



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



EVALUACIÓN DE TASAS DE CAMBIO EN EL NIVEL DEL MAR Y TENDENCIAS EN FLUJOS DE ELEMENTOS TRAZA EN VERACRUZ

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

PRESENTA

M.C. SARA BOJORQUEZ SANCHEZ

LA PAZ, B.C.S., MAYO DE 2017

A Dios, por darme salud y permitirme llegar hasta este momento.

A mi esposo Jorge por su amor y apoyo incondicional.

A mis familiares y amigos por su cariño.

AGRADECIMIENTOS

A la Doctoras Ana Judith Marmolejo Rodríguez y Ana Carolina Ruiz Fernández por su dirección y enseñanzas.

A la Dra. Ana Judith Marmolejo Rodríguez por su apoyo, cariño y amistad durante mi estancia en la ciudad de La Paz.

A Dr. Alberto Sánchez González por su apoyo, enseñanzas y hospitalidad de él y su familia.

A los doctores integrantes del comité de tesis: Sergio Aguíñiga García y Enrique H. Nava Sánchez por sus consejos y sugerencias.

Al doctor Joan Albert Sanchez Cabeza por su asesoría y sugerencias.

Al Químico Humberto Bojórquez Leyva por su ayuda en la realización de los análisis de fósforo total y sílice biogénico en el laboratorio de química del ICMYL, Mazatlán.

A M.C. Libia Hascibe Pérez Bernal por su ayuda en diversos análisis de laboratorio.

A Ángel Humberto Ruvalcaba Díaz por su ayuda en la realización de los análisis de isótopos estables en el laboratorio LESMA de CICIMAR-IPN.

A Humberto H. Ceseña Amador, César C. Casas Núñez y María M. Mendoza Tlapa por su apoyo en los trámites administrativos.

A Susana Cárdenas y Roberto Aguilera por su ayuda en el departamento de informática.

A Armando Hernández López por su colaboración en la elaboración de mapas de la zona de estudio de este trabajo.

A mi esposo el Cap.Alt. Jorge Luis Santoyo Velarde por ayudarme en los análisis de tamaño de grano, así como acompañarme en las largas jornadas en el laboratorio, ser el pilar de mi vida, por su amor, por darme fuerzas en los momentos difíciles, por hacerme sonreír siempre y porque sin él, simplemente este proceso no hubiera significado lo mismo, te amo bombón.

A mi amiga Lirio González por su amistad incondicional en todos estos años, por su ayuda, sus visitas a La Paz, su comprensión en momentos difíciles y también por compartir conmigo momentos de felicidad.

A mis amigas mazatlecas: Nohemí Marroquín, Perla Mellado y Silvia Torres por su apoyo incondicional aún en la distancia.

A mis amigos paceños: Ana Talavera, Fernando Becerra, Karen Velázquez, Miryam Juárez y Miriam Meraz por todas las reuniones tan agradables, llenas de filosofía y humor, pero principalmente por su amistad.

A mi amiga Rosiela Robles por su amor y darme ese calor de hogar en mi estancia en la ciudad de La Paz.

A mis amigas Elizabeth Falcón y Georgina Villela por haberle brindado su amistad y abrirme las puertas de sus casas, haciendo mi estancia en La Paz más amena.

A mis compañeras de laboratorio de geocronología: Perla López, Estephanie Meza y Jorge Serrato por su apoyo en mis estancias en Mazatlán.

A mis papás Humberto Bojórquez y Patricia Sánchez por brindarme su amor incondicional, apoyo y comprensión durante este proceso, agradezco a Dios por haberme dado a ustedes como papás, los amo.

A mis suegros Delma P. Velarde Zatarain y Jorge L. Santoyo Arce por su apoyo desde el inicio de mi doctorado, por ayudarme con mi mudanza, animarme y ayudarme en todo momento.

A mi hermanos Samuel, Sandra y Carolina por ser un soporte y alegrarme los días con sus palabras.

A mis cuatro sobrinos Emanuel, Gadiel, Joel y Emil por llenar de alegría mi vida con sus sonrisas, los amo.

A mis familiares, tías (Vicky y Eva) y tíos (Adán y Noé), cuñados (Ricardo y César) y especialmente a mi abuelo (Don Chito) por compartir conmigo sus experiencias de vida y siempre brindarme un abrazo.

