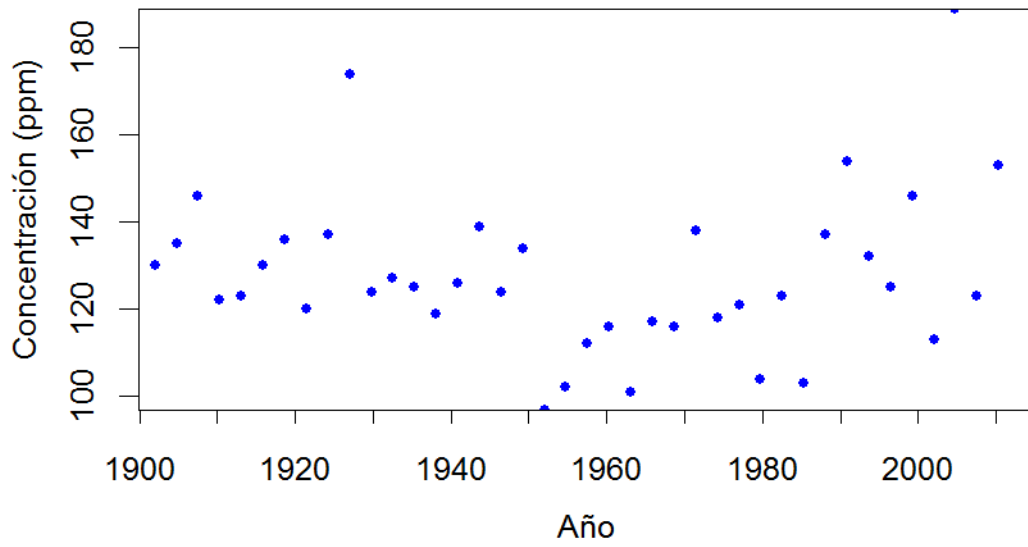
LME05.010.03.Ni



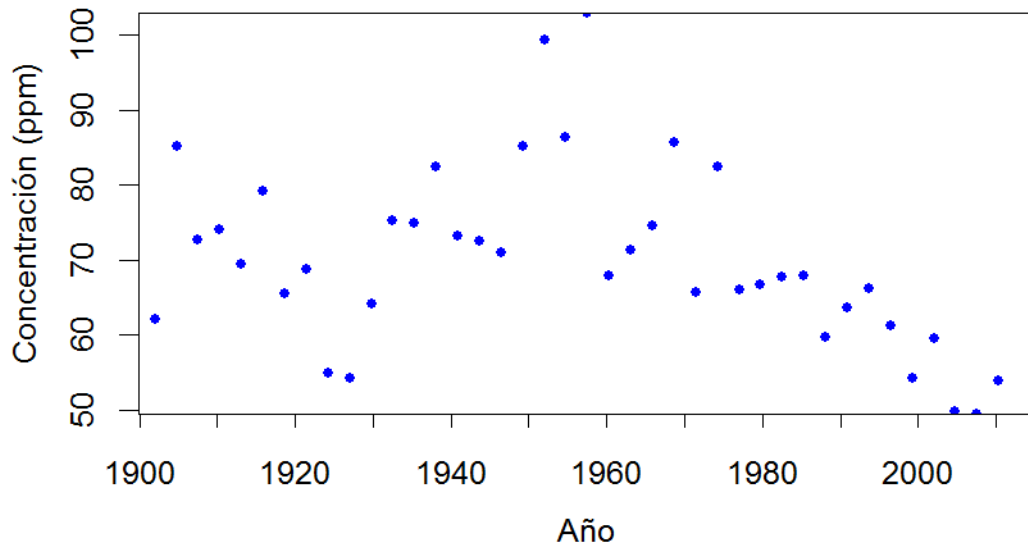
LME05.010.04.Ni



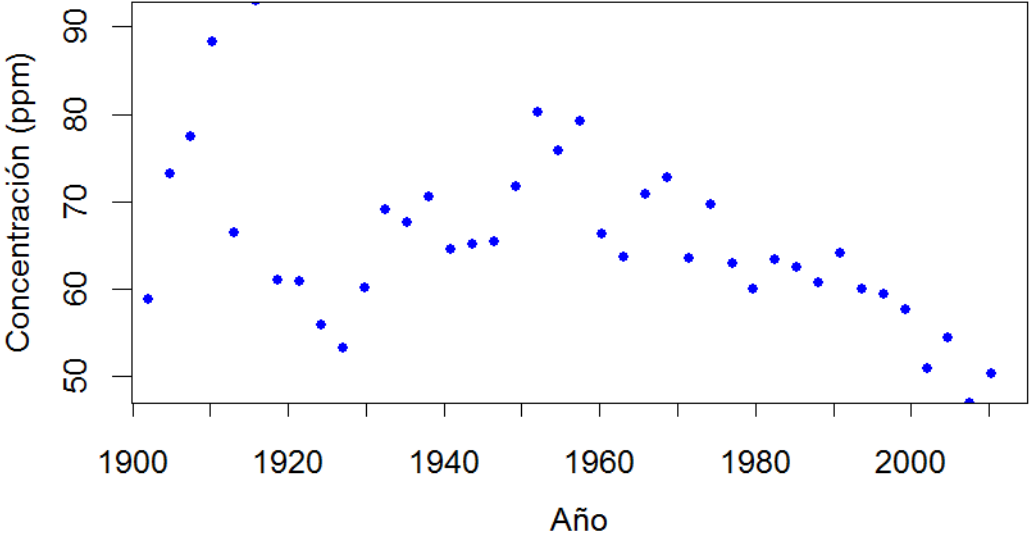
LME05.011.01.Cr



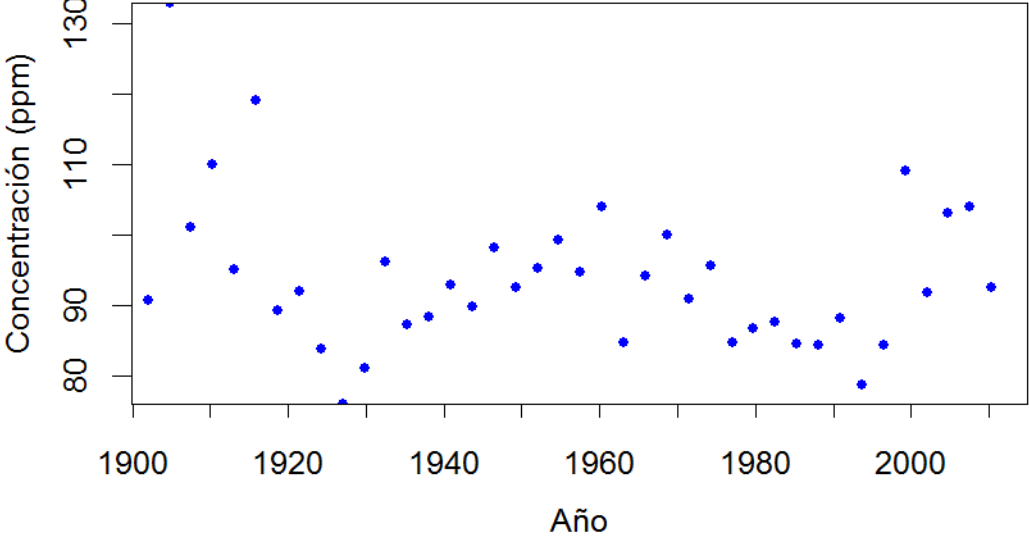
LME05.011.01.Cu



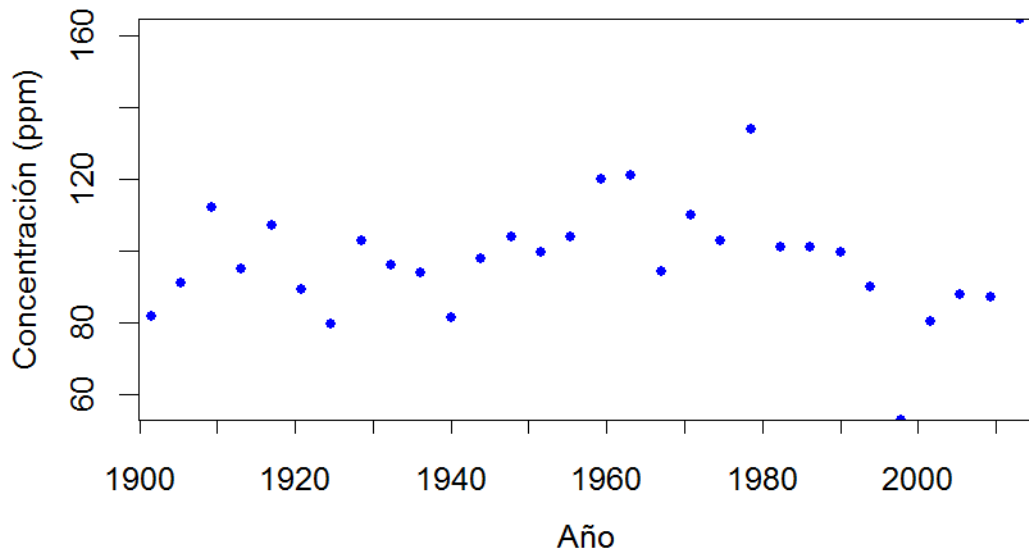
LME05.011.01.Ni



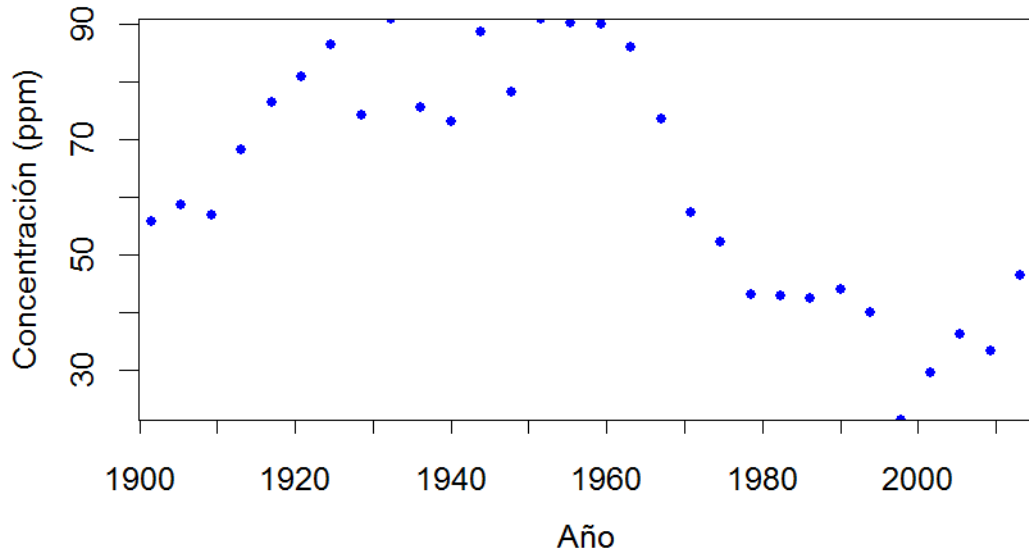
LME05.011.01.Zn



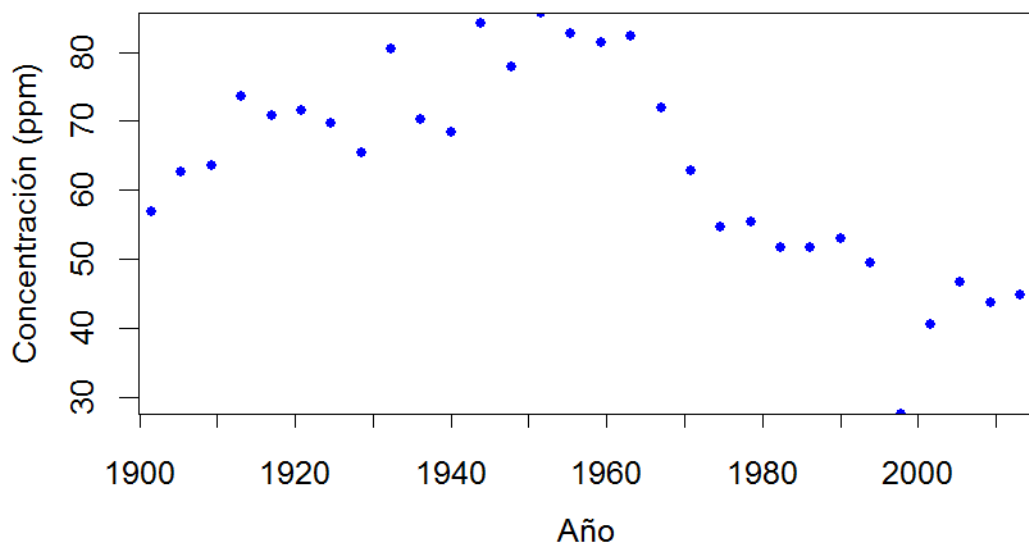
LME05.011.02.Cr



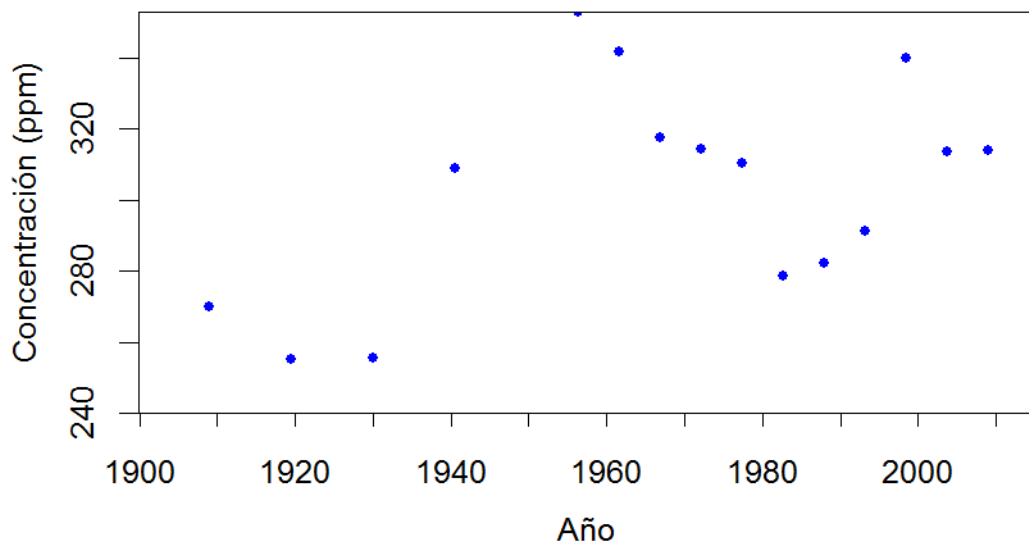
LME05.011.02.Cu



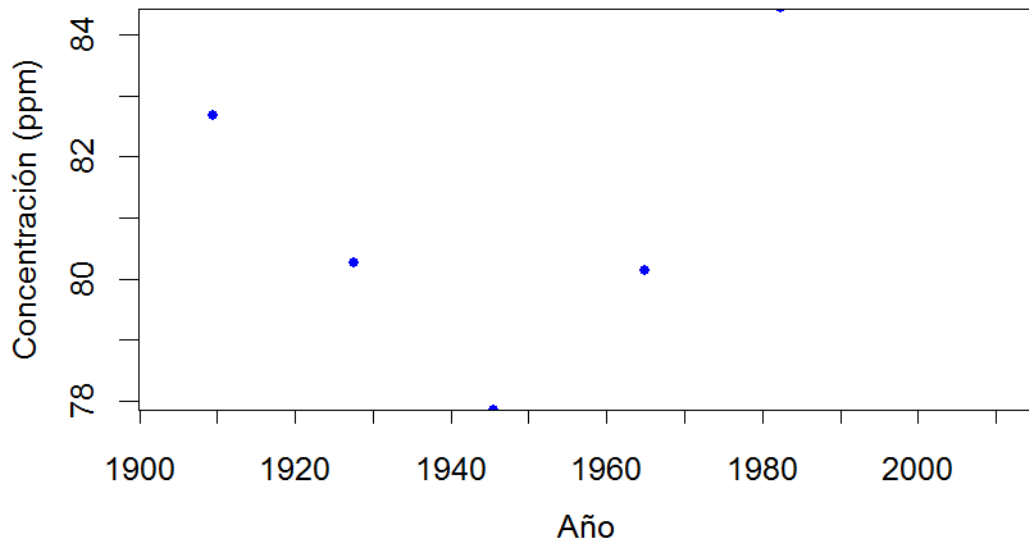
LME05.011.02.Ni



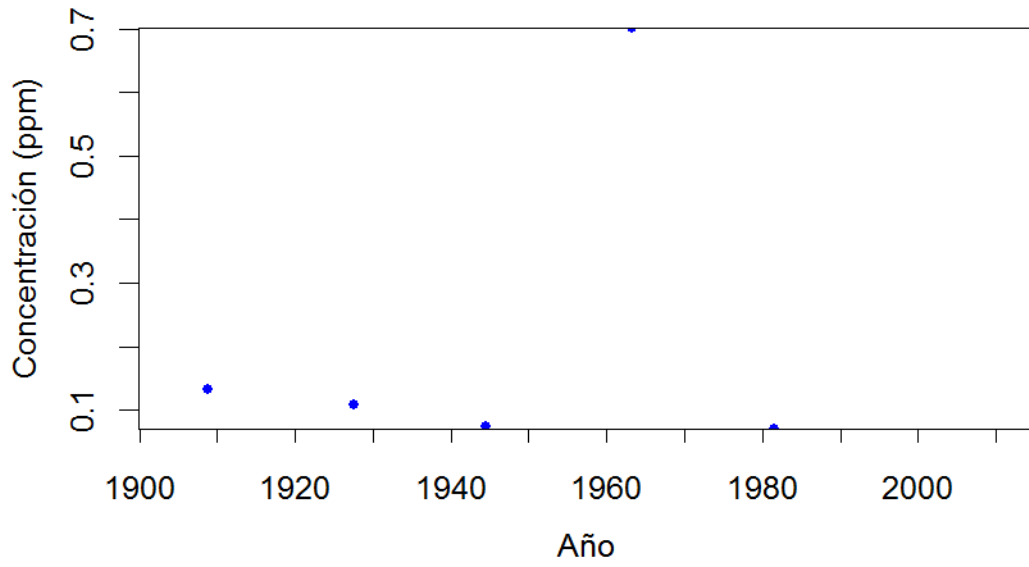
LME05.012.01.Cr



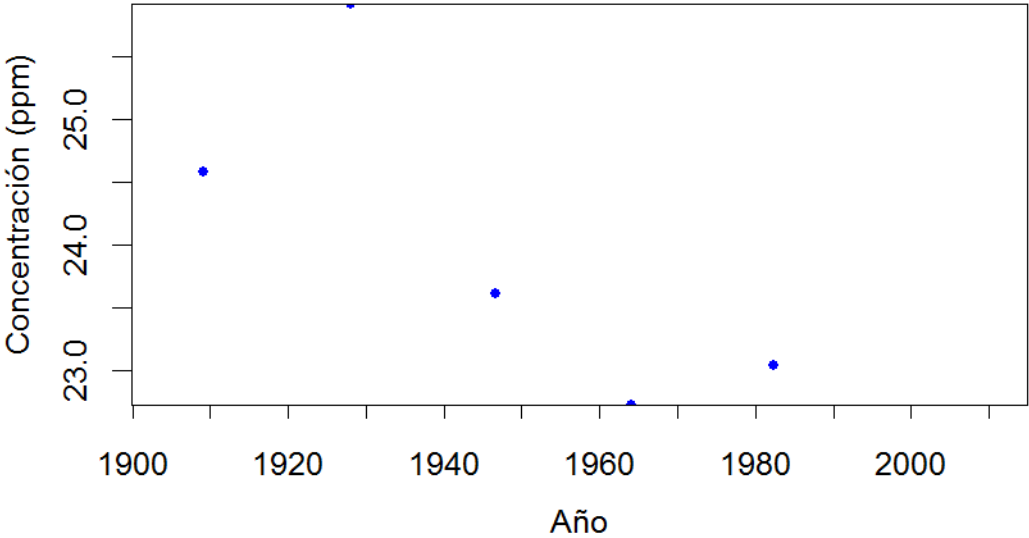
LME05.017.01.Cr



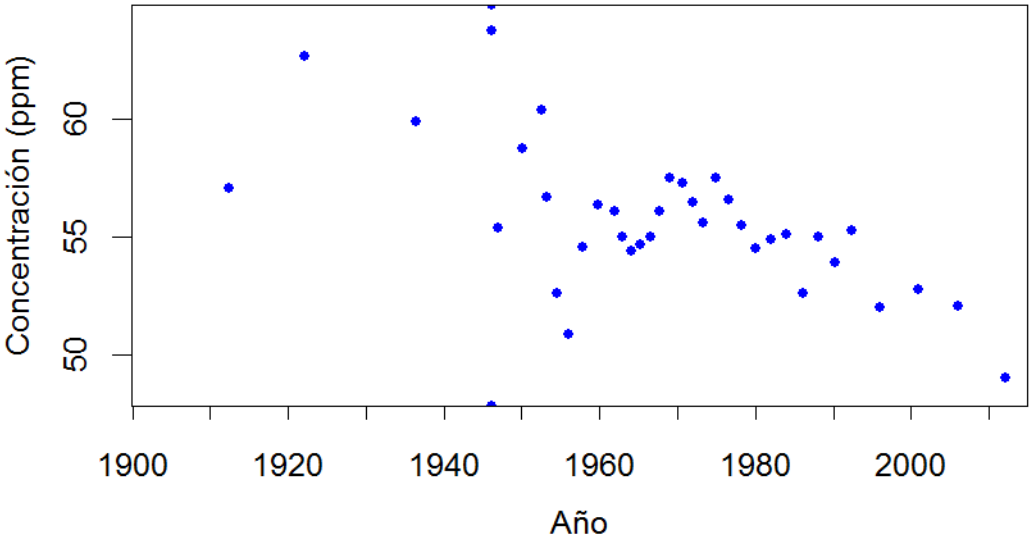
LME05.017.02.Cd



LME05.017.02.Ni

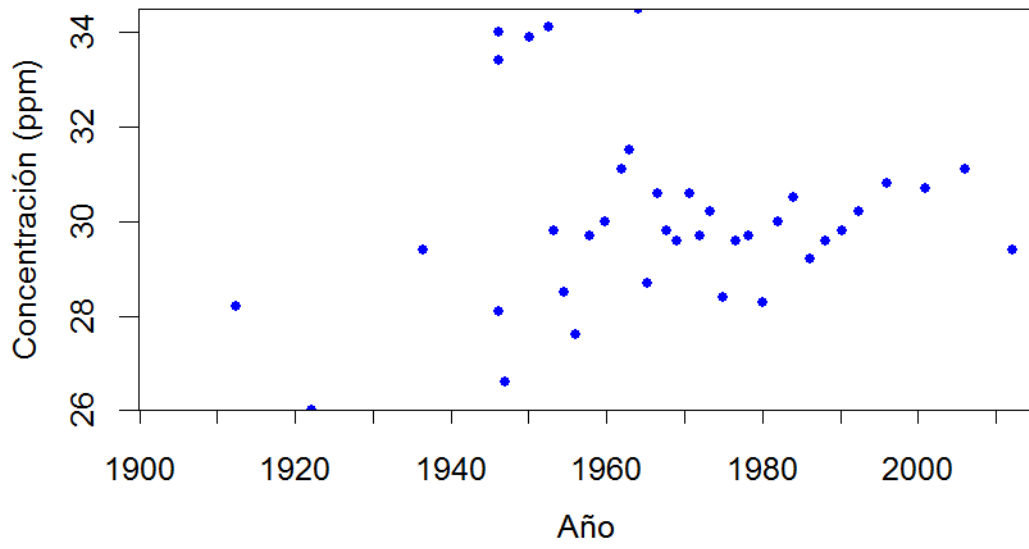


LME05.021.01.Cr

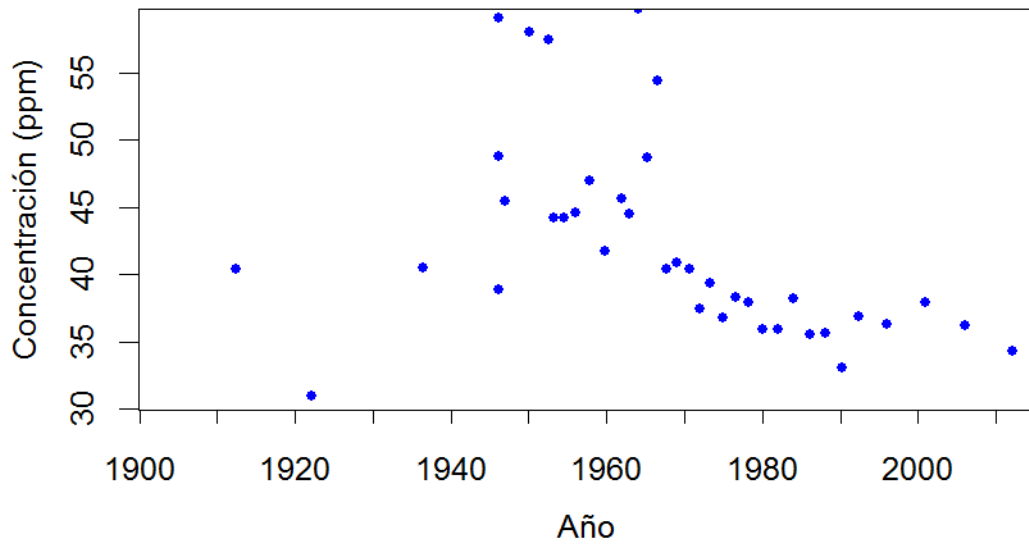




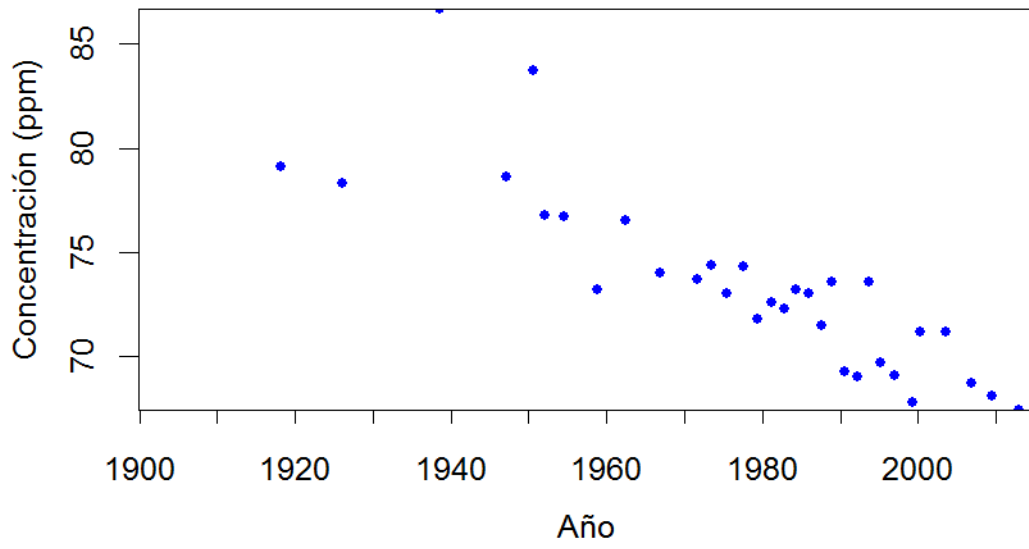
LME05.021.01.Cu



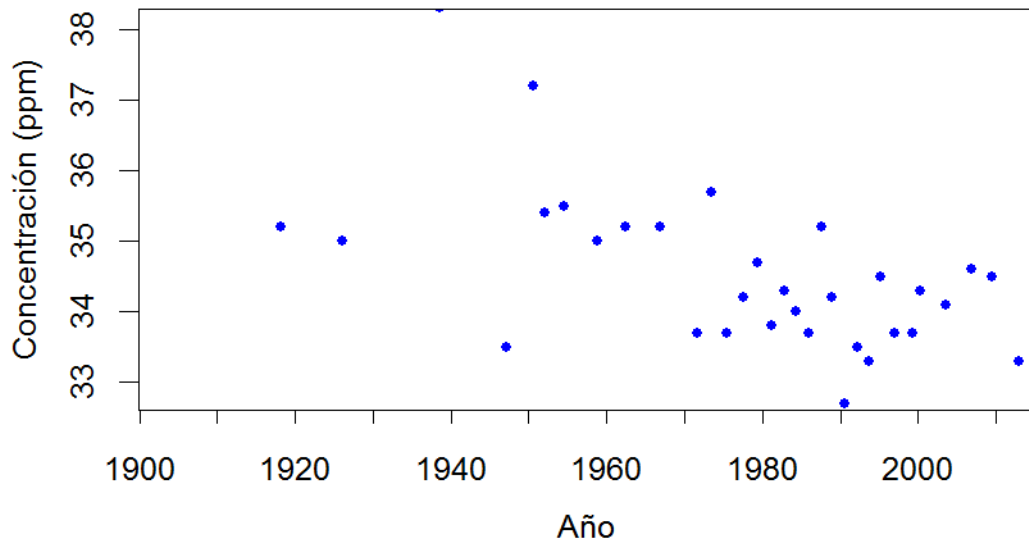
LME05.021.01.Ni



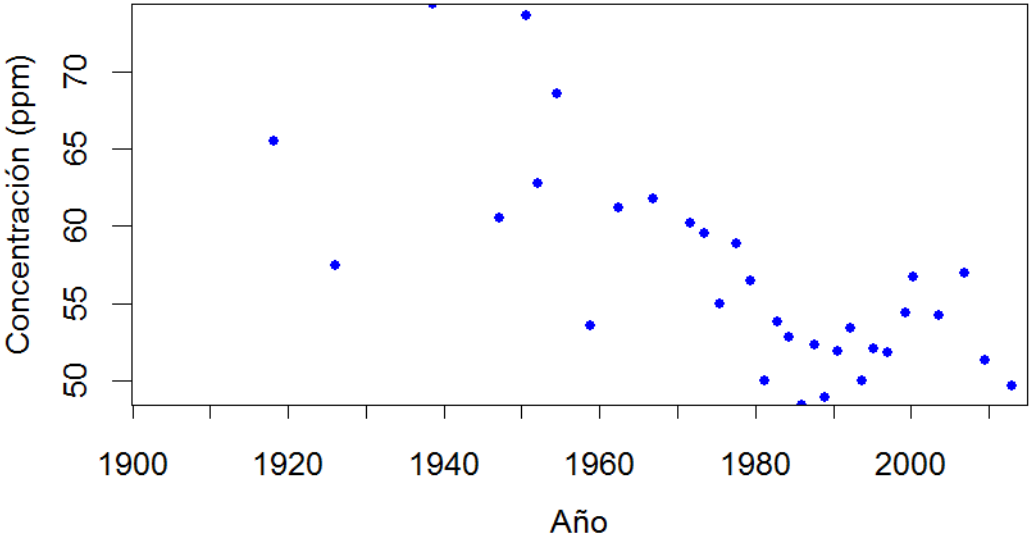
LME05.021.02.Cr



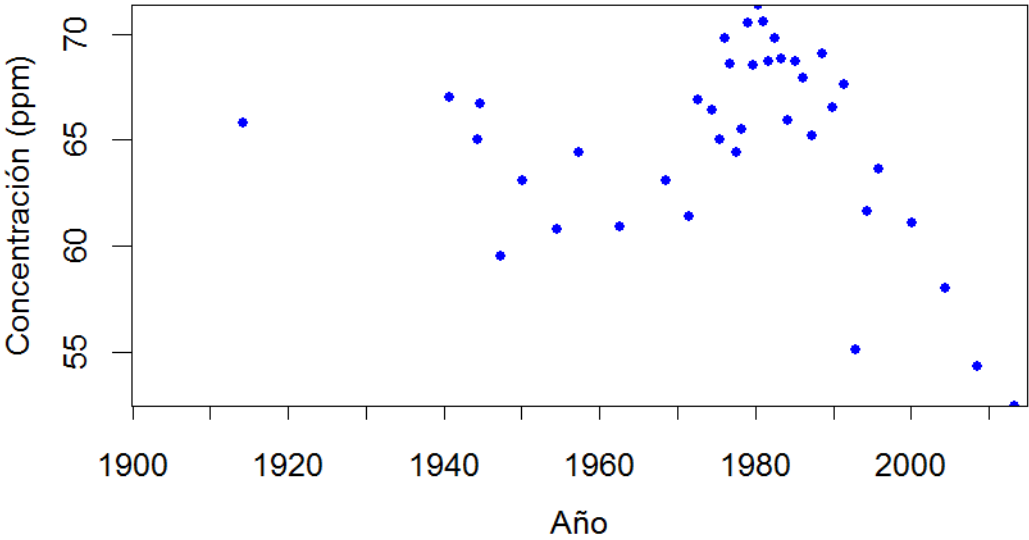
LME05.021.02.Cu



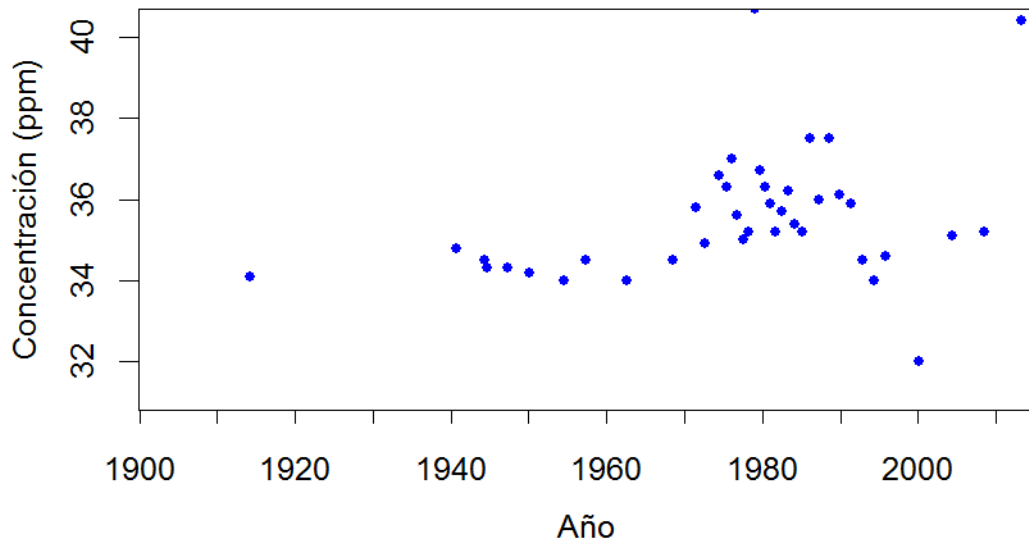
LME05.021.02.Ni



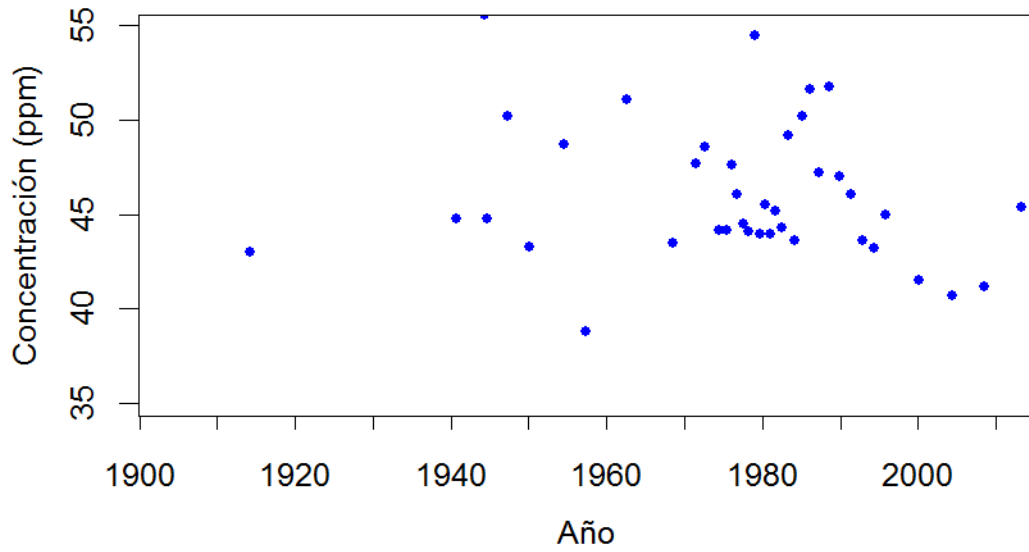
LME05.021.03.Cr



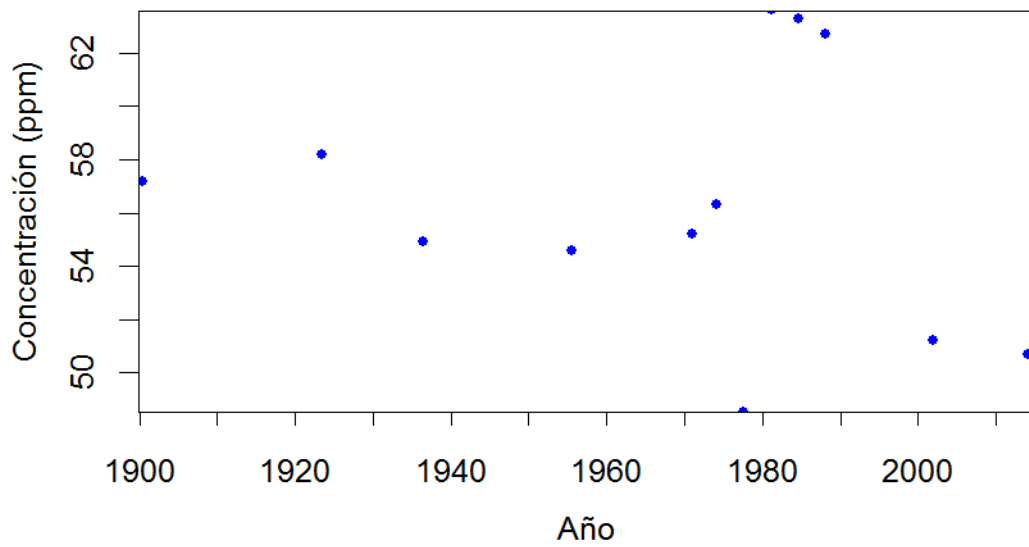
LME05.021.03.Cu



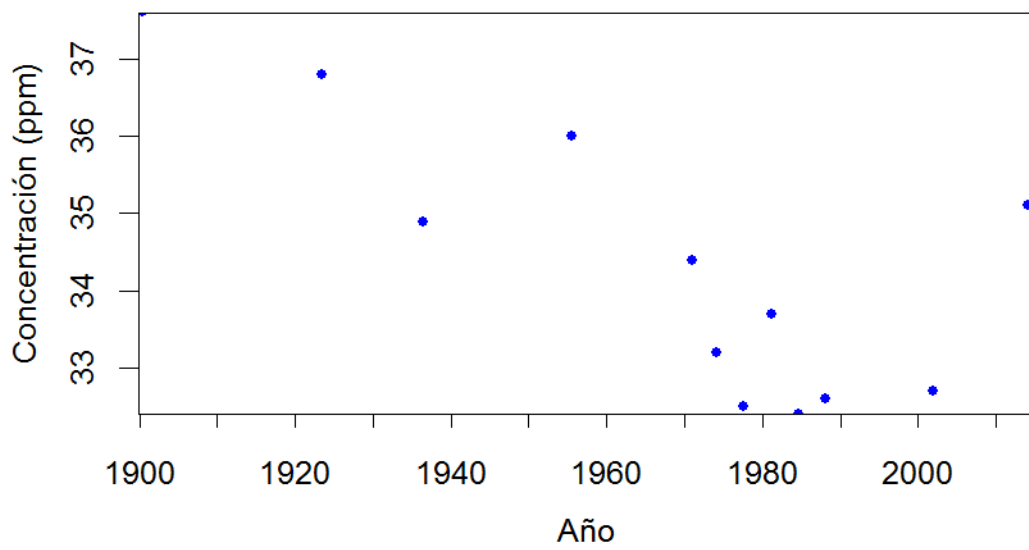
LME05.021.03.Ni



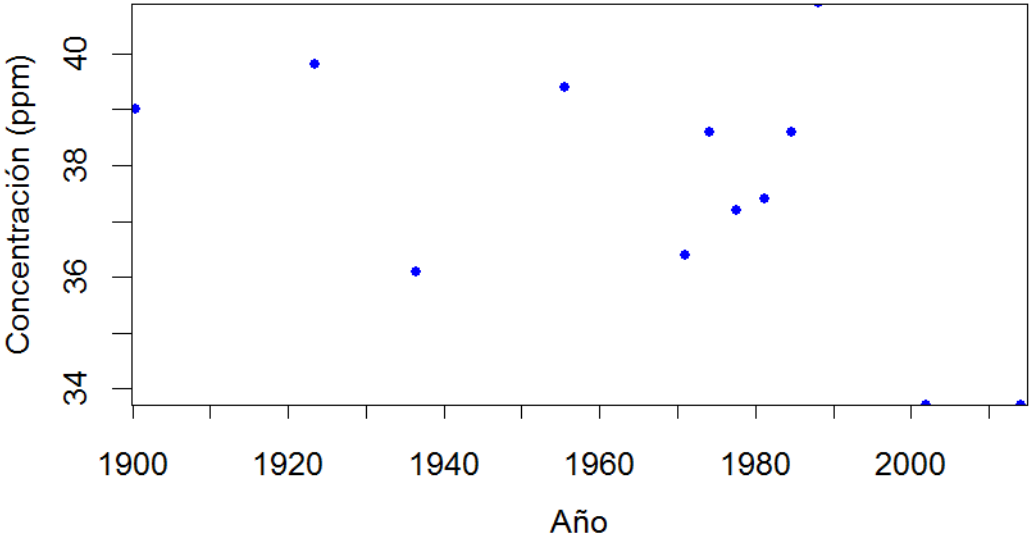
LME05.021.04.Cr



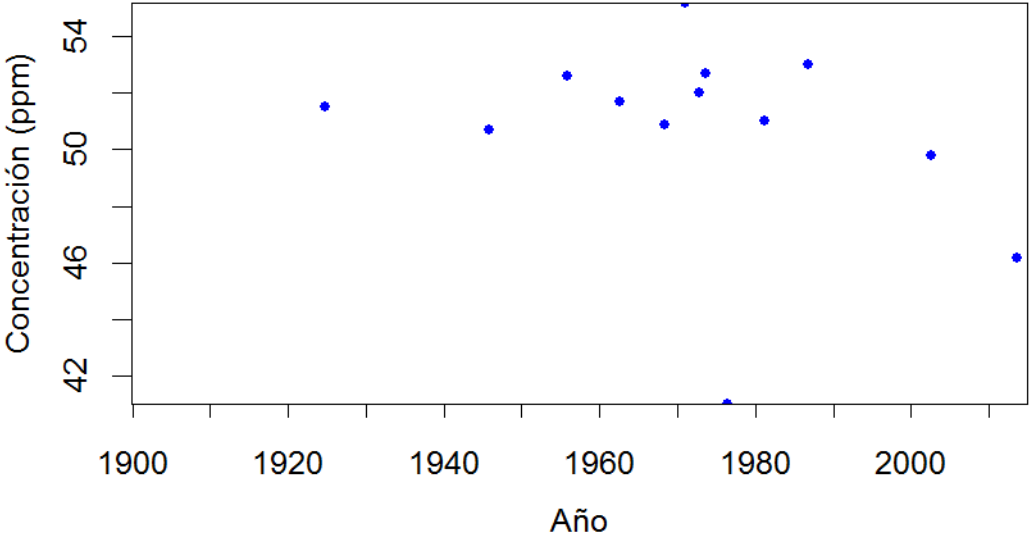
LME05.021.04.Cu



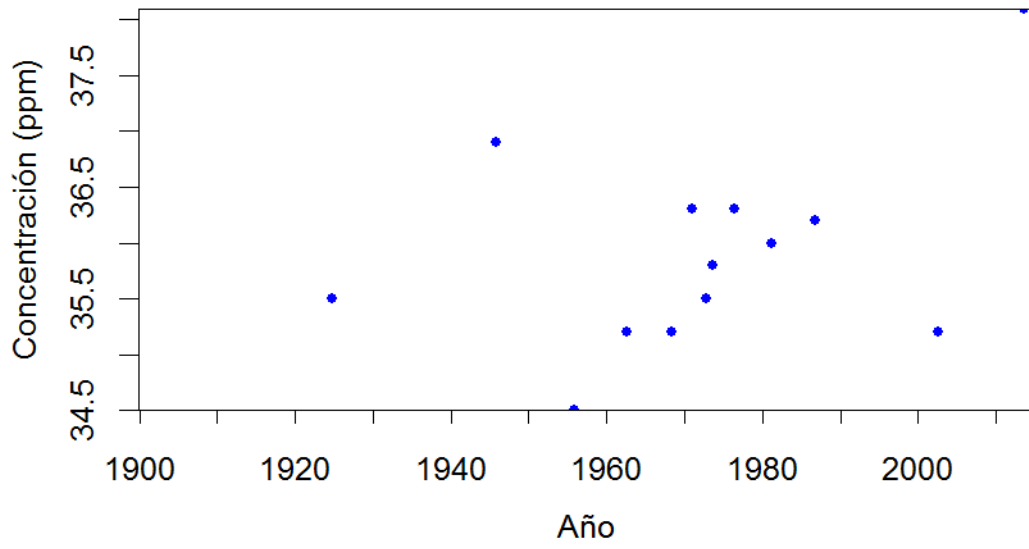
LME05.021.04.Ni



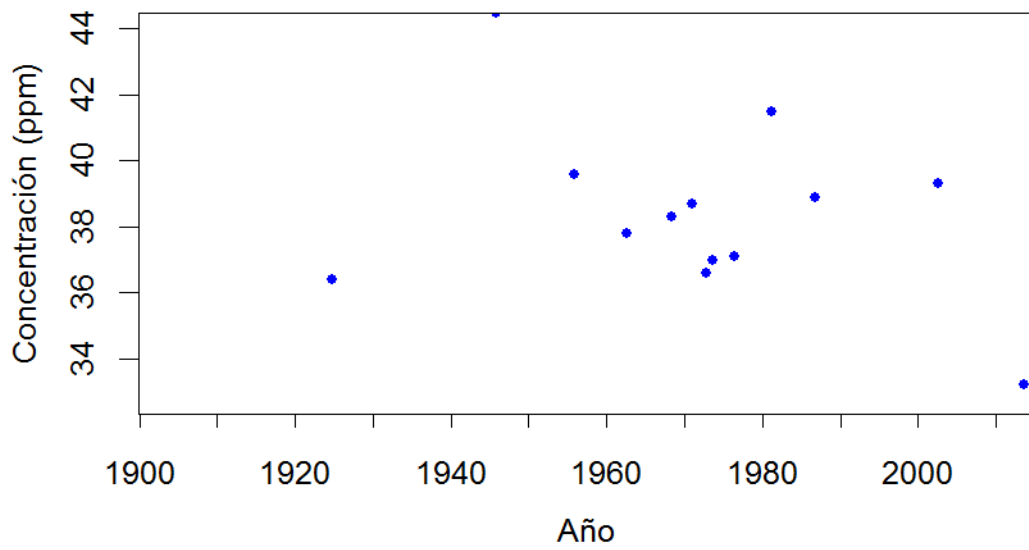
LME05.021.05.Cr



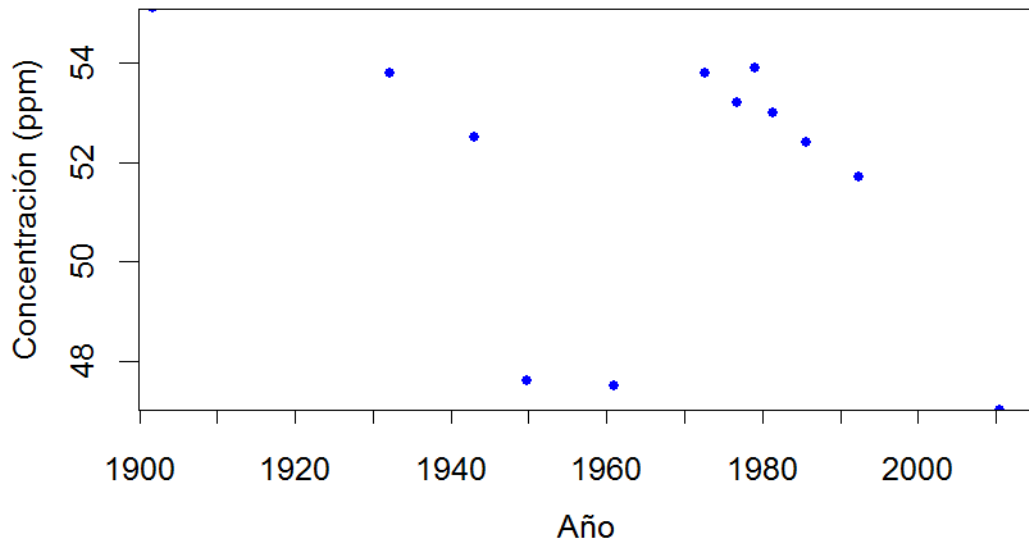
LME05.021.05.Cu



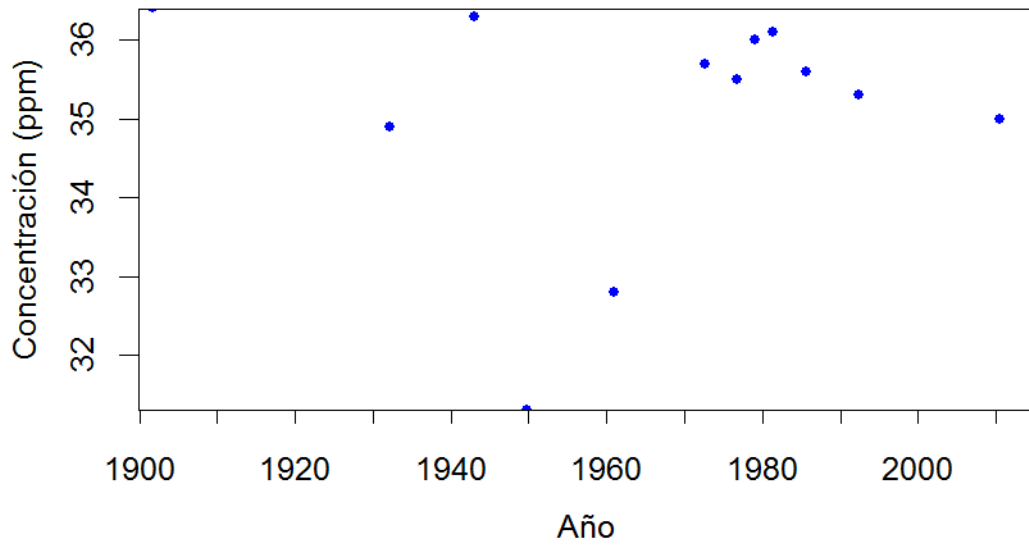
LME05.021.05.Ni



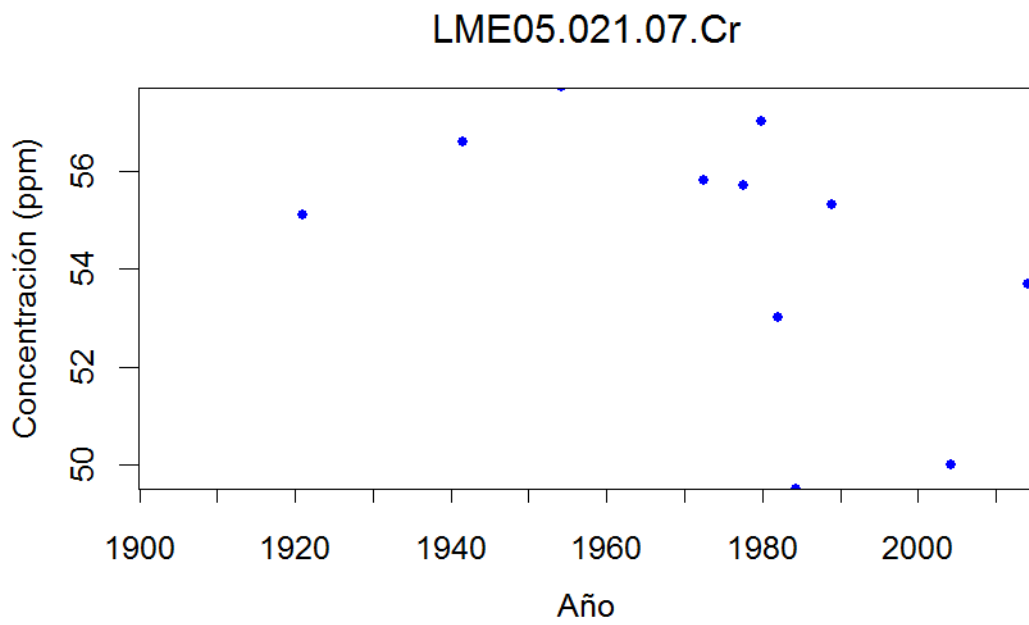
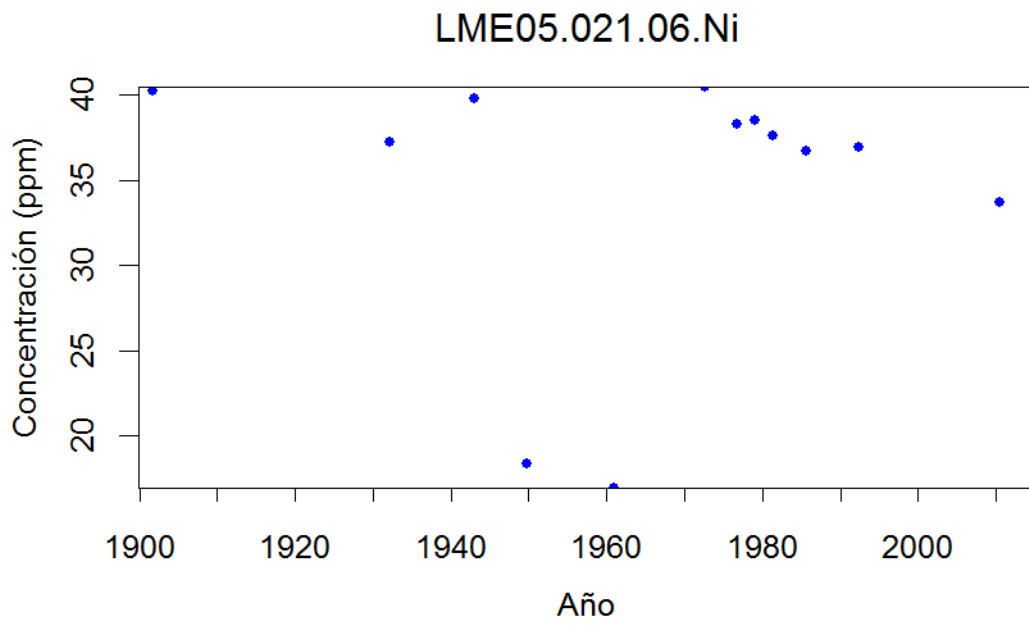
LME05.021.06.Cr

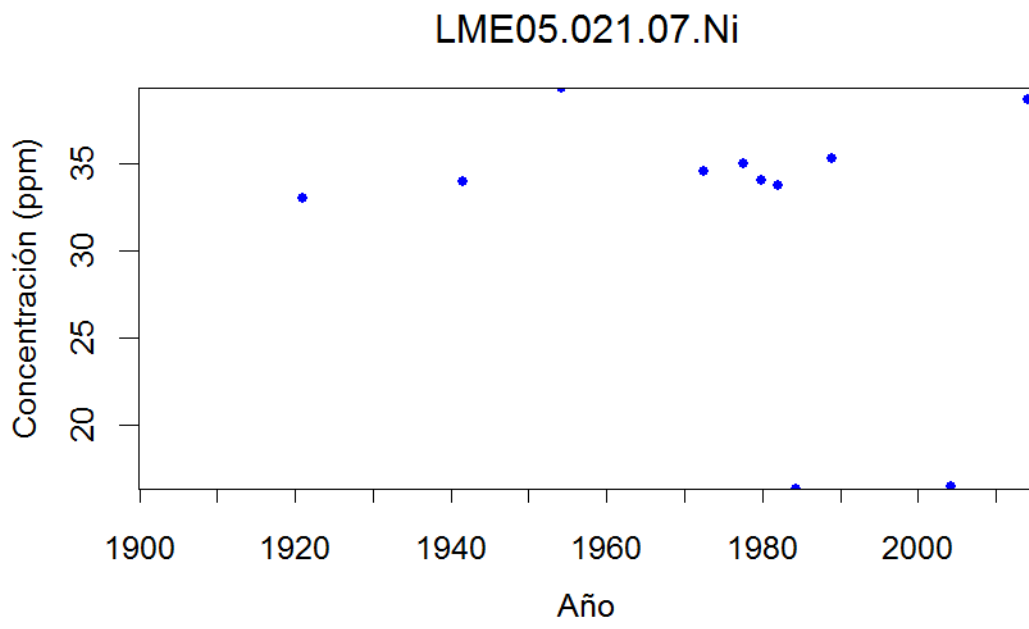
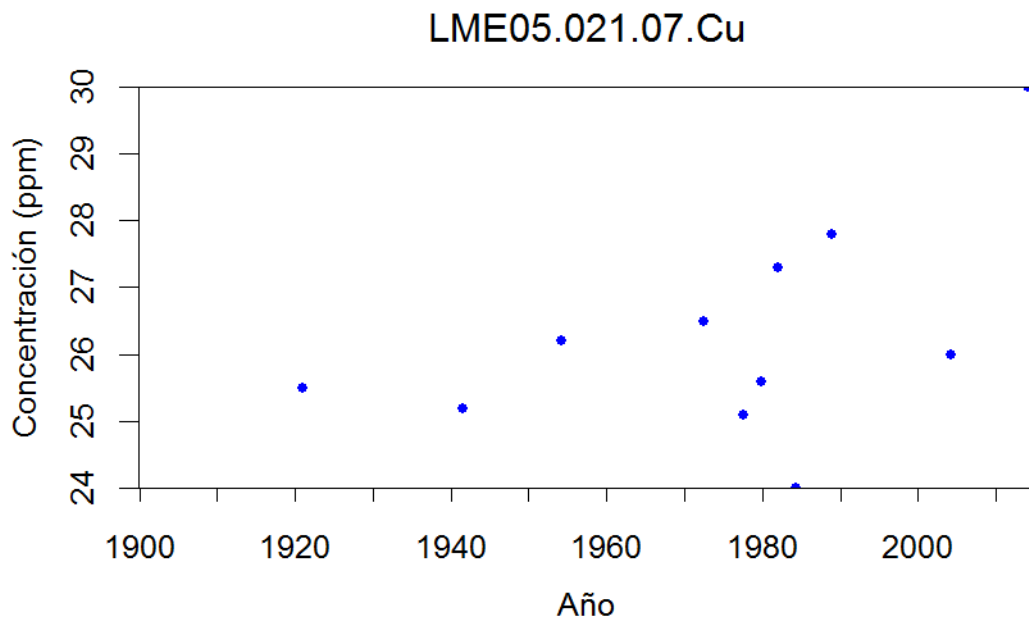