Tesis de Doctorado:
EVALUACIÓN DE TASAS DE CAMBIO EN EL NIVEL DEL MAR Y TENDENCIAS
EN FLUJOS DE ELEMENTOS TRAZA EN VERACRUZ

Presentada por:
M.C. SARA BOJORQUEZ SANCHEZ

Este trabajo fue apoyado por:

- Proyecto **CONACyT-153492** titulado “Registros ambientales del cambio global: reconstrucción de cambios recientes (<100 años) en el nivel del mar a partir del estudio de sedimentos costeros”. Dirigido por: Dra. Ana Carolina Ruiz Fernández.
- Proyecto **SIP-IPN 20150722** titulado “Biogeoquímica de elementos mayores y traza, e isótopos estables de nitrógeno en cuencas hidrográficas. Fase II”. Dirigido por: Dra. Ana Judith Marmolejo Rodríguez.
- Proyecto **SIP-IPN 20160972** titulado “Geoquímica de elementos mayores y traza en sedimentos con influencia de yacimientos minerales”. Dirigido por: Dra. Ana Judith Marmolejo Rodríguez.
- Proyecto **SIP-IPN 20164779** titulado “Las praderas de pastos marinos como bioindicadores de la salud ambiental en el litoral de Quintana Roo”. Dirigido por: Dr. Alberto Sánchez González.
- Parte de los datos de esta tesis se encuentran publicados en la revista científica *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, con la siguiente referencia:
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. *Estuar Coast Shelf Sci*, doi: **10.1016/j.ecss.2017.05.005**. En prensa.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Marco teórico	3
1.1.1. ^{210}Pb	3
1.1.2. Elementos traza en la columna sedimentaria	6
1.1.3. Normalización	6
1.1.4. Factor de Enriquecimiento Normalizado (FEN)	8
1.1.5. Diagénesis	8
2. ANTECEDENTES	10
2.1. Ritmos de acreción sedimentaria	10
2.1.1. Estudios realizados en México	10
2.1.2. Estudios realizados alrededor del mundo	11
2.2. Elementos traza en sistemas cercanos a centrales nucleoelectricas	12
3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	14
4. HIPÓTESIS	14
5. OBJETIVOS	15
6. ÁREA DE ESTUDIO	16
6.1. Laguna El Llano	18
6.2. Laguna Salada	18
7. MATERIAL Y MÉTODOS	19
7.1. Muestreo y preparación de muestras	19
7.1.1. Cálculo de la humedad	20
7.1.2. Cálculo de la porosidad	20
7.1.3. Cálculo de la profundidad de masa acumulada	21
7.2. Caracterización e identificación de ambientes sedimentarios	22
7.2.1. Tamaño de grano	22
7.2.2. Susceptibilidad Magnética (SM)	22

7.2.3. Carbono Orgánico (C_{org}), Carbono Inorgánico ($CaCO_3$) y Nitrógeno (N)	23
7.2.4. Composición Isotópica ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$)	23
7.2.5. Fósforo Total (P_{Tot})	23
7.2.6. Determinación de Sílica Biogénica (bSi)	24
7.3. Determinación de los ritmos de acreción sedimentaria	24
7.3.1. Fechado con el método de ^{210}Pb	25
7.3.2. ^{210}Pb soportado ($^{210}Pb_{sop}$)	26
7.3.3. ^{210}Pb en exceso ($^{210}Pb_{xs}$)	26
7.3.4. Modelos de fechado con ^{210}Pb	26
7.3.5. Flujo atmosférico de ^{210}Pb	27
7.4. Registro completo de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta 2013 y su comparación con los registros de marea disponibles	27
7.5. Evaluación de las concentraciones de elementos traza y la influencia de la planta nucleoelectrónica Laguna Verde	28
7.5.1. Determinación de factores de enriquecimiento normalizados	28
7.5.2. Determinación de flujos de elementos	29
7.6. Control de calidad	29
7.7 Análisis estadísticos	30
8. RESULTADOS	31
8.1. Caracterización de los núcleos sedimentarios	31
8.1.1. Perfiles de tamaño de grano y susceptibilidad magnética con respecto a la profundidad	32
8.1.2. Perfiles de Carbono orgánico (C_{org}), Nitrógeno (N), $CaCO_3$, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ y C:N con respecto a la profundidad	35
8.1.4. Fósforo Total (P_{tot}) y Sílice Biogénica (bSi)	37
8.2. Tasas de acreción ($mm\ a\tilde{no}^{-1}$) y su relación con el cambio del nivel del mar	39
8.2.1. ^{210}Pb total	39
8.2.2. ^{210}Pb soportado	40
8.2.3. ^{210}Pb en exceso	41