LME05.021.06.Cu

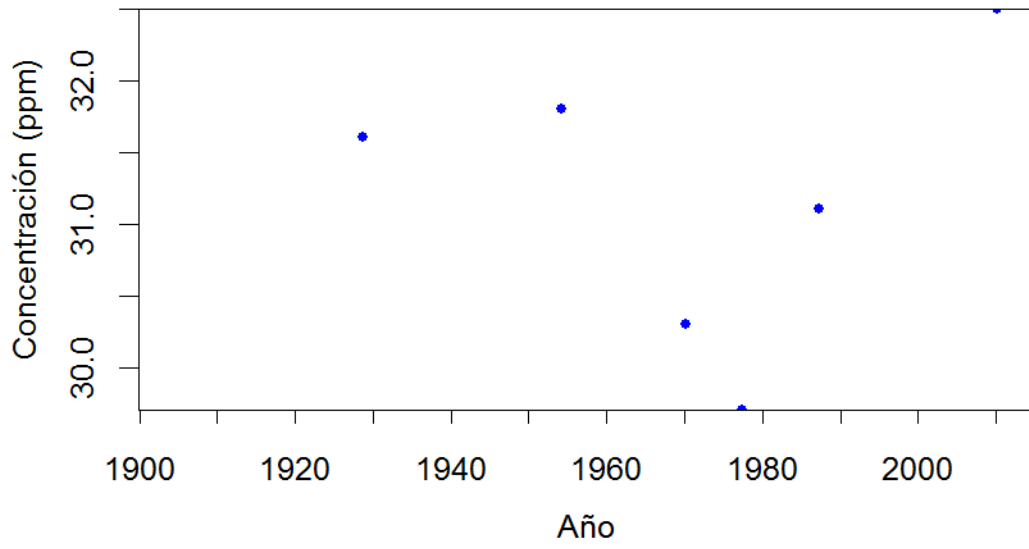




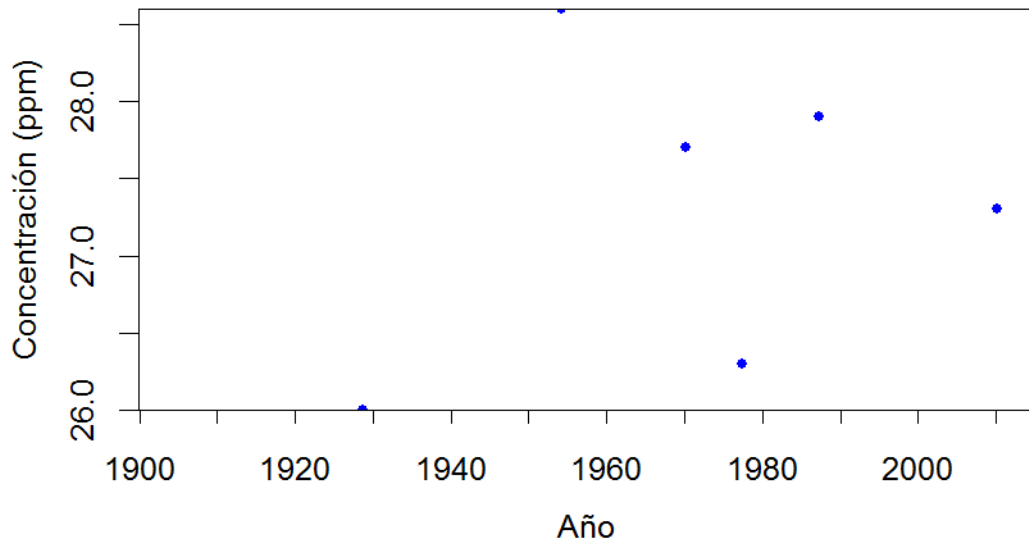




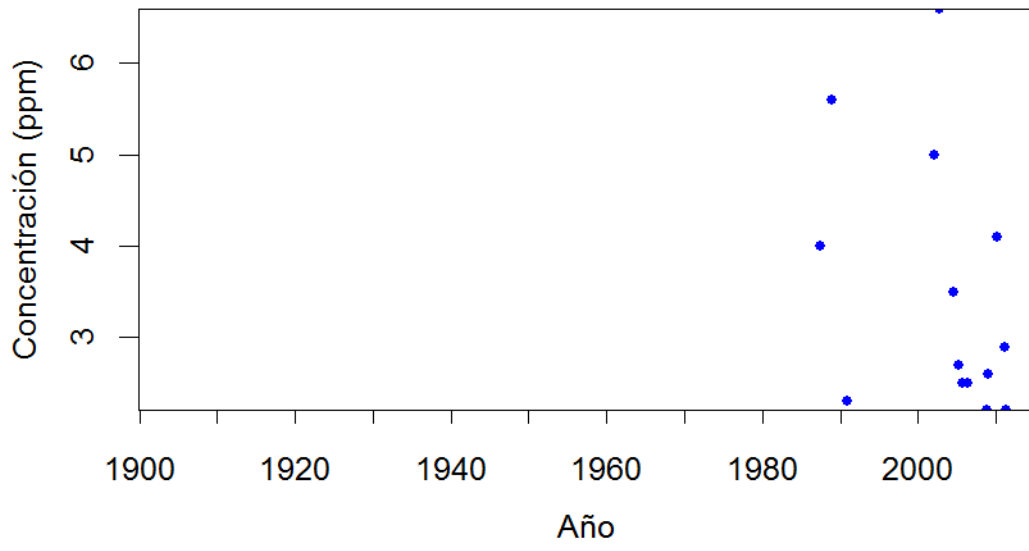
LME05.021.08.Cu



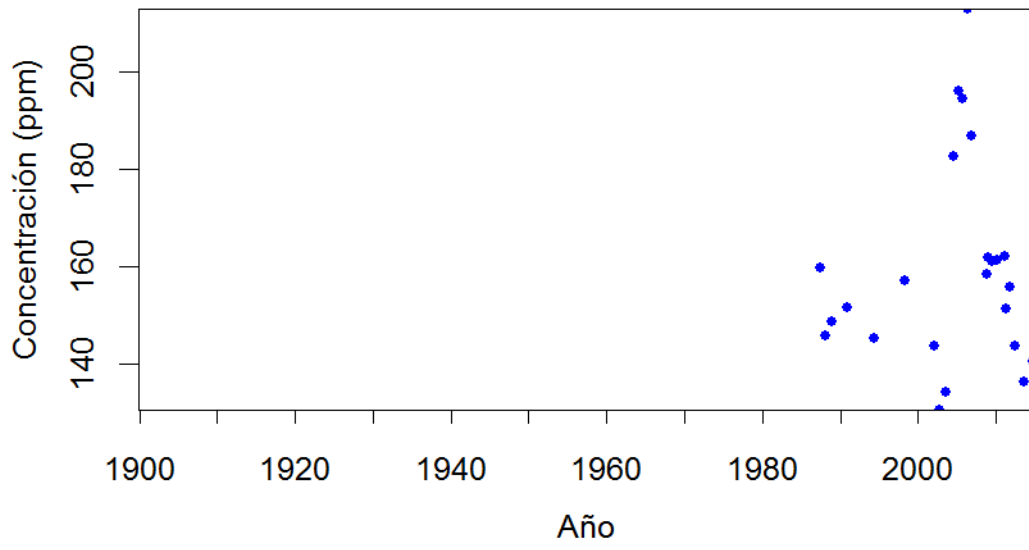
LME05.021.08.Ni



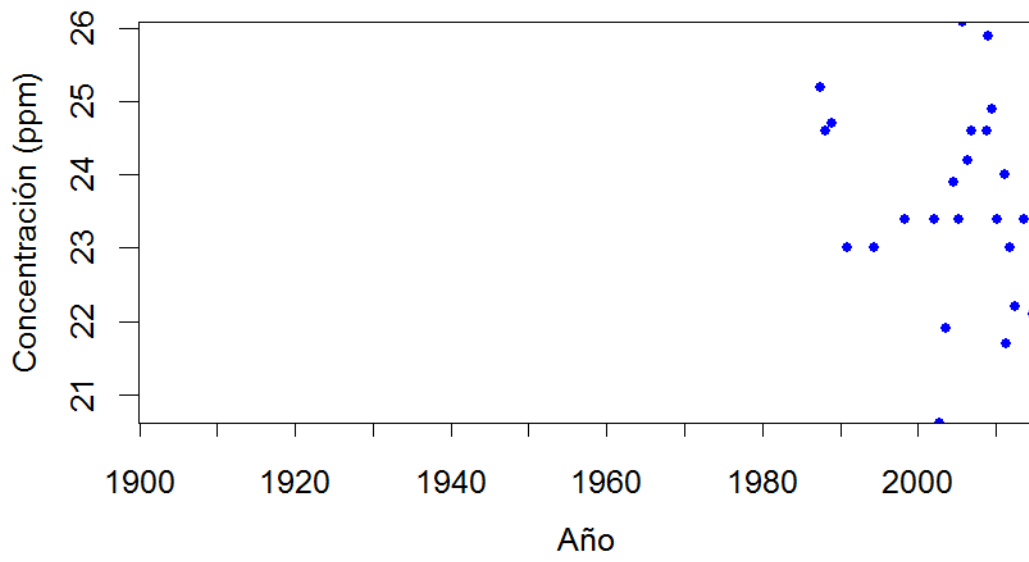
LME05.021.09.Cd



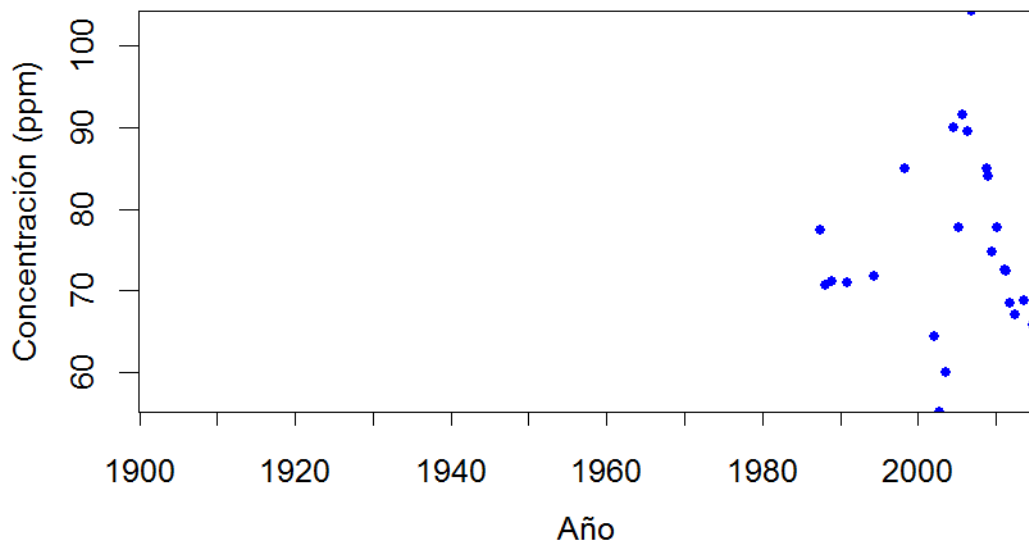
LME05.021.09.Cr

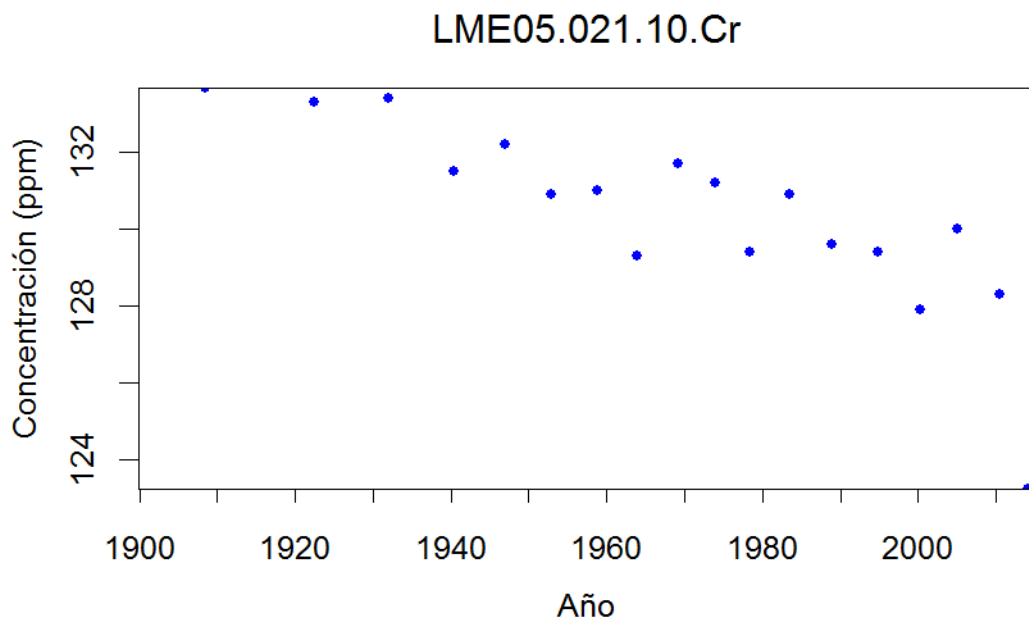
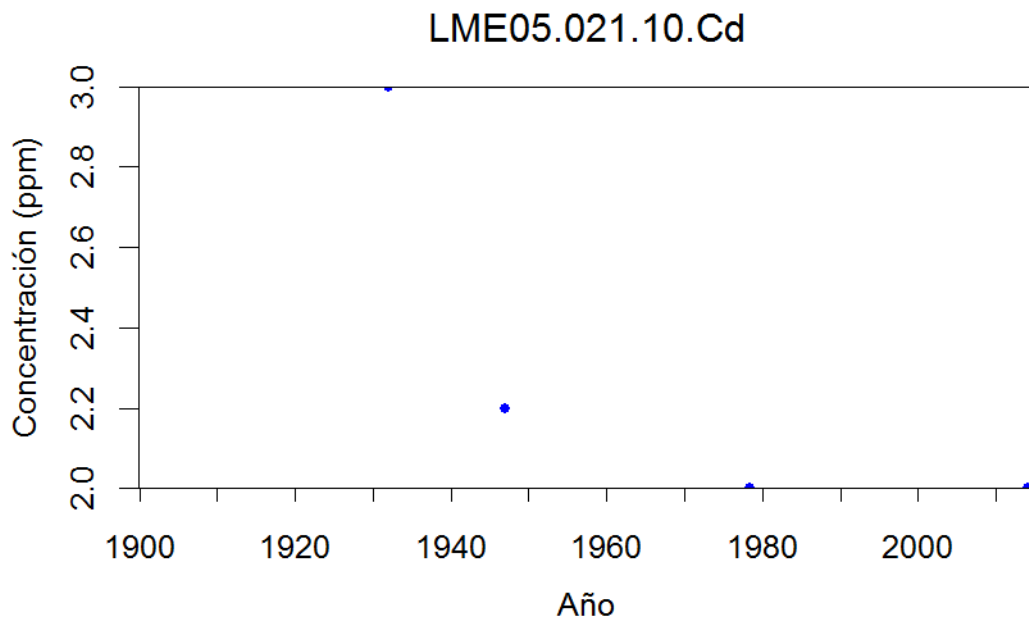


LME05.021.09.Cu

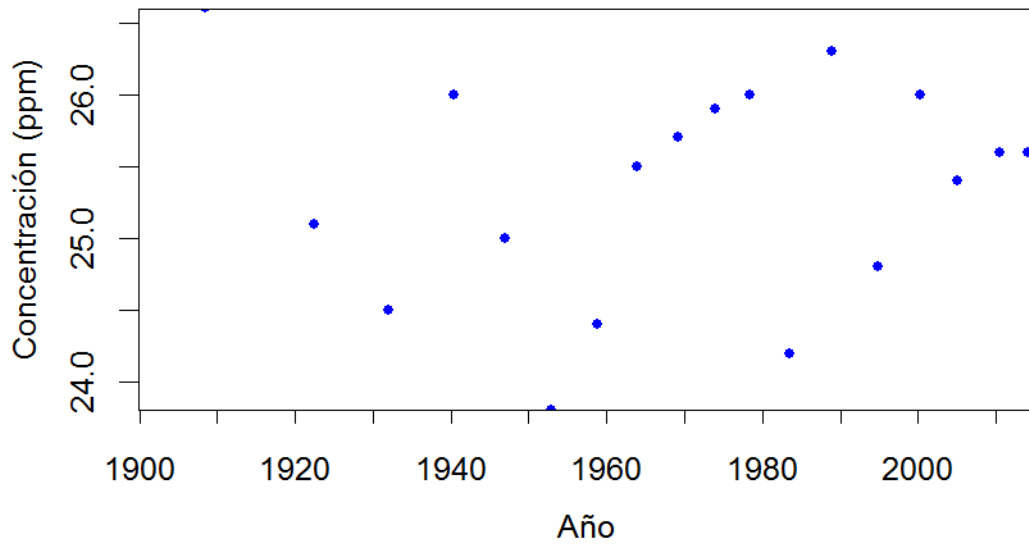


LME05.021.09.Ni

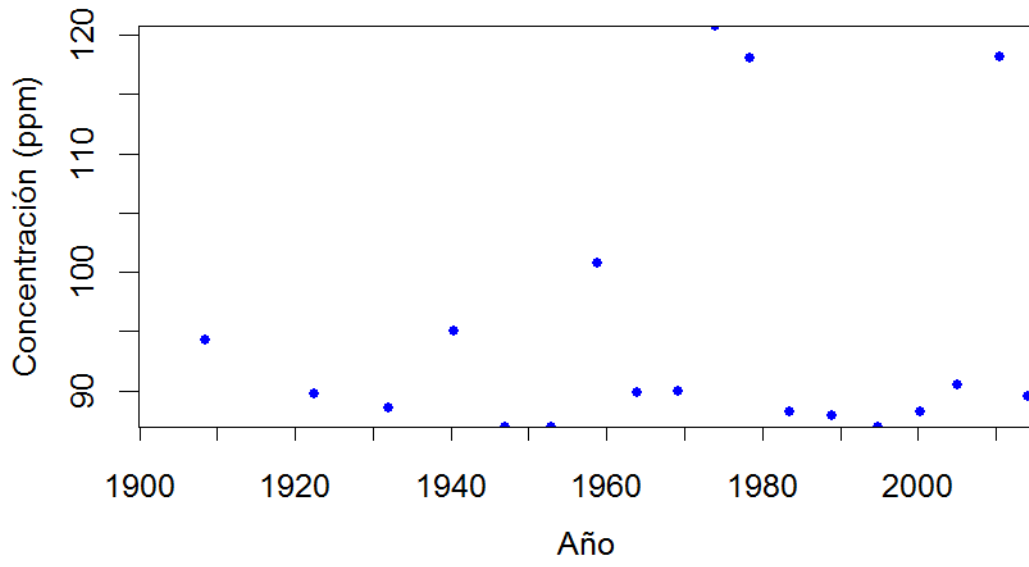




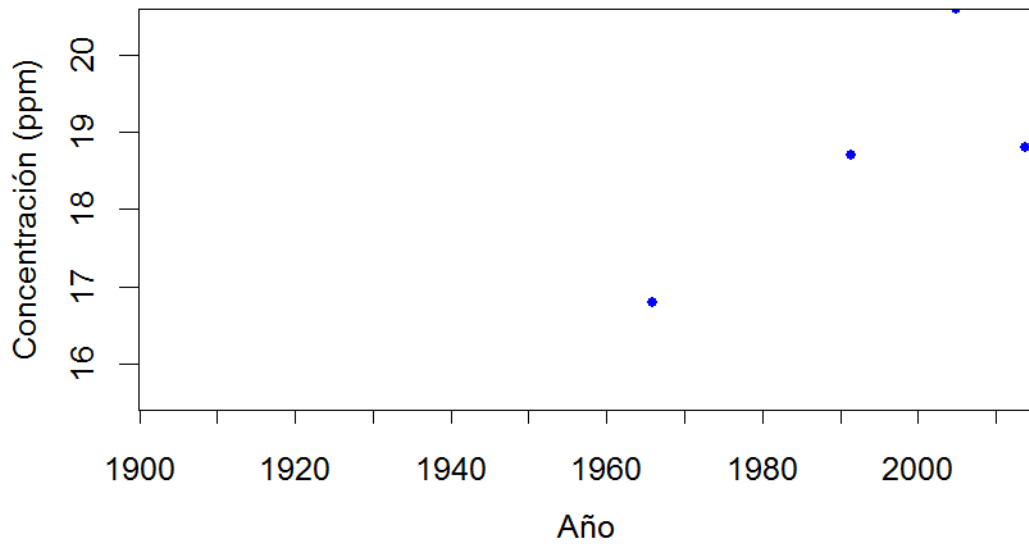
LME05.021.10.Cu



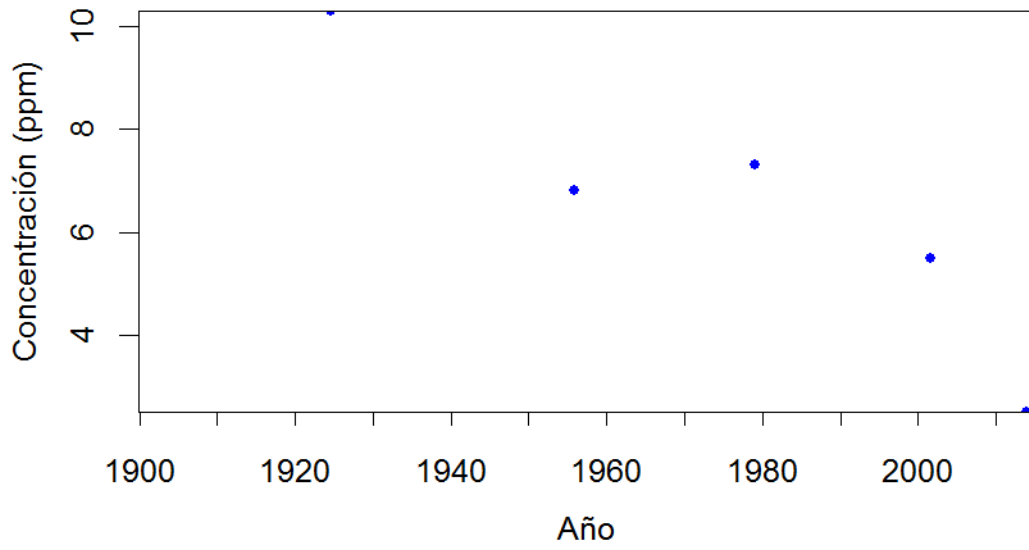
LME05.021.10.Ni



LME05.021.11.Cu

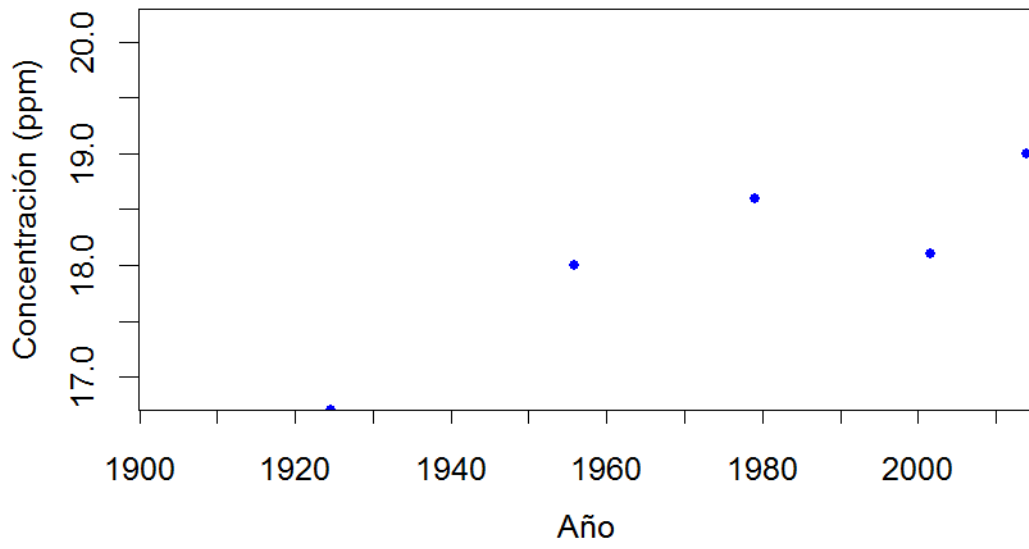


LME05.021.12.Cd

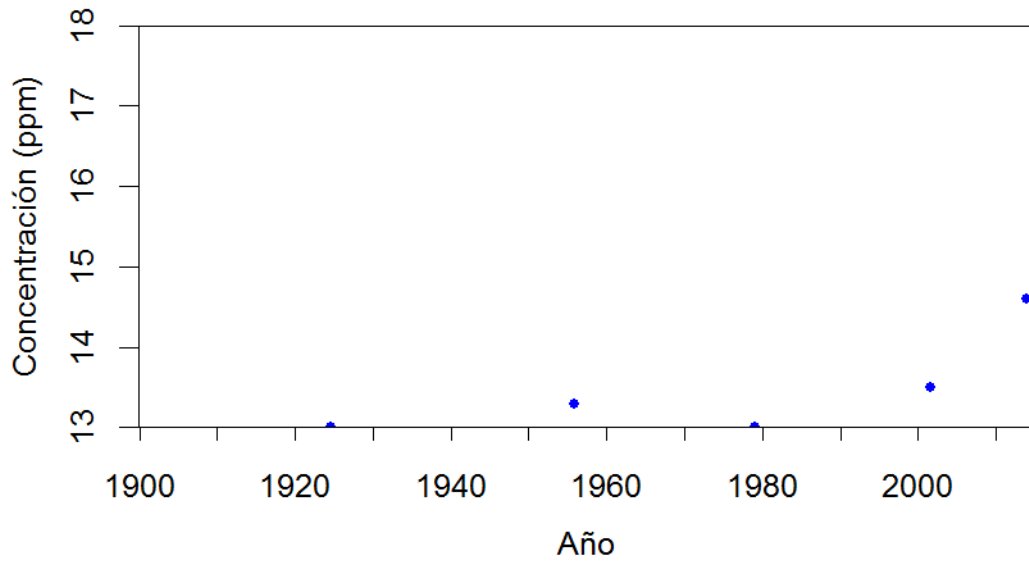




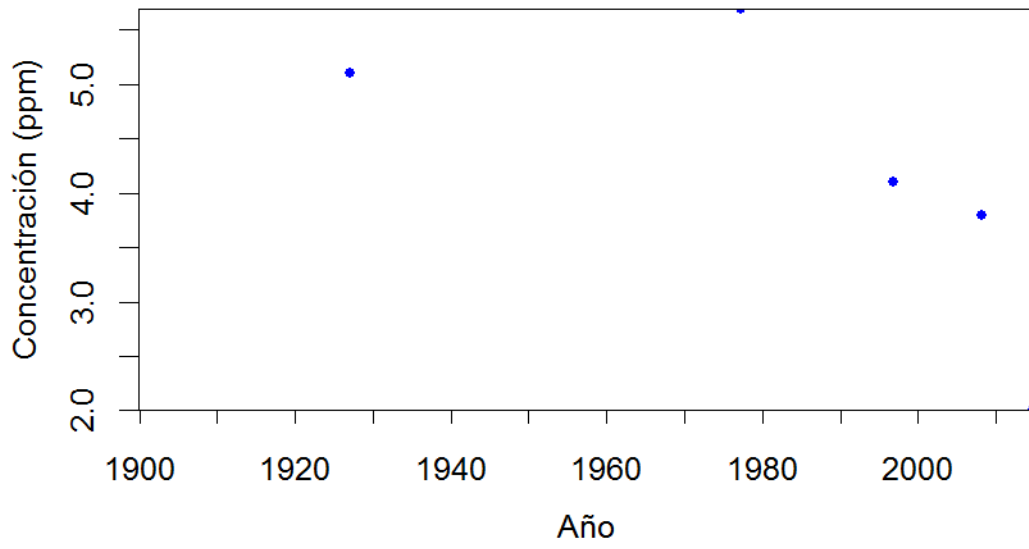
LME05.021.12.Cu



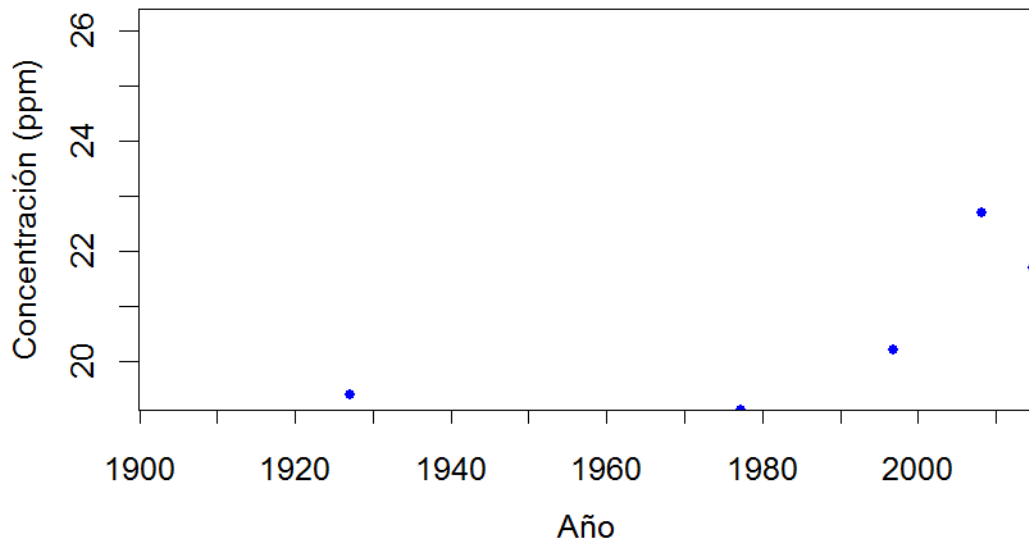
LME05.021.12.Ni



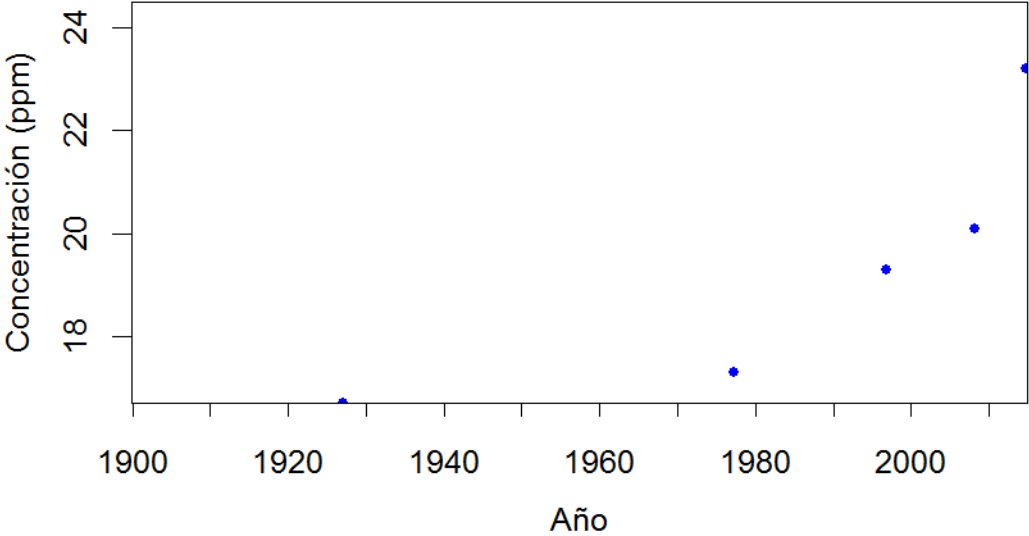
LME05.021.13.Cd



LME05.021.13.Cu

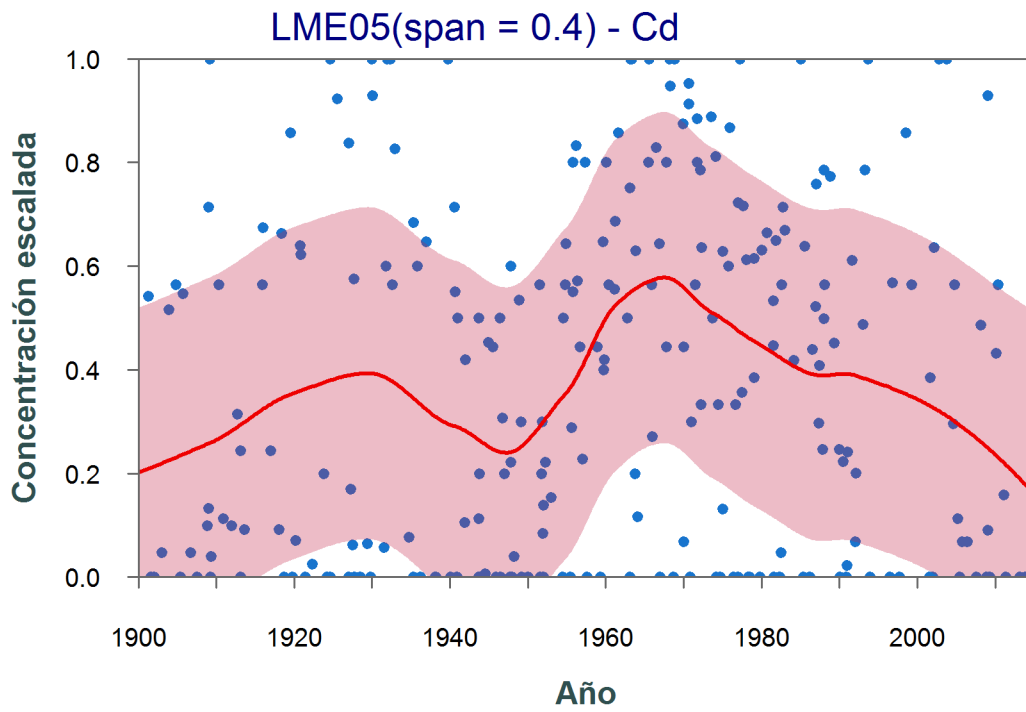
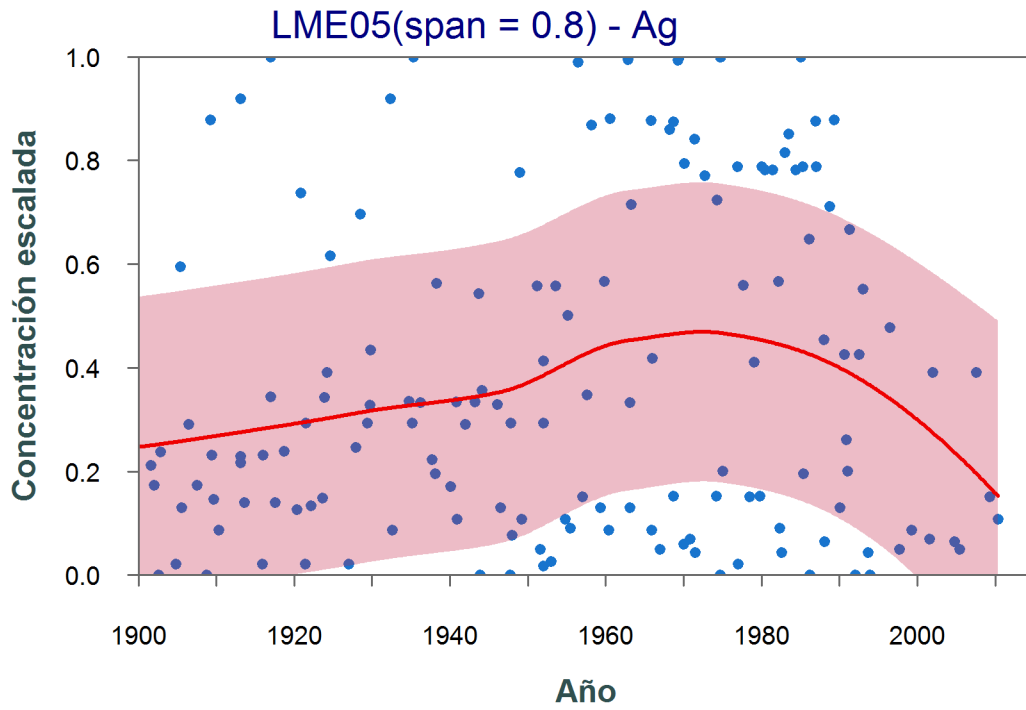