8.2.4. Fechado	42
8.2.5. Tasas de Acumulación Sedimentaria (TAS) y Másica (TAM)	45
8.3. Registro de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta 2013	46
8.4. Concentraciones de elementos mayores y traza, y la influencia de la Central Nuclear Laguna Verde (CNLV)	48
8.4.1. Concentraciones de elementos mayores y traza	48
8.4.2. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs)	54
8.4.3. Flujos de elementos	57
9. DISCUSIÓN	61
9.1. Caracterización de ambientes sedimentarios	61
9.2. Relación de las tasas de acreción sedimentaria (TAS) y el cambio del nivel del mar	64
9.3. Registro de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta 2013	65
9.4. Concentraciones de elementos mayores y traza, y la influencia de la Central Nuclear Laguna Verde (CNLV)	67
9.4.1. Influencia de actividad minera en la zona	70
9.4.2. Flujos de elementos	73
9.5. Análisis estadísticos	76
9.5.1. Correlación de Pearson	76
9.5.2. Análisis de componentes principales	77
10. CONCLUSIONES	82
11. BIBLIOGRAFIA	83
12. ANEXOS	99
13. GLOSARIO	108

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1.1. Esquema de la serie de decaimiento del ^{238}U .	3
6.1. Ubicación geográfica de las lagunas Salada y El Llano, en el estado de Veracruz. Localización de los sitios de muestreo en cada laguna.	17
6.2. Mapa geológico de la zona norte de Veracruz. Localización de la región minera Chiconquiaco. Modificado del Servicio Geológico Mexicano (2014).	19
8.1.1a. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo SAI de laguna Salada.	32
8.1.1b. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo SAI de laguna Salada.	33
8.1.1c. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo LL1 de laguna El Llano.	34
8.1.1d. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo LL2 de laguna El Llano.	34
8.1.2a. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, CaCO_3 (%); $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo SAI de laguna Salada.	35
8.1.2b. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, CaCO_3 (%); $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo SAI de laguna Salada.	36
8.1.2c. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, CaCO_3 (%); $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo LL1 de laguna El Llano.	36

8.1.2d. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, $CaCO_3$ (%); $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo LL2 de laguna El Llano.	37
8.1.4a. Perfiles de concentración de Fósforo total (P_{Tot} ; $mg\ g^{-1}$) con respecto a la profundidad en los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	38
8.1.4b. Perfiles de concentración de sílice biogénico (bSi ; %) con respecto a la profundidad en los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	38
8.2.1. Perfiles de actividad de ^{210}Pb total ($Bq\ kg^{-1}$) con respecto a la profundidad (cm) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	40
8.2.2. Perfiles de valores de los índices de TIF con respecto a la profundidad (cm) de los núcleos SAI y SAI de laguna Salada.	41
8.2.3. Perfiles de actividad de ^{210}Pb en exceso ($Bq\ kg^{-1}$) con respecto a la masa acumulada ($g\ cm^{-2}$) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	42
8.2.4a. Regresión lineal entre los valores de $\ln^{210}Pb_{xs}$ y la masa acumulada ($g\ cm^{-2}$) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	43
8.2.4b. Modelos de edad derivados del método de ^{210}Pb de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2) con respecto a la profundidad.	44
8.2.5a. Perfiles de tasas de acumulación sedimentaria ($cm\ año^{-1}$) con respecto a la edad (años) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	45
8.2.5b. Perfiles de tasas de acumulación másica ($g\ cm^{-2}\ año^{-1}$) con respecto a la edad (años) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).	46
8.3. Tendencia de cambio del nivel del mar en la estación mareográfica de Veracruz. Tomado de Zavala-Hidalgo, et al., 2010.	47