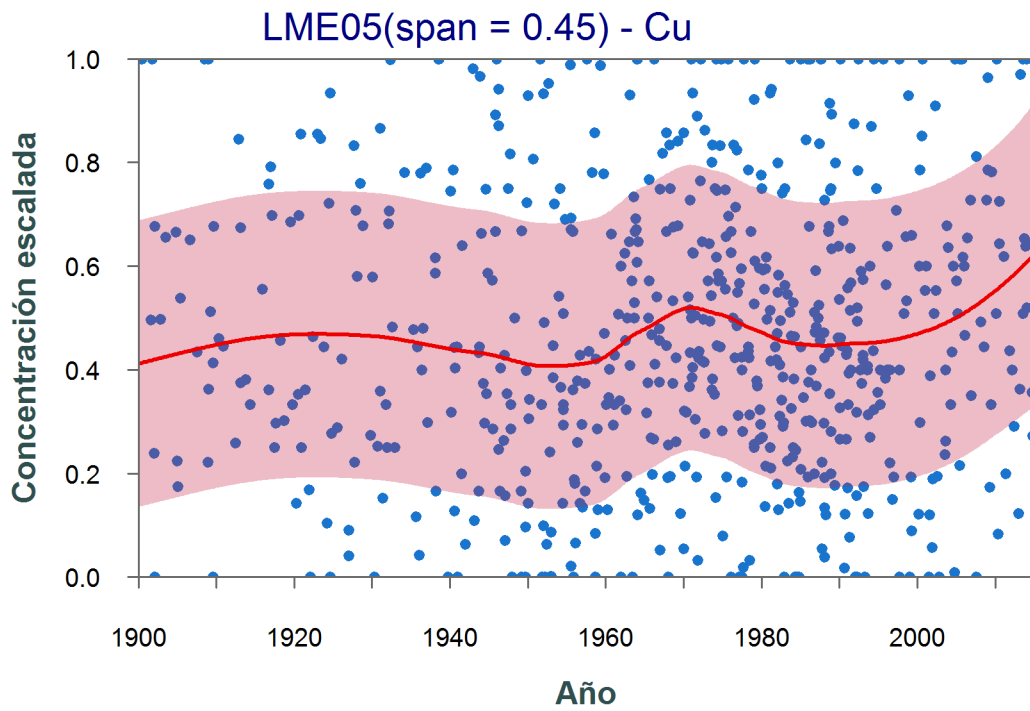
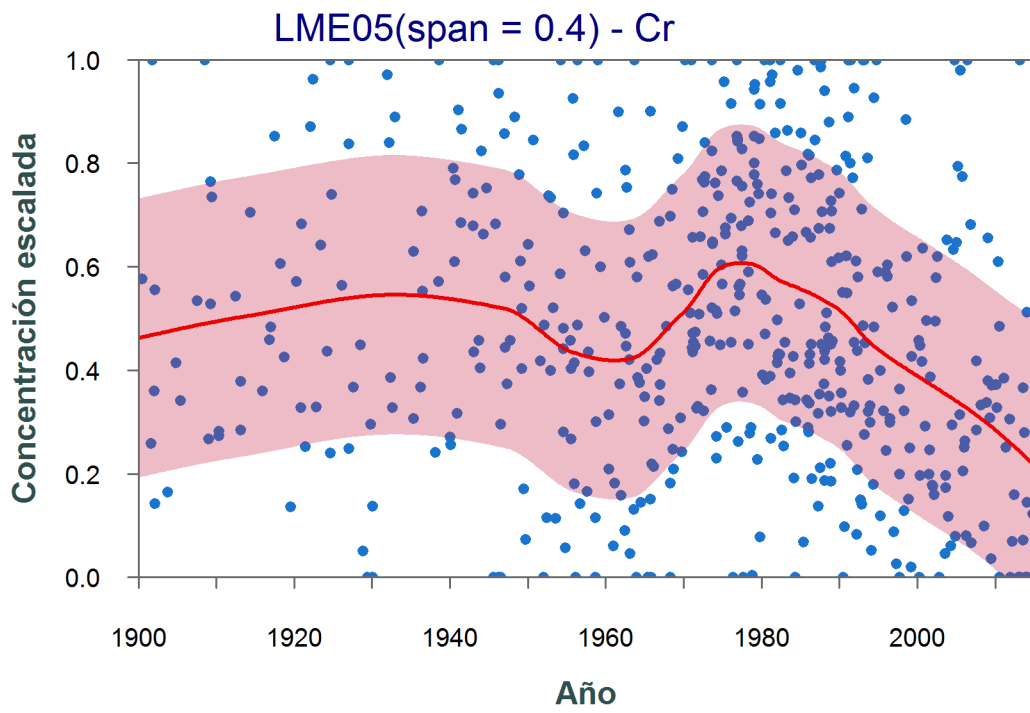
LME05.021.13.Ni

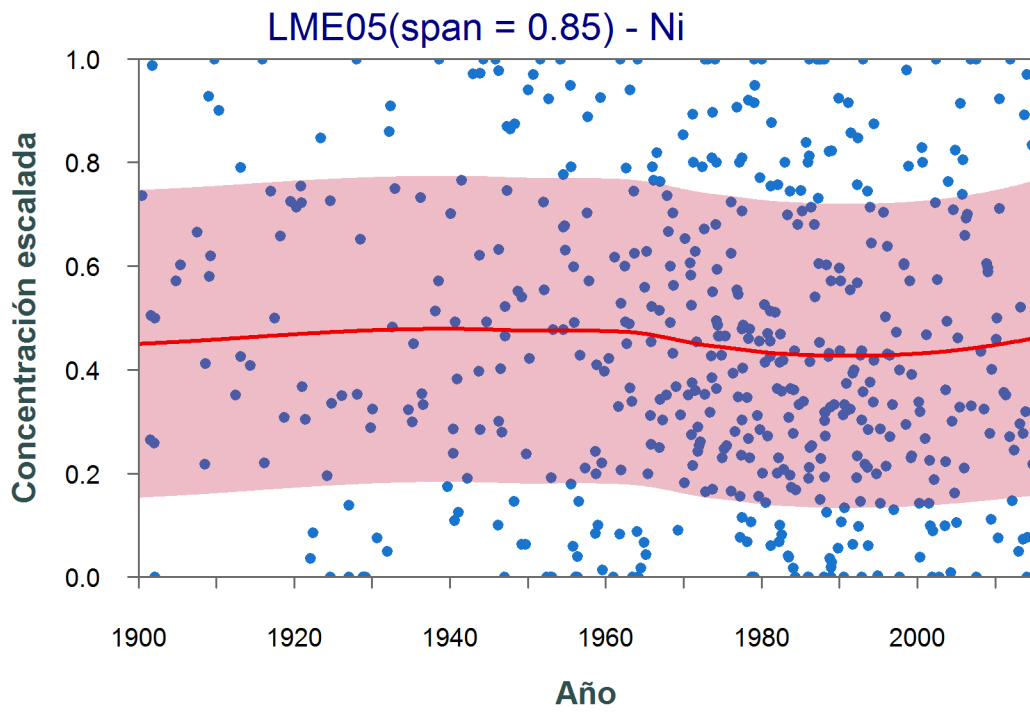
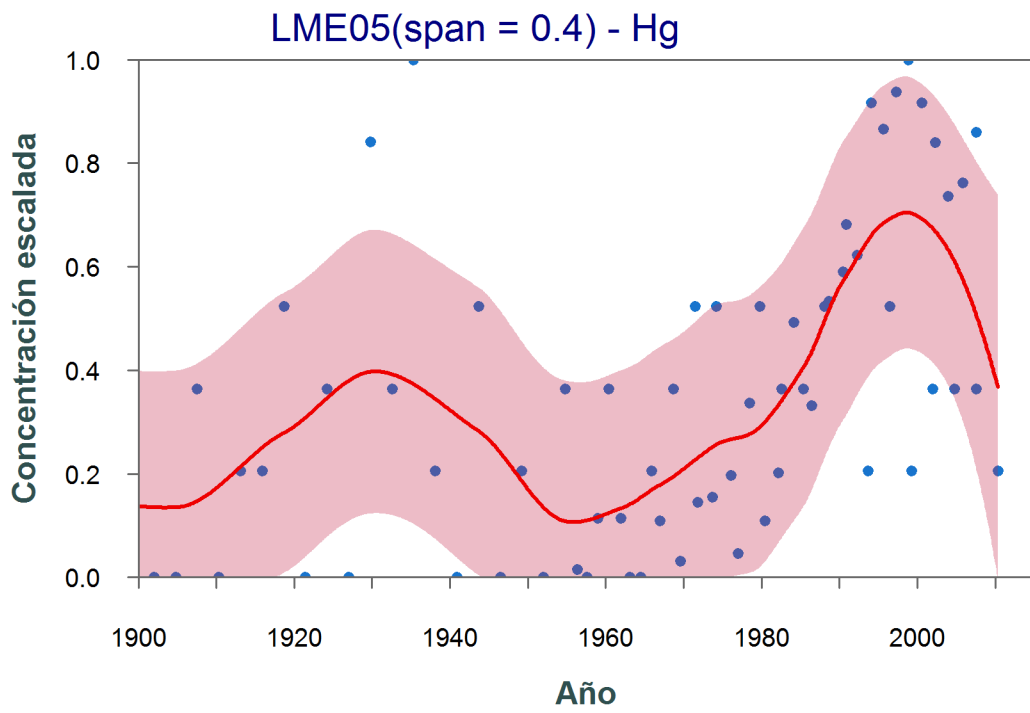


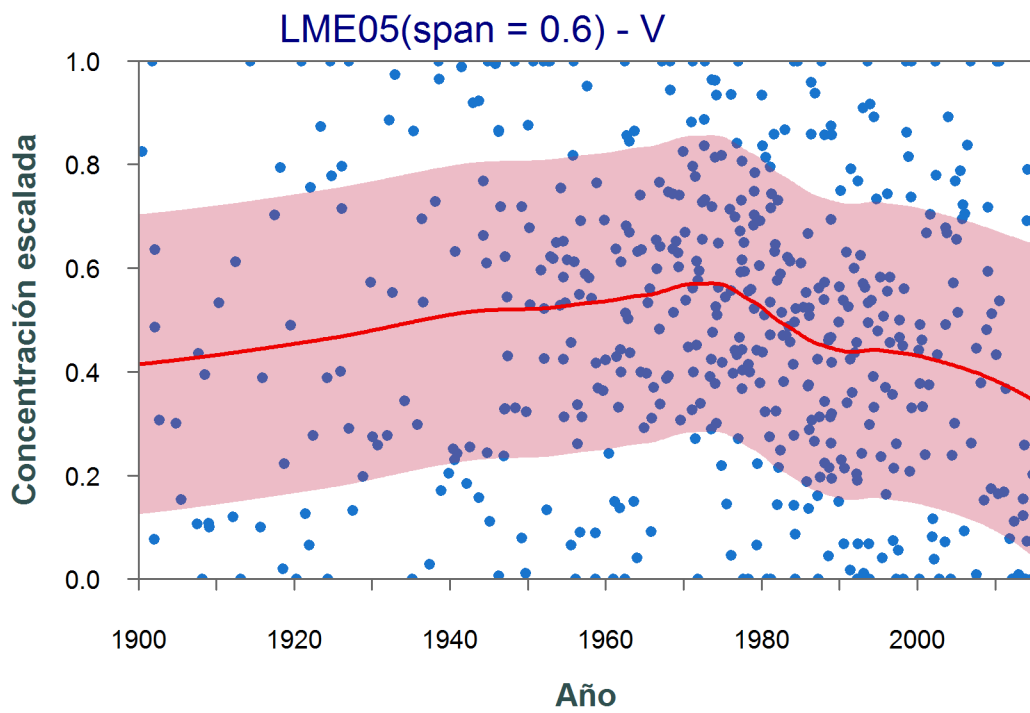
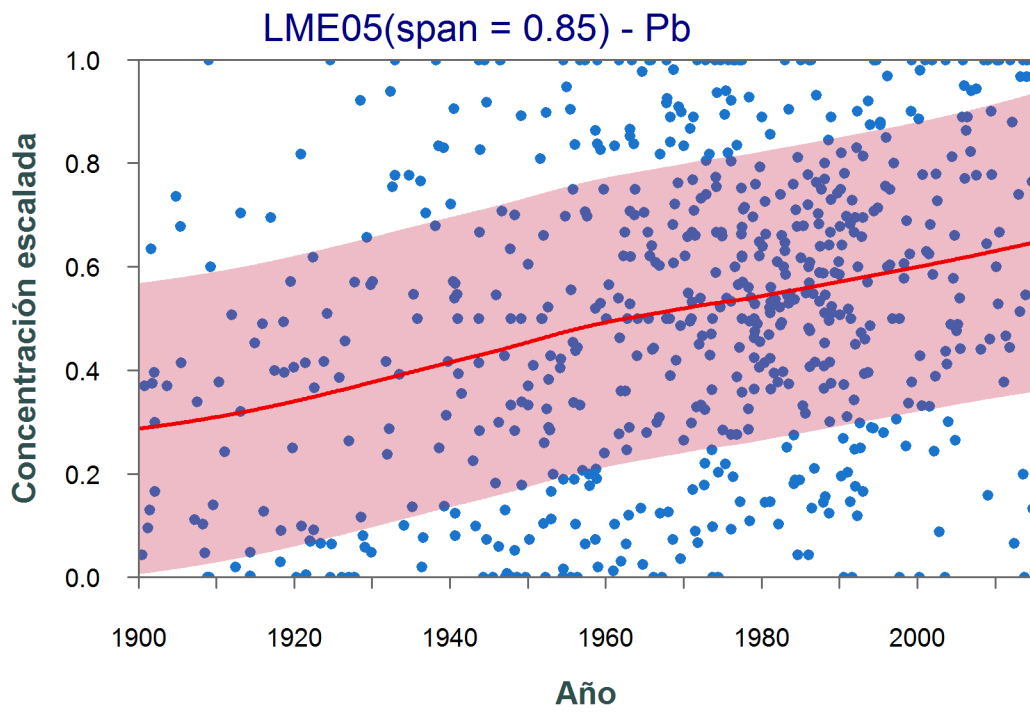
11.2. Tendencias suavizadas de los EPT's a nivel global, región norte y región sur

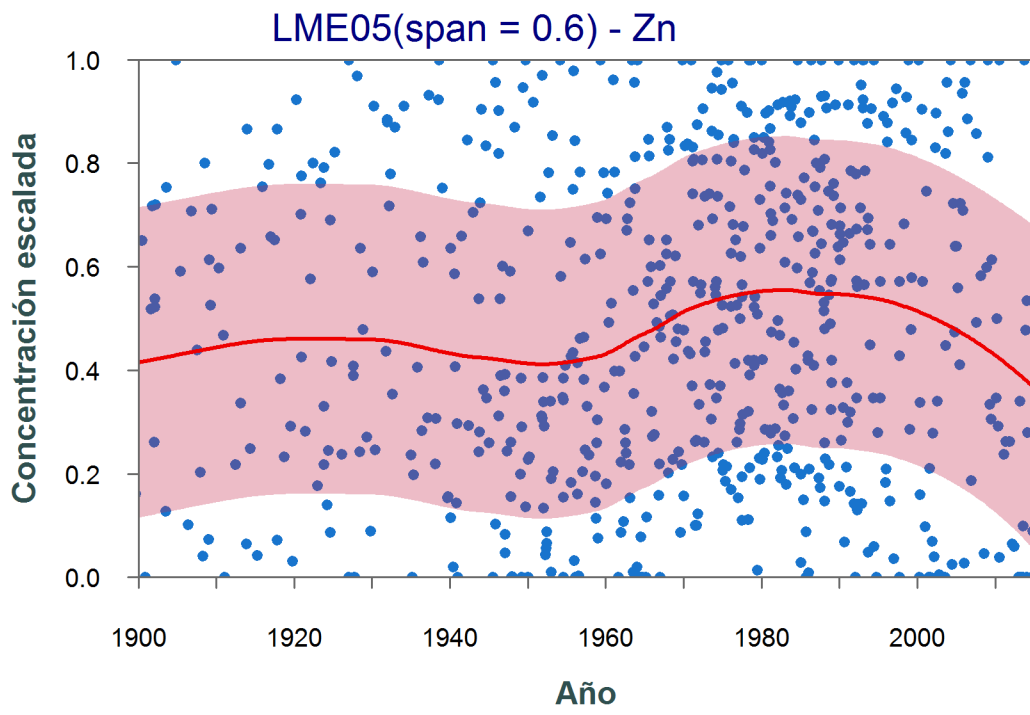
Global







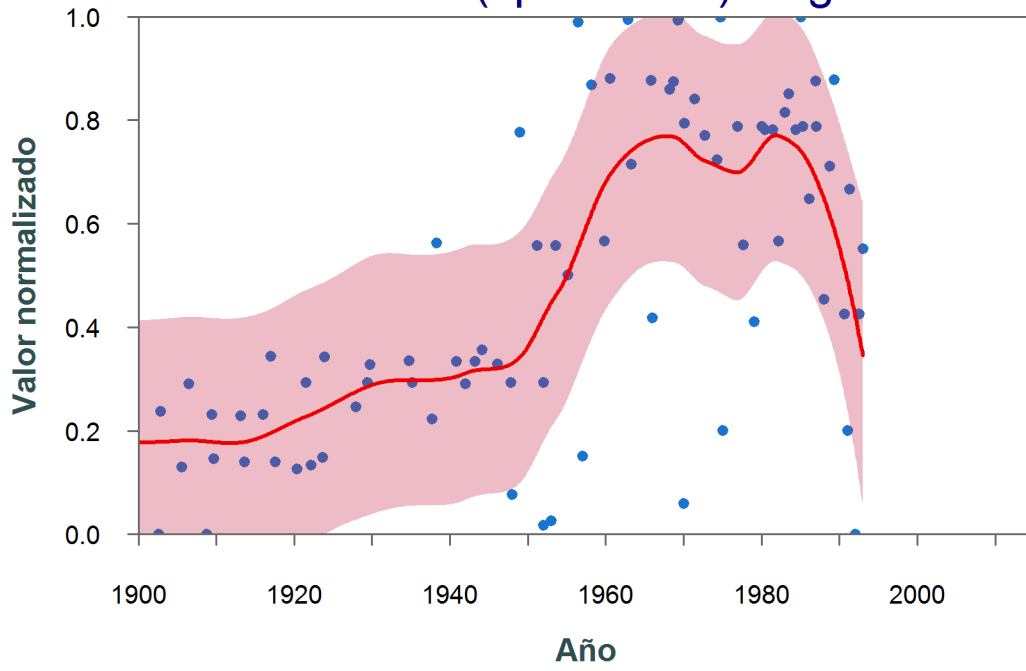




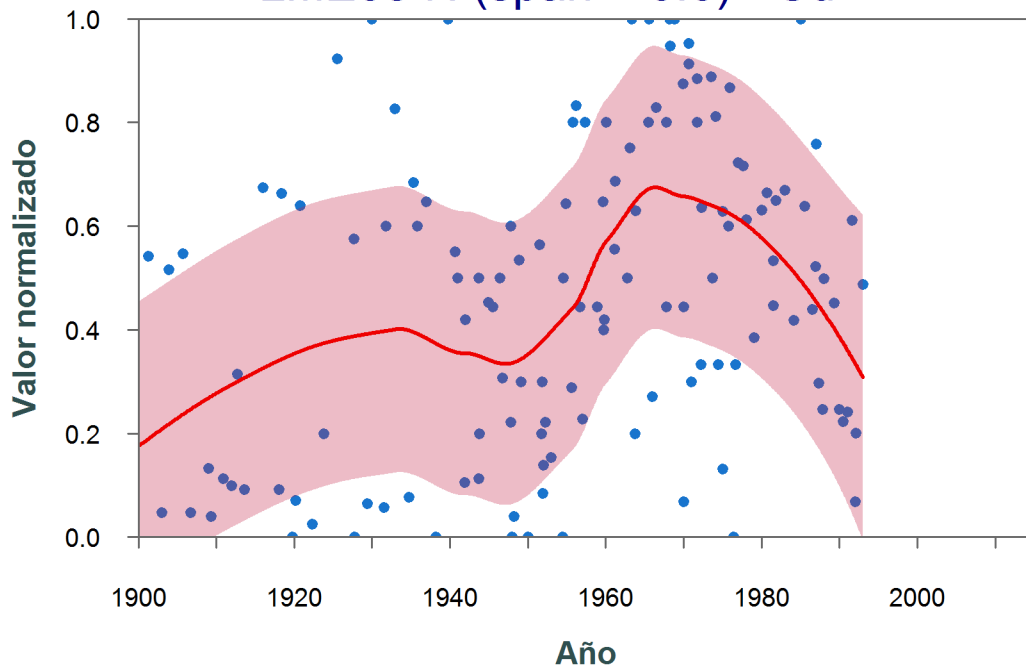


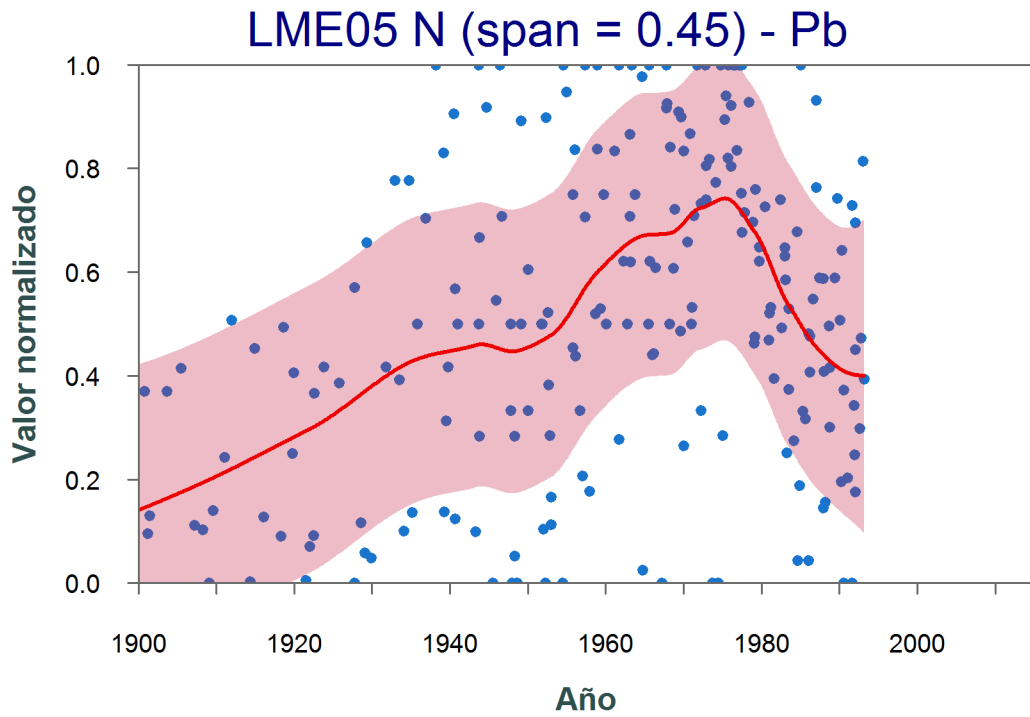
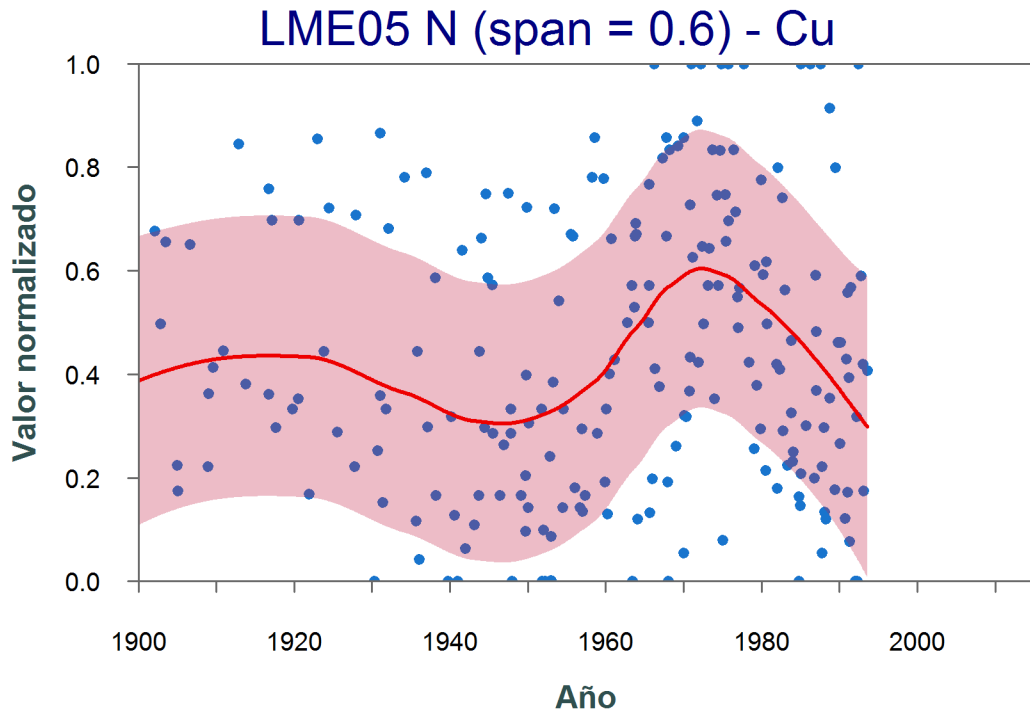
Norte

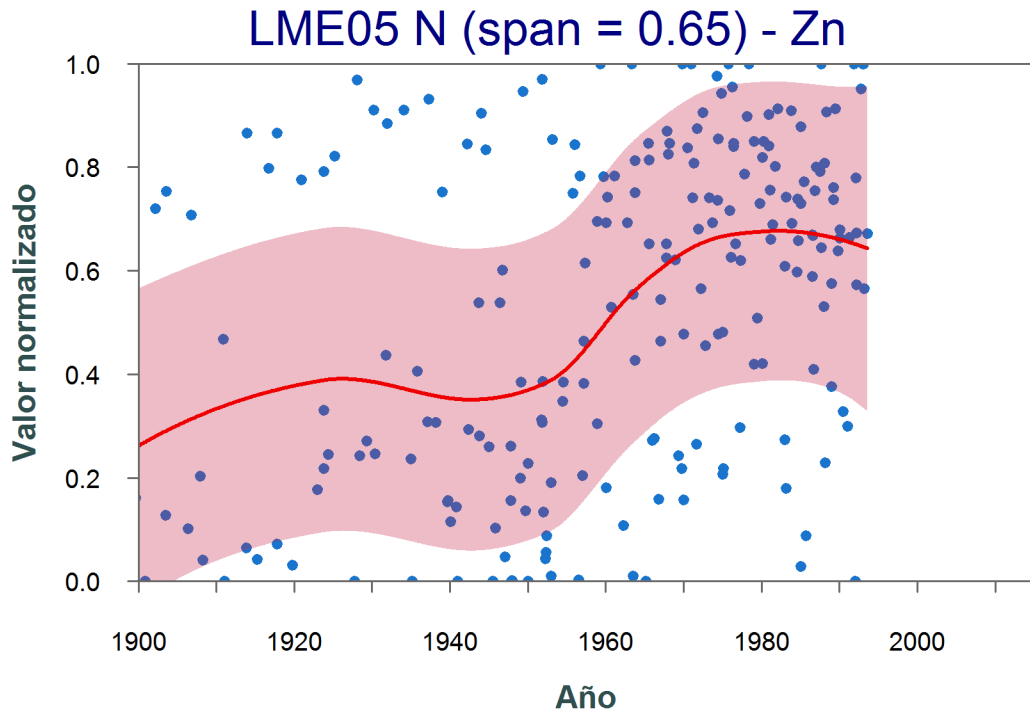
LME05 N (span = 0.4) - Ag



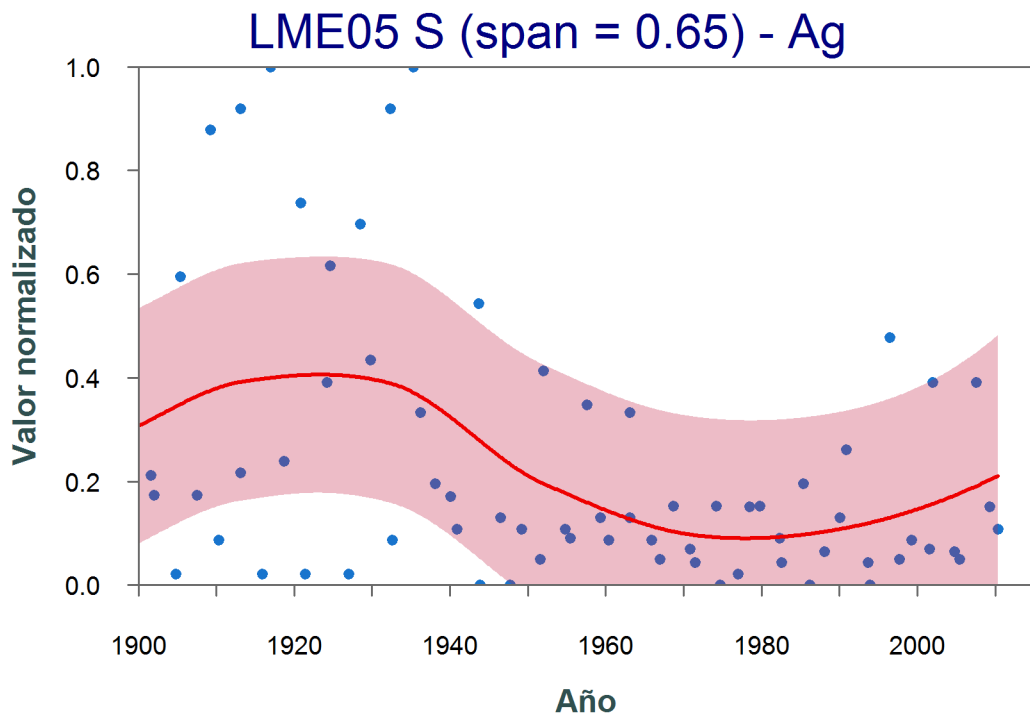
LME05 N (span = 0.6) - Cd

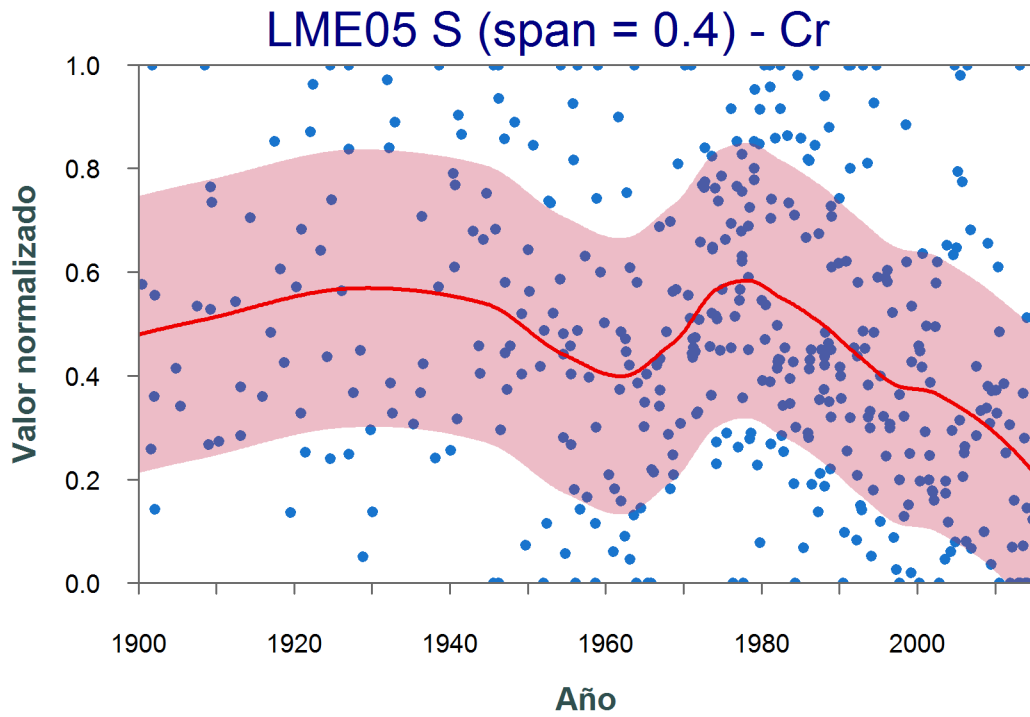
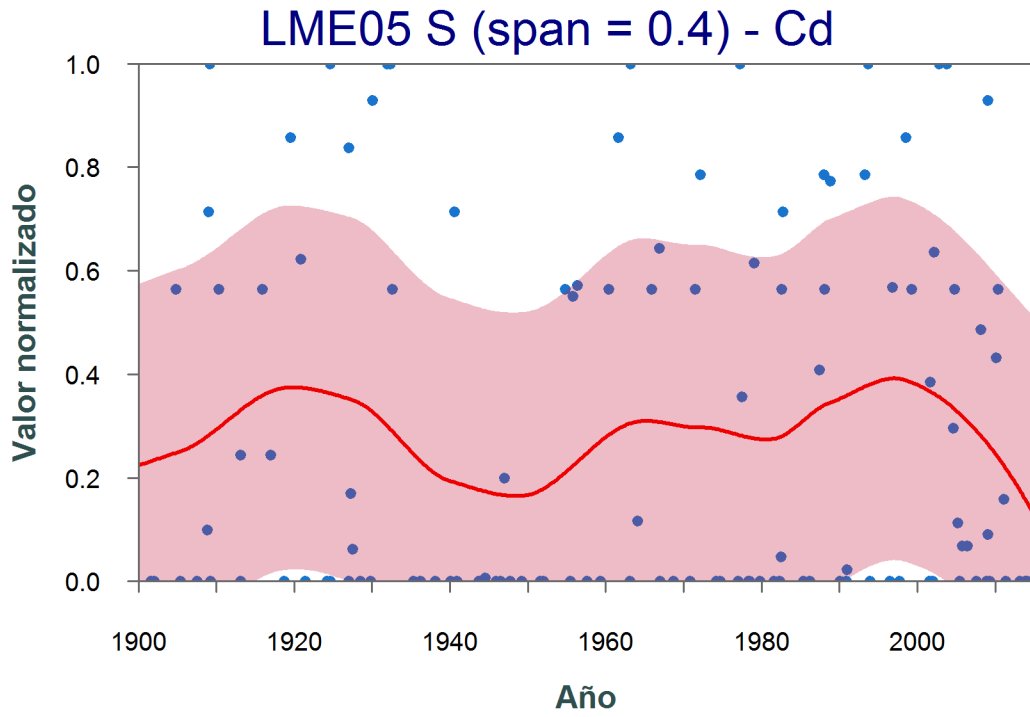


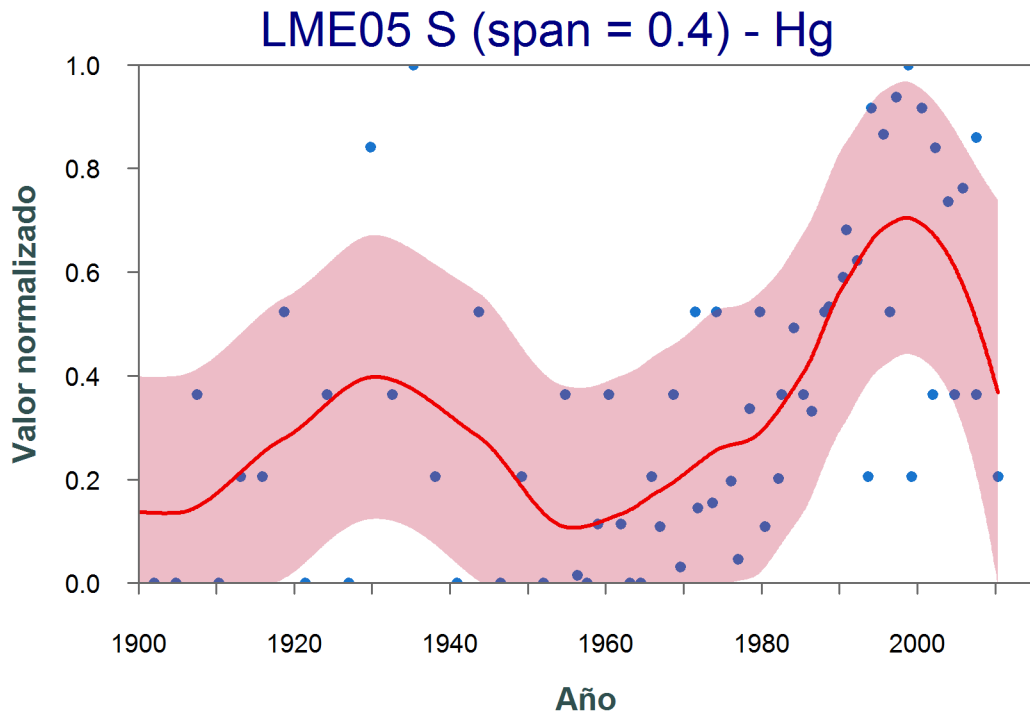
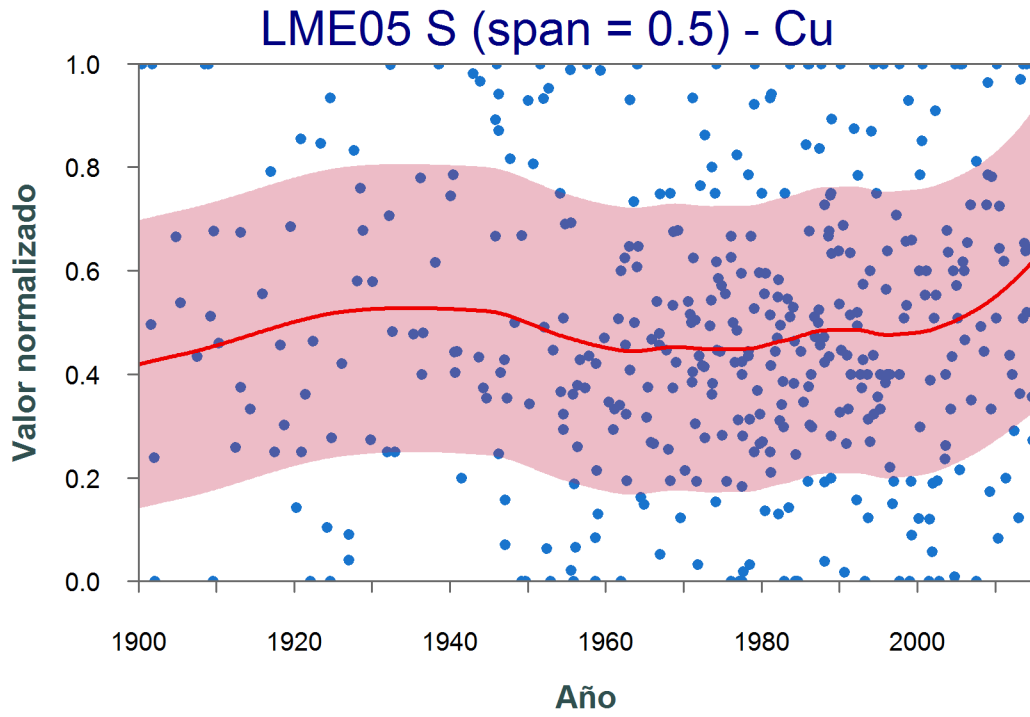


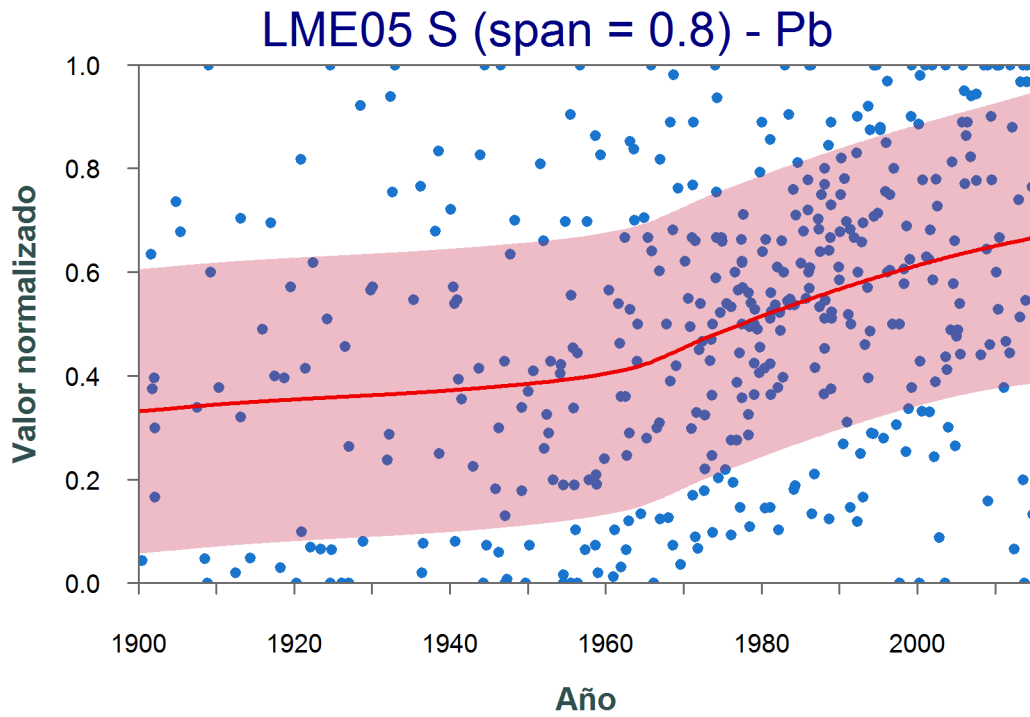
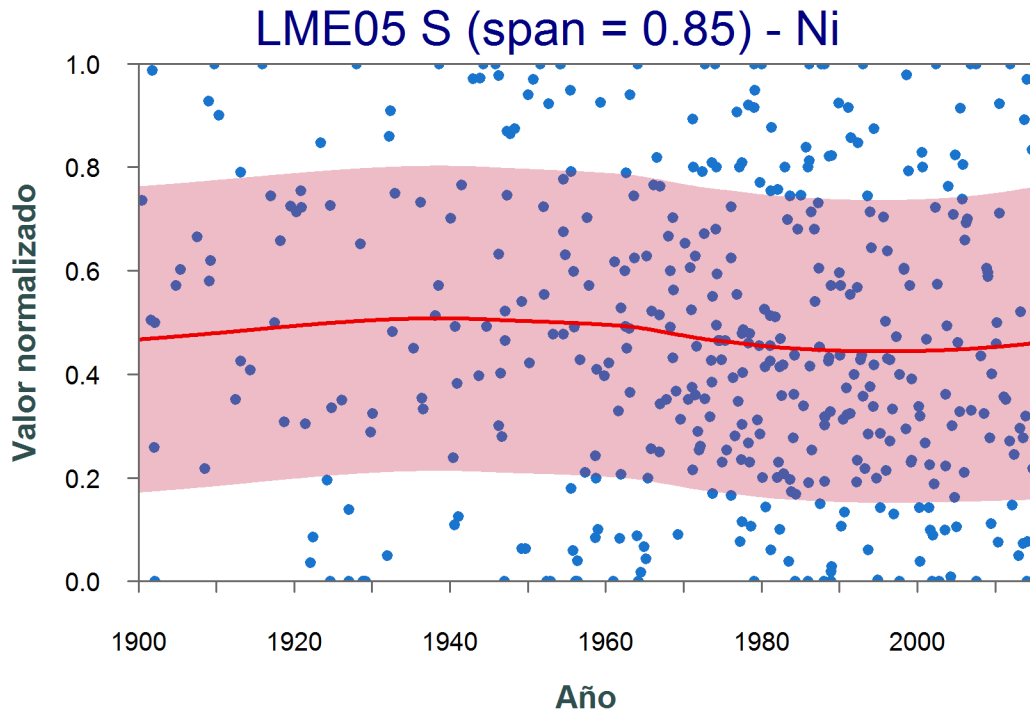