8.4.1a. Perfiles de concentraciones de elementos (mg kg^{-1} , excepto $^*\text{Hg}$: ng kg^{-1}) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo SAI de laguna Salada.	50
8.4.1b. Perfiles de concentraciones de elementos (mg kg^{-1} , excepto $^*\text{Hg}$: ng kg^{-1}) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo SAII de laguna Salada.	51
8.4.1c. Perfiles de concentraciones de elementos (mg kg^{-1} , excepto $^*\text{Hg}$: ng kg^{-1}) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo LL1 de laguna El Llano.	52
8.4.1d. Perfiles de concentraciones de elementos (mg kg^{-1} , excepto $^*\text{Hg}$: ng kg^{-1}) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo LL2 de laguna El Llano.	53
8.4.2a. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo SAI de laguna Salada.	56
8.4.2b. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo SAII de laguna Salada.	56
8.4.2c. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo LL1 de laguna El Llano.	57
8.4.2d. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo LL2 de laguna El Llano.	57
8.4.3a. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo SAI de laguna Salada.	59
8.4.3b. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo SAII de laguna Salada.	59
8.4.3c. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo LL1 de laguna El Llano.	60

8.4.3d. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo LL2 de laguna El Llano.	60
9.4.1a. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo SAI de laguna Salada.	70
9.4.1b. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo SAll de laguna Salada.	71
9.4.1c. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo LL1 de laguna El Llano.	71
9.4.1d. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo LL2 de laguna El Llano.	72
9.4.2a. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo SAI de laguna Salada.	73
9.4.2b. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo SAll de laguna Salada.	74
9.4.2c. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo LL1 de laguna El Llano.	75
9.4.2d. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo LL2 de laguna El Llano.	75
9.5a. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 60.4% de la varianza total en el núcleo SAI de laguna Salada.	78
9.5b. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 79% de la varianza total en el núcleo SAll de laguna Salada.	79
9.5c. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 57.5% de la varianza total en el núcleo LL1 de laguna El Llano.	80

9.5d. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 55% de la varianza total en el núcleo LL2 de laguna El Llano.	81
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
7.1. Coordenadas de muestreo y longitud de los núcleos sedimentarios	20
7.6. Porcentajes de recuperación obtenidos para los elementos medidos en los materiales de referencia PACS-2, MESS-3 y AGV-2	30
8.1. Resultados de los análisis geoquímicos realizados en los núcleos sedimentarios correspondientes a Laguna Salada y Laguna El Llano	31
8.2. Valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ obtenidos en los cuatro núcleos de Laguna Salada y El Llano	39
8.3. Tasas medias de cambio de nivel del mar (mm año^{-1}) y su periodos de cálculo para los núcleos Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2)	47
8.4.1. Intervalos de concentraciones y promedios de elementos (mayores y traza) en los núcleos sedimentarios SAI, SAII, LL1 y LL2.	48
8.4.2. Intervalos de valores de Factores de Enriquecimiento (FENs) calculados a partir de los Valores de la Corteza (VC, Wedepohl, 1995) y los Valores de Fondo (VF) regionales.	55
8.4.3. Intervalos de los valores de flujos de elementos enriquecidos para los núcleos de Laguna Salada y El Llano.	58
9.1. Comparación entre las variables geoquímicas de sedimentos reportadas alrededor del mundo.	63
9.3. Estudios sobre evidencia de cambio del nivel del mar en la zona del Golfo de México.	66
9.4. Estudios sobre evaluaciones de elementos traza en zonas cercanas a plantas de energía nuclear alrededor del mundo.	69