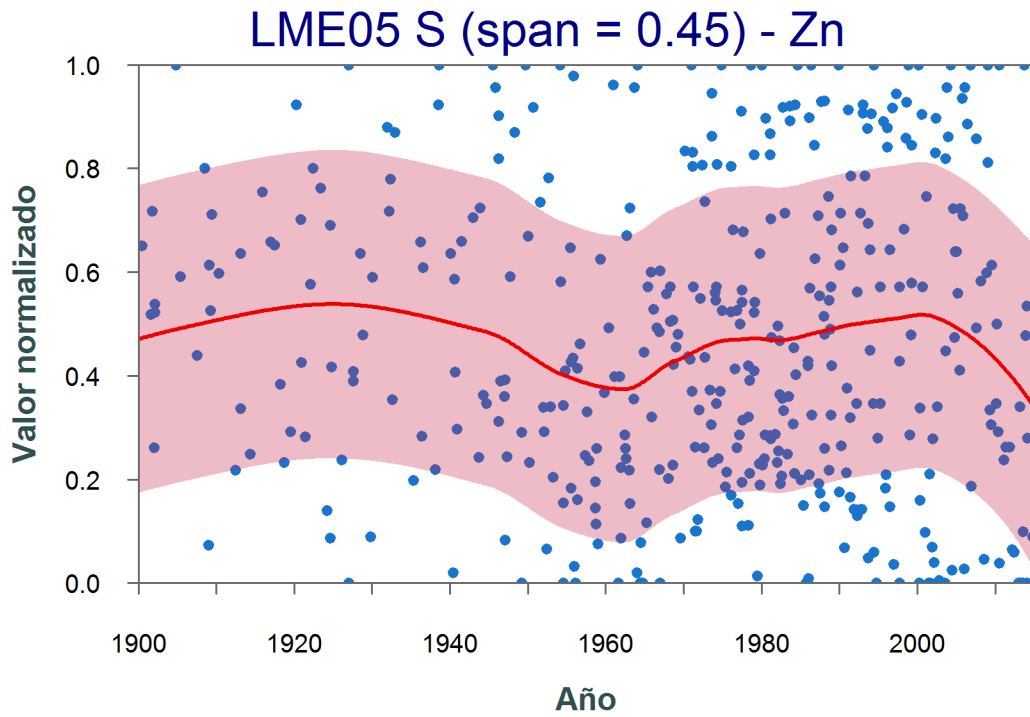
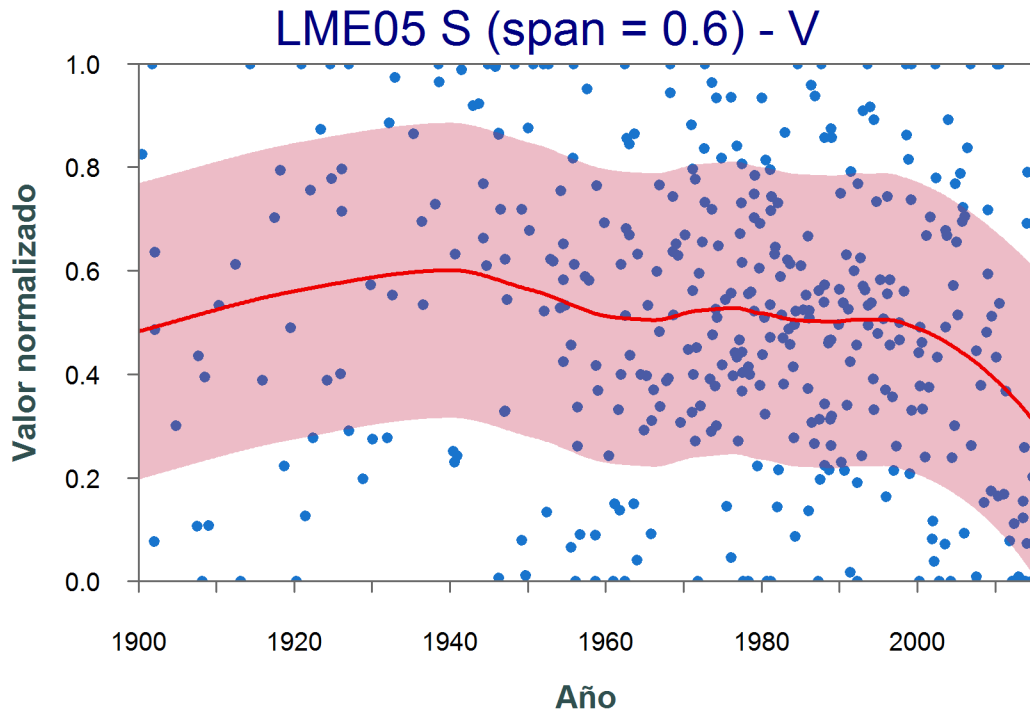
Sur











### 11.3. Tabla resumen del contenido de la base de datos

Código LME	Fecha de muestreo	Nombre del crucero	Nombre de la embarcación	Nombre de la estación	País	Provincia	Localidad	Latitud	Longitud	Río
LME05.004.01	15/06/2008		B/O Justo Sierra	AIII	México	Veracruz	Coatzacoalcos	18.24	-94.45	Coatzacoalcos
LME05.006.01	15/04/1989			E30A	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	29.04	-89.74	Misisipí
LME05.006.02	15/04/1989			E30B	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	29.04	-89.74	Misisipí
LME05.006.03	15/04/1989			F35	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	29.01	-89.84	Misisipí
LME05.006.04	15/04/1989			D50	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	28.93	-89.61	Misisipí
LME05.006.05	15/04/1989			E50	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	28.95	-89.74	Misisipí
LME05.006.06	15/04/1989			E60	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	28.87	-89.74	Misisipí
LME05.006.07	15/06/1997			I3	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	29.28	-92.75	Misisipí
LME05.007.01	15/06/2001			S42	EUA	Florida		28.25	-86.42	
LME05.007.02	15/06/2001			MT3	EUA	Luisiana	Nuevo Orleans	28.22	-89.50	
LME05.007.03	15/06/2001			S36	EUA	Florida		28.92	-87.67	
LME05.007.04	15/06/2001			MT6	EUA		Misisipí	27.00	-88.00	
LME05.007.05	15/06/2002			JSSD1	EUA			25.01	-92.00	
LME05.007.06	15/06/2002			JSSD4	EUA			24.24	-85.47	
LME05.008.01	25/04/2013			CELE	México	Yucatán	Celestun	20.83	-90.39	
LME05.009.01	10/08/2008		B/O Justo Sierra	A15	México	Veracruz		19.33	-96.19	La Antigua
LME05.009.02	10/08/2008		B/O Justo Sierra	A16	México	Veracruz	Laguna Verde	19.72	-96.38	
LME05.010.01	10/02/2002	Panuco	B/O Justo Sierra	C17	México	Tamaulipas	Costa Tamaulipas	22.11	-97.33	Panuco
LME05.010.02	10/02/2002	Panuco	B/O Justo Sierra	C47	México	Tamaulipas	Costa Tamaulipas	22.31	-97.58	Panuco
LME05.010.03	10/02/2002	Panuco	B/O Justo Sierra	C53	México	Tamaulipas	Costa Tamaulipas	22.32	-97.30	Panuco
LME05.010.04	10/02/2002	Panuco	B/O Justo Sierra	C93	México	Tamaulipas	Costa Tamaulipas	22.41	-97.52	Panuco
LME05.011.01	10/02/2013			SAI	México	Veracruz	Laguna Salada	19.71	-96.41	



Código LME	Fecha de muestreo	Nombre del crucero	Nombre de la embarcación	Nombre de la estación	País	Provincia	Localidad	Latitud	Longitud	Río
LME05.011.02	10/02/2013			SAII	México	Veracruz	Laguna Salada	19.71	-96.41	
LME05.012.01	10/04/2014			C2	México	Campeche	Isla del Carmen	19.33	-99.18	Laguna de Términos
LME05.013.01	03/10/1977			Streamside	EUA	Luisiana		29.24	-90.14	Barataria
LME05.013.02	03/10/1977			Inland	EUA	Luisiana		29.24	-90.14	Barataria
LME05.013.03	03/10/1977			Airplane lake	EUA	Luisiana		29.24	-90.13	Barataria
LME05.014.01	03/10/1977			Streamside	EUA	Luisiana		29.24	-90.14	Barataria
LME05.014.02	03/10/1977			Inland	EUA	Luisiana		29.24	-90.14	Barataria
LME05.014.03	03/10/1977			Airplane lake	EUA	Luisiana		29.24	-90.13	Barataria
LME05.015.01	08/10/1992			ST 2	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.95	-93.82	Neches
LME05.015.02	08/10/1992			ST 4	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.89	-93.87	Neches
LME05.015.03	08/10/1992			ST 6	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.88	-93.79	Neches
LME05.015.04	08/10/1992			ST 7	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.83	-93.94	Neches
LME05.016.01	08/10/1992			ST 2	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.95	-93.82	Neches
LME05.016.02	08/10/1992			ST 4	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.89	-93.87	Neches
LME05.016.03	08/10/1992			ST 6	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.88	-93.79	Neches
LME05.016.04	08/10/1992			ST 7	EUA	Texas	Estuario Sabine-Neches	29.83	-93.94	Neches
LME05.017.01	10/02/1992	Xaman-EK	B/O Justo Sierra	A5	México	Campeche	Sonda de Campeche	19.38	-93.46	

Código LME	Fecha de muestreo	Nombre del crucero	Nombre de la embarcación	Nombre de la estación	País	Provincia	Localidad	Latitud	Longitud	Río
LME05.017.02	10/02/1992	Xaman-EK	B/O Justo Sierra	B6	México	Campeche	Sonda de Campeche	20.20	-92.55	
LME05.018.01	08/10/1993			Río Misisipí	EUA	Luisiana	Río Misisipí	28.92	-89.68	Río Misisipí
LME05.018.02	08/10/1995			Bahía de Galveston	EUA	Texas	Bahía de Galveston	29.59	-94.83	Bahía de Galveston
LME05.018.03	08/10/1993			Bahía de Tampa	EUA	Texas	Bahía de Tampa	27.76	-82.54	Bahía de Tampa
LME05.019.01	08/11/2011			Laguna Alvarado	México	Veracruz	Laguna Alvarado	18.80	-95.86	
LME05.020.01	10/03/2015			AL0315	México	Veracruz	Laguna Camaronera	18.81	-95.83	
LME05.021.01	06/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	IXW-250	México	Tabasco		19.43	-93.09	
LME05.021.02	06/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	IXW500	México	Tabasco		19.44	-93.89	
LME05.021.03	05/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	IXW750	México	Veracruz		19.46	-94.58	
LME05.021.04	09/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	SL25	México	Tamaulipas		24.16	-96.39	
LME05.021.05	31/07/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	SL26A	México	Veracruz		21.38	-96.57	
LME05.021.06	08/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	SL27	México	Veracruz		20.12	-96.13	
LME05.021.07	07/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	SL28	México	Veracruz		19.01	-95.59	
LME05.021.08	01/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	SL33	México	Campeche		22.41	-91.78	
LME05.021.09	04/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	LT1	México	Campeche		18.85	-92.40	
LME05.021.10	03/08/2015	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	IXTOC	México	Campeche		19.37	-92.32	
LME05.021.11	08/10/2016	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	PC-IA03	México	Campeche		20.62	-90.46	
LME05.021.12	08/10/2016	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	PC-IA04	México	Campeche		20.66	-90.45	
LME05.021.13	08/09/2016	C-IMAGE II	B/O Justo Sierra	PC-CP04	México	Campeche		20.47	-90.50	

## 11.4. Scripts de análisis

### 1. Crear base de datos para análisis 20180518

```
#### COMIENZO ####

rm(list=ls())
dev.off()
Today <- format(Sys.Date(), "%Y%m%d")
library(openxlsx)

# Nombre de archivos

WD      <- "C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA"
NameList <- "List of files and folders 20180329.xlsx"

#### Acciones derivadas ####

setwd(WD)
List      <- read.xlsx(NameList, sheet = 1)
DirTimeSeries <- List$Name[List$Variable == "DirTimeSeries"]
NameOriginal <- List$Name[List$Variable == "NameOriginal"]
NameG      <- List$Name[List$Variable == "NameG"]
NameContaminant <- List$Name[List$Variable == "NameContaminant"]
NameOriginalC <- List$File[List$Variable == "NameOriginal"]
NameGC      <- List$File[List$Variable == "NameG"]
NameContaminantC <- List$File[List$Variable == "NameContaminant"]

# Constantes

NTrend <- 5 # número mínimo de puntos para calcular tendencias

#### Read Tables ####

Original <- read.xlsx(NameOriginalC, sheet = 1, detectDates = T)
```

```

Contaminant <- read.xlsx(NameContaminantC, sheet = 1)

#### Crear una table para el análisis (G = GESAMP) ####

G <- Original

#### Seleccionar contaminantes####

G <-merge(G,Contaminant,by.x="contaminant",by.y="Contaminant.in.database",all.x = FALSE)
A <- table(G$TS) # Number of points for each TS
sum(A < NTrend) # 8 TS have less than 5 points. To be deleted
A <- names(A[A < NTrend]) # 8 TS para ser borradas
for (i in 1:length(A))
G <- G[G$TS != A[i],] # 4456 data left

#### Generación de gráficos de series de tiempo####

TSName <- unique(G$TS)
TSNumberTSName <- TSName[order(TSName)]
TSNumber <- length(TSName) # 218 TS
dir.create(DirTimeSeries)
setwd(DirTimeSeries)

max(G$year, na.rm = TRUE) # Año máximo es 2016.297
min(G$year, na.rm = TRUE) # Año mínimo es 1798.488

for (i in 1:TSNumber){
  #i <- 80 # Test
  Title <- TSName[i]
  X <- G$year [G$TS==TSName[i]]
  Y <- G$value[G$TS==TSName[i]]
  StartPlot <- 1900 # Se puede cambiar
  EndPlot <- 2015 # Se puede cambiar
  NamePlot <- paste0(Title, ".png")
  cat(NamePlot, "\r")
}

```

```

png(NamePlot, res=150, units="cm", width=15, height=10) # It works!
plot(X, Y, xlim = c(StartPlot, EndPlot), pch=16, cex=0.75,
     xaxs="i", yaxs="i", axes=F, ann=F, lty=1, col="blue")
box()
axis(1, at=seq(StartPlot, EndPlot, by=10), tck=-0.03, labels=TRUE)
axis(2)
mtext("Año", 1, 2.5)
mtext("Concentración (ppm)", 2, 2.5)
mtext(Title, 3, 1, cex=1.25)
dev.off()
}

#### Agregar valores a la tabla de estadística básica ####

TSList <- list(G$TS)
TSMean <- aggregate(G$value, by = TSList, FUN = mean)
TSLen <- aggregate(G$value, by = TSList, FUN = length)
TSMin <- aggregate(G$value, by = TSList, FUN = min)
TSMax <- aggregate(G$value, by = TSList, FUN = max)
TSSD <- aggregate(G$value, by = TSList, FUN = sd)
TSData
data.frame(TS=TSMean$Group.1, Mean=TSMean$x, Min=TSMin$x, Max=TSMax$x, SD=TSSD$x, CV=(TSSD$x/TSMean$x*100), N=TSLen$x) # CV (está en %)
unique(G$TS[G$CV == 0])
G <- G[G$CV != 0,] # 4408 data left

#### Reescalamiento: ####
G$Norm <- (G$value-G$Min)/(G$Max-G$Min) # G$Norm es una nueva columna
summary(G$Norm) # OK, G$Norm = {0,1}

#### Generar archive .csv de G ####
G <- G[order(G$year),]
G <- G[order(G$TS),]
write.csv(G, NameGC, row.names = FALSE)

```

## 2. Validación cruzada para obtener el span

```
#### COMIENZO ####

rm(list=ls())
library(openxlsx)
library(dplyr)

#### Definición de parámetros ####

# Nombres de archivos
WD      <- "C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA"
NameList <- "List of files and folders 20180329.xlsx"

#### Acciones derivadas ####
setwd(WD)
List      <- read.xlsx(NameList, sheet = 1)
DirScatterPlots <- List$Name[List$Variable == "DirScatterPlots"]
NameG     <- List$Name[List$Variable == "NameG"]
NameContaminant <- List$Name[List$Variable == "NameContaminant"]
NameGC    <- List$File[List$Variable == "NameG"]
NameContaminantC <- List$File[List$Variable == "NameContaminant"]

#### Apertura de archivos ####
G      <- read.csv(NameGC, header = TRUE, skip = 0, stringsAsFactors = FALSE)
Contaminant <- read.xlsx(NameContaminantC, sheet = 1)
colnames(Contaminant) <- c("Contaminant", "NameContaminant", "Subfamily", "NameSubamily", "Family")
Family    <- unique(Contaminant$Family)
Subfamily <- unique(Contaminant$Subfamily)
G <- G%>%filter(G$unit == "ppm" )
G <- G%>%filter(G$side == "N" )
length(unique(G$TS[G$Sub.family == "Pb"]))
length(G$TS[G$Sub.family == "Pb"])
#dir.create("ES.VALIDACION_1019")
setwd("ES.VALIDACION_1019")
```

```

#####GLOBAL#####
for(SUB in Subfamily){
  # SUB <- "Cr"                                # Test
  N <- sum(G$Sub.family == SUB)
  cat(SUB,"\n")
  Title <- paste0("LME05 VC - ",SUB)
  x <- G$year[G$Sub.family == SUB]#tiempo
  y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB]
  xmin <- min(x, na.rm = TRUE)
  xmax <- max(x, na.rm = TRUE)
  df <- data.frame(x, y)
  df <- na.omit(df)
  span.seq <- seq(0.4,1,by=0.05) #explorar los rangos de span
  k <- 10 #número de conjuntos
  set.seed(1) # para replicar resultados
  folds <- sample(x = 1:k, size = length(x), replace = TRUE)
  cv.error.mtrx <- matrix(rep(x = NA, times = k * length(span.seq)),
                          nrow = length(span.seq), ncol = k)

  { for(i in 1:length(span.seq)) {
    for(j in 1:k) {
      loess.fit <- loess(formula = y ~ x, data = df[folds != j, ], span = span.seq[i])
      preds <- predict(object = loess.fit, newdata = df[folds == j, ])
      cv.error.mtrx[i, j] <- mean((df$y[folds == j] - preds)^2, na.rm = TRUE)
      #Calcula el error de la validación cruzada para cada uno de los 10 conjuntos
    }
  }}

  cv.errors <- rowMeans(cv.error.mtrx)
  best.span.i <- which.min(cv.errors)#Aquí obtienes el error mínimo
  best.span.i
  span.seq[best.span.i]

```

```

NamePlot <- paste0(Title, ".png")
png(NamePlot, res = 300, units = "cm", width = 15, height = 10)
par(mar = c(4.1, 4.1, 2.1, 2.1))
plot(x = span.seq, y = cv.errors, type = "l")
points(x = span.seq, y = cv.errors,
       pch = 20, cex = 0.75, col = "blue")
points(x = span.seq[best.span.i], y = cv.errors[best.span.i],
       pch = 20, cex = 1, col = "red")

#mtext("Año", 1, 2.5, col = "darkslategrey", font = 2); mtext("Valores normalizados", 2, 2.5, col =
"darkslategrey", font = 2) mtext(Title, 3, 1, adj = 0.5, line = -1.8, cex = 1.5, col = "navyblue")
dev.off()
}

####NORTE####

for(SUB in Subfamily){
  # SUB <- "Cr" # Test
  N <- sum(G$Sub.family == SUB & G$side == "N")
  cat(SUB, "\n")
  if (N == 0) next
  Title <- paste0("LME05 VC N - ", SUB)
  x <- G$year[G$Sub.family == SUB & G$side == "N"] # tiempo
  y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB & G$side == "N"]
  xmin <- min(x, na.rm = TRUE)
  xmax <- max(x, na.rm = TRUE)
  df <- data.frame(x, y)
  df <- na.omit(df)
  span.seq <- seq(0.4, 1, by = 0.05)
  k <- 10
  set.seed(1)
  folds <- sample(x = 1:k, size = length(x), replace = TRUE)
  cv.error.mtrx <- matrix(rep(x = NA, times = k * length(span.seq)),
                        nrow = length(span.seq), ncol = k)

```



```

{ for(i in 1:length(span.seq)) {
  for(j in 1:k) {
    loess.fit <- loess(formula = y ~ x, data = df[folds != j, ], span = span.seq[i])
    preds <- predict(object = loess.fit, newdata = df[folds == j, ])
    cv.error.mtrx[i, j] <- mean((df$y[folds == j] - preds)^2, na.rm = TRUE)
  }
}}
cv.errors <- rowMeans(cv.error.mtrx)
best.span.i <- which.min(cv.errors)
best.span.i
span.seq[best.span.i]

NamePlot <- paste0(Title, ".png")
png(NamePlot, res = 300, units = "cm", width = 15, height = 10)
par(mar = c(4.1, 4.1, 2.1, 2.1))
plot(x = span.seq, y = cv.errors, type = "l")
points(x = span.seq, y = cv.errors,
       pch = 20, cex = 0.75, col = "blue")
points(x = span.seq[best.span.i], y = cv.errors[best.span.i],
       pch = 20, cex = 1, col = "red")

best.loess.fit <- loess(formula = y ~ x, data = df,
                       span = span.seq[best.span.i])

x.seq <- seq(from = xmin, to = xmax, length = 100)

#mtext("Año", 1, 2.5, col = "darkslategrey", font = 2); mtext("Valores normalizados", 2, 2.5, col =
"darkslategrey", font = 2) #Cambié a castellano
mtext(Title, 3, 1, adj = 0.5, line = -1.8, cex = 1.5, col = "navyblue")
dev.off()
}