RESUMEN

Existe evidencia de aumento de nivel del mar a escala global así como de las afectaciones que implica en las zonas costeras. Sin embargo, los cambios no son homogéneos por tanto es importante evaluarlos regionalmente. Los sedimentos de marismas son valiosos para estudiar cambios en el nivel del mar, así como para medir los flujos de elementos traza en sitios cercanos a industrias y zonas mineras. En este estudio se evaluaron las tasas de cambio de nivel del mar y los flujos de elementos mediante ^{210}Pb traza en 4 núcleos sedimentarios de las lagunas: Salada y El Llano, Veracruz. Ambas se encuentran cerca de la región minera Chiconquiaco, además, Laguna Salada actúa como cuerpo receptor de las aguas de enfriamiento de la Central Nuclear Laguna Verde (CNLV). Los núcleos SAI, SAIL, LL1 y LL2 se muestrearon con tubos de PVC de 50 cm de longitud y 12 cm de diámetro. Los sedimentos se pesaron y liofilizaron, posteriormente, análisis de tamaño de grano (dispersión laser), Susceptibilidad Magnética, ^{13}C y ^{15}N (espectrometría de masas), Carbono, Nitrógeno (analizador elemental), Fósforo total y Sílice Biogénico se aplicaron para caracterizar los sedimentos. El fechado se realizó a través del análisis de ^{210}Po por espectrometría alfa, y los elementos traza (Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, V, Zn y otros) se analizaron mediante ICP-MS. Los métodos se validaron con materiales de referencia certificados. Los resultados mostraron ascenso del nivel del mar en los cuatro núcleos. Las tasas medias de acumulación sedimentaria obtenidas fueron: 3.5 ± 0.6 , 2.6 ± 0.2 , 1.4 ± 0.2 y 3.1 ± 1.1 mm año⁻¹ para SAI, SAIL, LL1 y LL2, respectivamente; las cuales fueron comparables con la tasa de cambio de nivel del mar global (3.2 mm año⁻¹). Se observaron enriquecimientos significativos de Ag, As y Cr, los cuales se relacionaron con la región minera Chiconquiaco y con la litología de la zona costera. No hubo evidencia de contaminación de elementos traza provenientes de la CNLV en Laguna Salada y El Llano.

ABSTRACT

There is evidence of global sea-level rise as well as its affectations in coastal areas. However, the changes are not homogeneous around the world, therefore, it is important to assess regionally. Marsh sediments are valuable to evaluate changes in sea-level, as well as trace elements fluxes in places close to industries and mining areas. In this study, the sea-level change rates and element fluxes through ^{210}Pb in 4 sedimentary cores from Salada and El Llano coastal lagoons (Veracruz) were evaluated. Both lagoons are close to the mining region Chiconquiaco, besides, Salada lagoon acts as a receptor body of cooling water from Laguna Verde Nuclear Power Plant (LVNPP). Four sediment cores were collected (SAI, SAII, LL1 and LL2) with PVC tubes 50 cm in length and 12 cm diameter. Cores were cut in slices of 1 cm, weighted and freeze-dried. After that, grain size (laser scattering), Magnetic Susceptibility, ^{13}C and ^{15}N (mass spectrometry), carbon, nitrogen (elemental analyzer), total phosphorus and silica biogenic analysis were done to characterize the sediment. ^{210}Pb dating was done through alpha spectrometry of ^{210}Po . Trace elements (Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, V, Zn and others) were analyzed by ICP-MS method. The methods were validated with certified reference materials. The results showed sea level rise in all sediment cores. Average rates of sediment accumulation obtained were: 3.5 ± 0.6 , 2.6 ± 0.2 , 1.4 ± 0.2 and 3.1 ± 1.1 mm yr $^{-1}$ for SAI, SAII, LL1 and LL2, respectively; which were comparable to the global sea-level change rate (3.2 mm yr $^{-1}$). Significant enrichments of Ag, As and Cr related to the mining region Chiconquiaco and lithology of the coastal zone were observed. There was no evidence of contamination of trace elements from LVNPP in Salada and El Llano lagoons.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio global reciente se refiere a los cambios observados en el medio ambiente a escala planetaria durante los últimos 100 años, y que son resultado de diversas actividades humanas (GCRIO, 1990). El cambio global implica diversas manifestaciones, una de las más importantes es el aumento del nivel del mar. La elevación del nivel del mar tendría implicaciones como pérdida de hábitat en los ecosistemas costeros, inundaciones en las ciudades, erosión de playas, cambios en los ritmos de sedimentación, incremento en la salinidad de marismas, estuarios y acuíferos, entre otros (CCSP, 2009; GCRP, 2009).

El aumento del nivel del mar puede poner en riesgo a la población y la infraestructura de la zona costera ya que en eventos como tormentas, el oleaje generado partirá de un nivel medio del mar mayor y puede provocar procesos de erosión significativos (IPCC, 2001). Esto afectaría al 44% de la población mundial que habita entre los primeros 100 km entre la costa y los continentes (Crossland et al., 2005).