```

```

#####SUR#####

for(SUB in Subfamily){
  # SUB <- "Cr"                                # Test
  N <- sum(G$Sub.family == SUB & G$side == "S")
  cat(SUB,"\n")
  #if (N == 0) next
  Title <- paste0("LME05 VC S - ",SUB)
  x <- G$year[G$Sub.family == SUB & G$side == "S"]#tiempo
  y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB & G$side == "S"]
  xmin <- min(x, na.rm = TRUE)
  xmax <- max(x, na.rm = TRUE)
  df <- data.frame(x, y)
  df <- na.omit(df)
  span.seq <- seq(0.4,1,by=0.05)
  k <- 10
  set.seed(1)  folds <- sample(x = 1:k, size = length(x), replace = TRUE)
  cv.error.mtrx <- matrix(rep(x = NA, times = k * length(span.seq)),
                          nrow = length(span.seq), ncol = k)

  { for(i in 1:length(span.seq)) {
    for(j in 1:k) {
      loess.fit <- loess(formula = y ~ x, data = df[folds != j, ], span = span.seq[i])
      preds <- predict(object = loess.fit, newdata = df[folds == j, ])
      cv.error.mtrx[i, j] <- mean((df$y[folds == j] - preds)^2, na.rm = TRUE)
    }
  }}
  cv.errors <- rowMeans(cv.error.mtrx)
  best.span.i <- which.min(cv.errors)
  best.span.i
  span.seq[best.span.i]

  NamePlot <- paste0(Title,".png")
  png(NamePlot,res = 300,units = "cm",width = 15,height = 10)

```

```

par(mar = c(4.1,4.1,2.1,2.1)) # Adjust margins
plot(x = span.seq, y = cv.errors,type = "l")
points(x = span.seq, y = cv.errors,
       pch = 20, cex = 0.75, col = "blue")
points(x = span.seq[best.span.i], y = cv.errors[best.span.i],
       pch = 20, cex = 1, col = "red")

best.loess.fit <- loess(formula = y ~ x, data = df,
                      span = span.seq[best.span.i])

x.seq <- seq(from = xmin, to = xmax, length = 100)
#mtext("Año",1,2.5, col = "darkslategrey", font = 2); mtext("Valores normalizados",2,2.5, col =
"darkslategrey", font = 2) #Cambié a castellano
mtext(Title,3,1, adj =0.5 , line = -1.8 ,cex = 1.5, col = "navyblue")
dev.off()
}

```

### 3. LOESS POR EPT Y REGIÓN

```
#### COMIENZO ####
```

```
rm(list = ls())  
dev.off()  
Today <- format(Sys.Date(), "%Y%m%d")  
library(openxlsx)
```

```
#### DEFINICIÓN DE PARÁMETROS ####
```

```
# NOMBRES DE ARCHIVOS #
```

```
WD <- "C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA"  
NameList <- "List of files and folders 20180329.xlsx"
```

```
#### ACCIONES DERIVADAS ####
```

```
setwd(WD)  
List <- read.xlsx(NameList, sheet = 1)  
DirScatterPlots <- List$Name[List$Variable == "DirScatterPlots"]  
NameG <- List$Name[List$Variable == "NameG"]  
NameContaminant <- List$Name[List$Variable == "NameContaminant"]  
NameGC <- List$File[List$Variable == "NameG"]  
NameContaminantC <- List$File[List$Variable == "NameContaminant"]
```

```
#### APERTURA DE ARCHIVOS ####
```

```
G <- read.csv(NameGC, header = TRUE, skip = 0, stringsAsFactors = FALSE)  
Contaminant <- read.xlsx(NameContaminantC, sheet = 1)  
colnames(Contaminant) <- c("Contaminant", "NameContaminant", "Subfamily", "NameSubamily", "Family")  
Family <- unique(Contaminant$Family)  
Subfamily <- unique(Contaminant$Subfamily)
```

```

#### GENERAR UN DIRECTORIO PARA LOS GRÁFICOS ####

WD      <- "C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA/ES.VALIDACION"
setwd(WD)

#### Scatter plot LME and Subfamilies ####

#GLOBAL#
Span = 0.6          # De archivo generado en validación, poner manualmente

SUB <- "Zn"          # Test
N <- sum(G$Sub.family == SUB)
cat(SUB, "\n")
Title <- paste0("LME05(span = 0.6) - ", SUB)
X <- G$year[G$Sub.family == SUB] # Tiempo
Y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB]
Xmin <- min(X, na.rm = TRUE)
Xmax <- max(X, na.rm = TRUE)
XX <- seq(Xmin, Xmax, (Xmax - Xmin)/1000)
# Local regression: loess()
Loess <- loess(Y ~ X, span = Span)
Fit <- predict(Loess, newdata = XX, se = TRUE)
A <- Fit$residual.scale
B <- qt(0.975, Fit$df)*Fit$se.fit
E <- sqrt(A^2 + B^2)
P95 <- Fit$fit + E
P05 <- Fit$fit - E
# Plot
StartPlot <- 1900
EndPlot <- 2015
NamePlot <- paste0(Title, ".png")
png(NamePlot, res = 300, units = "cm", width = 15, height = 10)
par(mar = c(4.1, 4.1, 2.1, 2.1))
plot(X, Y, xlim = c(StartPlot, EndPlot), pch = 19, cex = 0.65,
      xaxs = "i", yaxs = "i", axes = FALSE, ann = FALSE,

```

```

    lty = 1, col = "dodgerblue3")
  polygon(c(XX,rev(XX)),c(P95,rev(P05)),col = rgb(0.76,0.13,0.28,0.3), border = NA)
  lines(XX,Fit$fit, lty = 1, lwd = 2, col='red2')
  box(lty = 1, col = "dimgray")
  axis(1,at = seq(StartPlot,EndPlot,by = 10),tck = -0.02,col.ticks = "dimgray", col = "dimgray",
labels = TRUE, cex.axis = 0.8) # MEJORAR?
  axis(2,at = seq(0,1,by = 0.2),tck = -0.02,col.ticks = "dimgray",col = "dimgray",labels = TRUE,las
= 1, cex.axis = 0.8)
  mtext("Año",1,2.5, col = "darkslategrey", font = 2); mtext("Concentración escalada",2,2.5, col =
"darkslategrey", font = 2) #Cambié a castellano
  mtext(Title,3,1, adj =0.4 , line = -1.8 ,cex = 1.2, col = "navyblue")
  dev.off()

####NORTE####

Span = 0.65          # # De archivo generado en validación, poner manualmente
SUB <- "Zn"          # Test
N <- sum(G$Sub.family == SUB)
cat(SUB,"\n")
if (SUB == "Hg") next
Title <- paste0("LME05 N (span = 0.65) - ",SUB)
X <- G$year[G$Sub.family == SUB & G$side == "N"] # Región Norte
Y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB & G$side == "N"] # Región Norte
Xmin <- min(X, na.rm = TRUE)
Xmax <- max(X, na.rm = TRUE)
XX <- seq(Xmin, Xmax, (Xmax - Xmin)/1000) # Needed for smooth loess fit
# Local regression: loess()
Loess <- loess(Y ~ X, span = Span)
Fit <- predict(Loess, newdata = XX, se = TRUE)
A <- Fit$residual.scale
B <- qt(0.975, Fit$df)*Fit$se.fit
E <- sqrt(A^2 + B^2)
P95 <- Fit$fit + E
P05 <- Fit$fit - E
# Plot

```

```

StartPlot <- 1900
EndPlot <- 2015
NamePlot <- paste0(Title, ".png")
png(NamePlot, res = 300, units = "cm", width = 15, height = 10)
par(mar = c(4.1, 4.1, 2.1, 2.1))
plot(X, Y, xlim = c(StartPlot, EndPlot), pch = 19, cex = 0.65,
      xaxs = "i", yaxs = "i", axes = FALSE, ann = FALSE,
      lty = 1, col = "dodgerblue3")
  polygon(c(XX, rev(XX)), c(P95, rev(P05)), col = rgb(0.76, 0.13, 0.28, 0.3), border = NA)
lines(XX, Fit$fit, lty = 1, lwd = 2, col = 'red2')
box(lty = 1, col = "dimgray")
axis(1, at = seq(StartPlot, EndPlot, by = 10), tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray",
labels = TRUE, cex.axis = 0.8) # MEJORAR?
axis(2, at = seq(0, 1, by = 0.2), tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, las
= 1, cex.axis = 0.8)
mtext("Año", 1, 2.5, col = "darkslategrey", font = 2); mtext("Valor normalizado", 2, 2.5, col =
"darkslategrey", font = 2) # Cambié a castellano
mtext(Title, 3, 1, adj = 0.5, line = -1.8, cex = 1.5, col = "navyblue")
dev.off()

####SUR####

Span = 0.45 #De archivo generado en validación, poner manualmente
#for(SUB in Subfamily){
  SUB <- "Zn" # Test
  N <- sum(G$Sub.family == SUB)
  cat(SUB, "\n")

  Title <- paste0("LME05 S (span = 0.45) - ", SUB)
  X <- G$year[G$Sub.family == SUB & G$side == "S"] #Región Sur
  Y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB & G$side == "S"] #Región Sur
  Xmin <- min(X, na.rm = TRUE)
  Xmax <- max(X, na.rm = TRUE)
  XX <- seq(Xmin, Xmax, (Xmax - Xmin)/1000) # Needed for smooth loess fit

```

```

# Local regression: loess()
Loess <- loess(Y ~ X, span = Span)
Fit <- predict(Loess, newdata = XX, se = TRUE)
A <- Fit$residual.scale
B <- qt(0.975, Fit$df)*Fit$se.fit
E <- sqrt(A^2 + B^2)
P95 <- Fit$fit + E
P05 <- Fit$fit - E
# Plot
StartPlot <- 1900 #Antes Xmin
EndPlot <- 2015 #Antes Xmax # NOTE: use End 2000 to have a nicer plot
NamePlot <- paste0(Title, ".png")
png(NamePlot, res = 300, units = "cm", width = 15, height = 10)
par(mar = c(4.1, 4.1, 2.1, 2.1)) # Adjust margins
plot(X, Y, xlim = c(StartPlot, EndPlot), pch = 19, cex = 0.65,
     xaxs = "i", yaxs = "i", axes = FALSE, ann = FALSE,
     lty = 1, col = "dodgerblue3")
polygon(c(XX, rev(XX)), c(P95, rev(P05)), col = rgb(0.76, 0.13, 0.28, 0.3), border = NA)
lines(XX, Fit$fit, lty = 1, lwd = 2, col = 'red2')
box(lty = 1, col = "dimgray")
axis(1, at = seq(StartPlot, EndPlot, by = 10), tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray",
     labels = TRUE, cex.axis = 0.8) # MEJORAR?
axis(2, at = seq(0, 1, by = 0.2), tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, las
     = 1, cex.axis = 0.8)
mtext("Año", 1, 2.5, col = "darkslategrey", font = 2); mtext("Valor normalizado", 2, 2.5, col =
     "darkslategrey", font = 2) #Cambié a castellano
mtext(Title, 3, 1, adj = 0.5, line = -1.8, cex = 1.5, col = "navyblue")
dev.off()

```



#### 4. Loess - Todos los EPT's en un gráfico

```
#### COMIENZO ####

rm(list = ls())
dev.off()
Today <- format(Sys.Date(), "%Y%m%d")
library(openxlsx)
library(dplyr)

#### DEFINICIÓN DE PARÁMETROS ####

# Nombre de archivos

WD      <- "C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA"
NameList <- "List of files and folders 20180329.xlsx"

#### Acciones derivadas ####

setwd(WD)
List      <- read.xlsx(NameList, sheet = 1)
NameG     <- List$Name[List$Variable == "NameG"]
NameContaminant <- List$Name[List$Variable == "NameContaminant"]
NameGC    <- List$File[List$Variable == "NameG"]
NameContaminantC <- List$File[List$Variable == "NameContaminant"]

#### Apertura de archivos ####

G      <- read.csv(NameGC, header = TRUE, skip = 0, stringsAsFactors = FALSE) #4407
Contaminant <- read.xlsx(NameContaminantC, sheet = 1)
colnames(Contaminant) <- c("Contaminant", "NameContaminant", "Subfamily", "NameSubamily", "Family")
Family     <- unique(Contaminant$Family)
Subfamily  <- unique(Contaminant$Subfamily)
G <- G %>% filter(unit == "ppm") #3859
```

```

#### Crear directorio para gráficos ####
setwd("C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA/ES.VALIDACION_1019")
spans<-read.csv("spans_1019.csv")
add.alpha <- function(cols, alpha) rgb(t(col2rgb(cols)/255), alpha = alpha)#transparencia colores

#### GRÁFICOS DE EPT´s POR REGIÓN Y GLOBAL ####

#### Global####
TimeMax <- as.data.frame(matrix(nrow = 9,ncol = 1))
TimeMax <- numeric()
i <- 0

png( filename = "compilado global_1.png", res = 300,
      units = "cm",width = 15,height = 10)
par(mar = c(4.1,4.1,2.1,2.1))
plot(x=1,y=1,ylim=c(0,1),xlim=c(1900, 2015),type="n",
      xaxt="n",yaxt="n",xlab="",ylab="",axes = FALSE, xaxs="i",yaxs="i")
col.pal<- add.alpha(c("blue3","orange1", "maroon1", "blueviolet",
                    "forestgreen", "yellowgreen", "deepskyblue3",
                    "turquoise3", "firebrick1" ), 0.7)
spansglobal<-spans$global # spans resultado de la validación cruzada

for(SUB in Subfamily){
  #SUB <- "Cr" # Test
  i <- i + 1
  cat(SUB,"\n")
  X <- G$year[G$Sub.family == SUB]
  Y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB]
  Xmin <- min(X, na.rm = TRUE)
  Xmax <- max(X, na.rm = TRUE)
  XX <- seq(Xmin, Xmax, (Xmax - Xmin)/10000)
  # Local regression: loess()
  Loess <- loess(Y ~ X, span = spansglobal[i])
  Fit <- predict(Loess, newdata = XX, se = TRUE)
  lines(XX, Fit$fit, ann = FALSE, lty = 1, lwd = 2.1, cex = 0.35, col = col.pal[i] )
}

```

```

    TimeMax[i] <- XX[Fit$fit == max(Fit$fit)]
  }

box(lty = 1, col = "dimgray")
axis(side = 1, tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, cex.axis = 0.8)
axis(side = 2, tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, las = 1, cex.axis
= 0.8)
mtext("Año",1,2.5, col = "darkslategrey", font = 1, cex = 0.8); mtext("Concentración escalada",2,2.5,
col = "darkslategrey", font = 1, cex = 0.8)
mtext("Curvas de concentraciones globales", adj = 0.5 , line = 0.4, cex = 0.8, col = "navyblue")
legend("topright", c(Subfamily), cex = 0.6, adj = 0.75, xpd=TRUE, horiz=TRUE, bty = "n",
      lty=c(1,1,1,1,1,1,1,1,1), col = c("blue3","orange1", "maroon1", "blueviolet",
      "forestgreen", "yellowgreen", "deepskyblue3",
      "turquoise3", "firebrick1"))

dev.off()

####Norte####

TimeMax_N <- as.data.frame(matrix(nrow = 9,ncol = 1))
TimeMax_N <- numeric()
i <- 0

png( filename = "compilado Norte_1.png", res = 300,
      units = "cm",width = 15,height = 10)
par(mar = c(4.1,4.1,2.1,2.1))
plot(x=1,y=1,ylim=c(0,1),xlim=c(1900, 2015),type="n",
      xaxt="n",yaxt="n",xlab="",ylab="",axes = FALSE, xaxs="i",yaxs="i")

col.pal<- add.alpha(c("blue3","orange1", "blueviolet",
      "deepskyblue3",
      "firebrick1" ), 0.7)
#Se quitan colores porque no hay datos de esos EPT's
spansnorte<-spans$norte

```

```

spansnorte<-na.omit(spansnorte)
for(SUB in Subfamily){
  #SUB <- "Cr"                                # Test
  if (SUB == "Hg") next
  if (SUB == "Cr") next
  if (SUB == "Ni") next
  if (SUB == "V") next
  #if ( == 0) next
  i <- i + 1
  cat(SUB,"\n")
  X <- G$year[G$Sub.family == SUB & G$side == "N"] # Región NORTE
  Y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB & G$side == "N"] # Región NORTE
  Xmin <- min(X, na.rm = TRUE)
  Xmax <- max(X, na.rm = TRUE)
  XX <- seq(Xmin, Xmax, (Xmax - Xmin)/10000)
  Loess <- loess(Y ~ X, span = spansnorte[i])
  Fit <- predict(Loess, newdata = XX, se = TRUE)
  lines (XX, Fit$fit, axes = FALSE, ann = FALSE, lty = 1, lwd = 2, cex = 0.35, col=col.pal[i])
  TimeMax_N[i] <- XX[Fit$fit == max(Fit$fit)]
}

box(lty = 1, col = "dimgray")
axis(side = 1, tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, cex.axis = 0.8)
axis(side = 2, tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, las = 1, cex.axis
= 0.8)
mtext("Año",1,2.5, col = "darkslategrey", font = 1, cex = 0.8); mtext("Concentración escalada",2,2.5,
col = "darkslategrey", font = 1, cex = 0.8)
mtext("Curvas de concentraciones norte", adj = 0.5 , line = 0.4, cex = 0.8, col = "navyblue")
legend("topright", c("Ag", "Cd", "Cu", "Pb", "Zn"), cex = 0.6, adj = 0.75, xpd=TRUE, horiz=TRUE,
bty = "n",
      lty=c(1,1,1,1,1), col = c("blue3","orange1", "blueviolet","deepskyblue3", "firebrick1"))

dev.off()

```

```

####Sur####

TimeMax_S <- as.data.frame(matrix(nrow = 9,ncol = 1))
TimeMax_S <- numeric()
i <- 0

png( filename = "compilado Sur_1.png", res = 300,
      units = "cm",width = 15,height = 10)
par(mar = c(4.1,4.1,2.1,2.1))
plot(x=1,y=1,ylim=c(0,1),xlim=c(1900, 2015),type="n",
      xaxt="n",yaxt="n",xlab="",ylab="",axes = FALSE, xaxs="i",yaxs="i")

col.pal<- add.alpha(c("blue3","orange1", "maroon1", "blueviolet",
                     "forestgreen", "yellowgreen", "deepskyblue3",
                     "turquoise3", "firebrick1" ), 0.7)

spanssur<-spans$sur

for(SUB in Subfamily){
  #SUB <- "Cr"                # Test
  i <- i + 1
  #Title <- paste0("LME05 Años máximos Sur - ",SUB)
  cat(SUB,"\n")
  X <- G$year[G$Sub.family == SUB & G$side == "S"] # Región SUR
  Y <- G$Norm[G$Sub.family == SUB & G$side == "S"] # Región SUR
  Xmin <- min(X, na.rm = TRUE)
  Xmax <- max(X, na.rm = TRUE)
  XX <- seq(Xmin, Xmax, (Xmax - Xmin)/10000)
  # Local regression: loess()
  Loess <- loess(Y ~ X, span = spansur[i])
  Fit <- predict(Loess, newdata = XX, se = TRUE)
  lines (XX, Fit$fit, axes = FALSE, ann = FALSE, lty = 1, lwd = 2, cex = 0.35, col=col.pal[i])
  TimeMax_S[i] <- XX[Fit$fit == max(Fit$fit)]
}

```

```

box(lty = 1, col = "dimgray")
axis(side = 1, tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, cex.axis = 0.8)
axis(side = 2, tck = -0.02, col.ticks = "dimgray", col = "dimgray", labels = TRUE, las = 1, cex.axis
= 0.8)
mtext("Año",1,2.5, col = "darkslategrey", font = 1, cex = 0.8); mtext("Concentración escalada",2,2.5,
col = "darkslategrey", font = 1,cex = 0.8)
mtext("Curvas de concentraciones sur", adj = 0.5 , line = 0.4, cex = 0.8, col = "navyblue")
legend("topright", c(Subfamily), cex = 0.6, adj = 0.75, xpd=TRUE, horiz=TRUE, bty = "n",
      lty=c(1,1,1,1,1,1,1,1,1), col = c("blue3","orange1", "maroon1", "blueviolet",
      "forestgreen", "yellowgreen", "deepskyblue3",
      "turquoise3", "firebrick1"))
dev.off()

```

## 5. Mapas con concentraciones máximas.

```
#### COMIENZO ####

rm(list = ls())
dev.off()
library(tidyr)
library(dplyr)
library(mapproj)
library(mapplots)
library(rworldmap)
library(ggmap)
library(openxlsx)

#### DEFINICIÓN DE PARÁMETROS ####

WD      <- "C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA"
setwd(WD)

#### ASIGNACIÓN DE VARIABLES####

NameList <- "List of files and folders 20180329.xlsx"
List     <- read.xlsx(NameList, sheet = 1)
DirScatterPlots <- List$Name[List$Variable == "DirScatterPlots"]

NameContaminant <- List$Name[List$Variable == "NameContaminant"]
NameContaminantC <- List$File[List$Variable == "NameContaminant"]
Contaminant <- read.xlsx(NameContaminantC, sheet = 1)
Subfamily <- unique(Contaminant$`Sub-family`)
setwd("C:/Users/Toshiba/Dropbox/POSGRADO-BRENDA/ES.VALIDACION_1019/mapas")
Maximos <- read.csv(file = "Conc_maxgral.csv", header = TRUE, sep = ",",
                    skip = 0, stringsAsFactors = FALSE)
```

```

####loop 2019####

col.pal<-c("blue3","orange1", "maroon1", "blueviolet",
          "forestgreen", "yellowgreen", "deepskyblue3",
          "turquoise3", "firebrick1")

i<-0
for(SUB in Subfamily){
  # SubFamily loop
  i<-i+1
  Max <- subset(Maximos, Sub.family == SUB)
  cat(SUB,"\n")
  Max <- dplyr::select(Max,TS, Max,longitude,latitude)
  colnames(Max) <- c("ST","Conc.,"long.,"lat.")
  Title <- paste0("LME05 - Maximos",SUB)
  NamePlot <- paste0(Title,".png")
  png( NamePlot, res = 300,
       units = "cm",width = 15,height = 10, bg = "transparent")
  par(
    mai = c(0, 0, 0.2, 0),
    xaxs = "i",
    yaxs = "i"
  )
  plot(x=1,y=1,ylim=c(0,1),xlim=c(1900, 2015),type="n",
       xaxt="n",yaxt="n",xlab="",ylab="",axes = FALSE, xaxs="i",yaxs="i")

  mapBubbles(dF= Max, nameX = "long.", nameY = "lat.", nameZSize = "Conc.",
             nameZColour = adjustcolor(col.pal[i],alpha.f=0.4),fill=TRUE,
             pch = 21, symbolSize = 1, xlim=c(-119, -80), ylim=c(18,30),
             borderCol = "turquoise4", addLegend = FALSE, legendPos = "bottomleft",
             plotZeroVals = TRUE, xaxt="n",yaxt="n", add = FALSE, maxZVal = 100,
             lwd= 0.1, lwdSymbols=1, legendBg = "white", addColourLegend = FALSE,
             landCol = "honeydew2", legendTitle = expression(ppm))

  title(main=paste0("Concentraciones máximas LME 05 - ",SUB), cex.main = 1, col.main = "navyblue")
}

```



```
legend.bubble("bottomleft",z=round(c(1,10,100 )), bty = "n", maxradius = 1,  
             bg = NULL, txt.cex =0.6 , pch = 21, pt.bg= adjustcolor(col.pal[i], alpha=.5),  
             inset = 0.05)  
legend( -120, 18,legend = "Concentración (ppm)", bty = "n", text.col = "darkslategrey", cex =  
0.6)# La leyenda se ubica con coordenadas x,y =latitud y longitud  
box(lty = 1, col = "dimgray")  
dev.off()  
  
}
```