Las observaciones recientes del cambio del nivel del mar están de acuerdo con el calentamiento global, ya que a partir de 1961, el nivel de mar aumentaba a una velocidad promedio de 1.8 mm año^{-1} y, desde 1993 a 3.1 mm año^{-1} (IPCC, 2013). El aumento del nivel medio global debido a expansión térmica es casi proporcional al incremento en el contenido de calor en el océano. La tasa de elevación de nivel del mar medio global calculada solamente por expansión térmica es de 0.8 mm año^{-1} (de 1971 a 2010) para un intervalo de 0 a 700 m de profundidad (IPCC, 2013). Estudios demuestran que entre 1880 y 1985 el nivel del mar ha subido entre 2 y 5 cm debido al efecto de expansión térmica provocado por el efecto invernadero en la atmósfera (Wigley y Raper, 1987). Sin embargo, el aumento del nivel del mar no es globalmente homogéneo, por lo tanto, es importante disponer de información confiable sobre el cambio del nivel de mar a escala local y regional, para corroborar los resultados de las proyecciones climáticas y planificar estrategias de adaptación basadas en información científica contrastada.

Una manera de cuantificar el cambio del nivel del mar es mediante la reconstrucción histórica de los cambios ambientales en un ecosistema, para lo cual

se requiere obtener la cronología de los eventos ambientales ocurridos en el sitio. Los sedimentos sirven como geo-indicadores de cambios ambientales debido a que son capaces de preservar información valiosa acerca del impacto a largo plazo de las actividades humanas en el medio ambiente (Emadodin, 2011).

Las marismas son ecosistemas formados en la zona de transición entre el continente y el océano, en estos sitios, la acumulación de sedimento está sujeta a las variaciones mareales, donde la energía liberada por el movimiento del agua es baja y permite la acumulación de sedimentos (Woodroffe, 2003; SMS, 2010). Por tanto, los núcleos de sedimento de marisma hacen posible el estudio de cambio en el nivel del mar, con base en que los ritmos de acreción en estos sitios van de acuerdo al cambio en el nivel del mar (Schwartz, 2005; Bindoff et al., 2007).

Los registros sedimentarios, además de permitir observar el cambio del nivel del mar, también hacen posible evaluar la contaminación ambiental, ya que pueden proporcionar información acerca de condiciones naturales y de antropización en los ecosistemas. Es de esperar que el sedimento cercano a centrales nucleoelectricas (CN) no esté contaminado por elementos traza; por esta y más razones se denominan plantas productoras de energías limpias (USEPA, 2013). Sin embargo, existen estudios en los que se ha observado contaminación por elementos traza en sedimentos (Serbia y Montenegro; Dalmacija et al., 2006) y en vegetación (República Checa; Thnova et al., 2014), cuyos sitios se encuentran cercanos a descargas industriales, de CN y domésticas.

En México, hacen falta series temporales a largo plazo que permitan estimar las tendencias del cambio global, que reflejen, por ejemplo, la velocidad de cambio del nivel del mar y las tendencias de la contaminación por elementos traza. El uso de registros ambientales, tales como los núcleos sedimentarios de sistemas costeros, son una buena alternativa para obtener esta información.

Por todo lo anterior, existe la necesidad de obtener registros ambientales recientes (de hace 100 a 150 años) del cambio global, que permitan estimar las tasas de cambio en el nivel del mar, y las tendencias temporales en los flujos de elementos mayores y traza en las llanuras de inundación (marismas) de las lagunas Salada y El Llano, en el estado de Veracruz.

1.1. Marco teórico

Para comprender mejor las herramientas analíticas que se utilizaron en este estudio, a continuación se describirán algunos fundamentos teóricos acerca del método de fechado, así como la normalización de elementos traza y factores de enriquecimiento en los sedimentos.

1.1.1. ^{210}Pb

El ^{210}Pb es miembro de la serie de decaimiento del ^{238}U y tiene una vida media de 22.26 años. La fuente de ^{210}Pb es el ^{222}Rn (formado por el decaimiento de ^{226}Ra), el cual escapa de los intersticios de los suelos hacia la atmósfera, donde decae a través de una secuencia de radionúclidos de vida corta a ^{210}Pb (Fig. 1.1; Lieser, 2001). En el aire, el ^{210}Pb se adhiere a partículas de polvo, gotas de agua o nieve, cae de la atmósfera por precipitación o depósito directo seco y se acumula en la superficie de los suelos, glaciares, sedimentos lacustres, marinos y estuarinos, entre otros (Appleby y Oldfield, 1992).

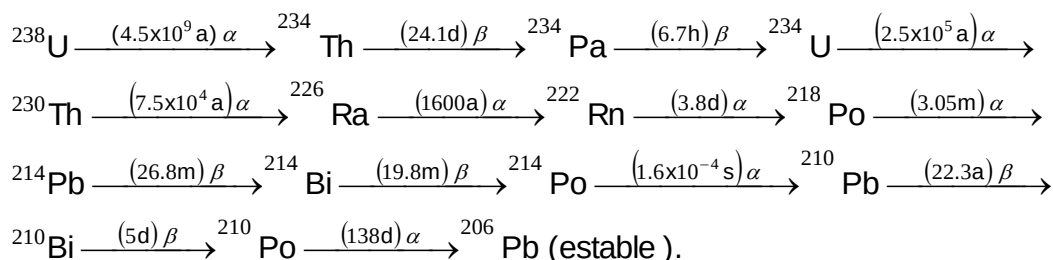


Figura 1.1. Esquema de la serie de decaimiento del ^{238}U .

La geocronología de los sedimentos con ^{210}Pb está basada en el principio de que el isótopo está siendo continuamente repartido a la superficie terrestre y se somete a un decaimiento radiactivo, seguido por su acumulación constante en los sedimentos (Edgington y Robbins, 1975). El modelo de fechado con ^{210}Pb , aplicado en secciones de un núcleo sedimentario, ha sido útil en las mediciones de las tasas de sedimentación en lagos, estuarios y sedimentos marinos costeros (Ivanovich et al., 1992). Esta técnica permite datar sedimentos en una escala de tiempo de 100 a 150 años, lo cual resulta útil para evaluar los cambios ambientales ocurridos a consecuencia del desarrollo y crecimiento moderno promovidos por la Revolución Industrial, y al usarlo junto con otras mediciones químicas (determinación de

elementos traza) puede proporcionar la historia de los efectos de las actividades antropogénicas en el ambiente (Krishnaswami et al., 1971; Bruland et al., 1974; Robbins, 1978).

El ^{210}Pb que se forma por el decaimiento in situ del ^{226}Ra , se denomina ^{210}Pb “soportado” ($^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$). El ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) que proviene principalmente del depósito atmosférico directo se llama ^{210}Pb “no soportado”. Para poder realizar el fechado con ^{210}Pb , el trazador cronológico es el componente “no soportado” ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$), dado que se supone que, una vez unido a las partículas de sedimento, permanece en la columna sedimentaria, en donde las capas sucesivas del material son enterradas por depósitos posteriores, sin más movilidad que la remoción del sedimento mismo. La cantidad de ^{210}Pb depositado en una capa dada, se reduce exponencialmente de acuerdo a la desintegración radiactiva constante y si se puede estimar la actividad inicial de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ de una capa, entonces las mediciones de las actividades de las demás capas pueden ser usadas para determinar la edad en la cual estaban en la superficie del depósito (Goldberg, 1963; Appleby y Oldfield 1992). La actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ se estima por medio del análisis de su nieto el ^{210}Po , con quien se encuentra en equilibrio secular. La radiactividad $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ se estima a partir de la actividad del radionúclido padre (^{226}Ra) en equilibrio secular con sus radionúclidos hijos (^{214}Bi y ^{214}Pb) o midiendo la actividad de ^{210}Pb en sedimentos suficientemente antiguos de manera que ya no tengan $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$; y la actividad del $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ se determina sustrayendo la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ de la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ (McCaffrey y Thomson, 1980; Oldfield y Appleby, 1984). Bajo condiciones de sedimentación uniforme y suministro constante de ^{210}Pb desde la atmósfera, la distribución vertical de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ en una columna sedimentaria debe aproximarse a una curva de decaimiento exponencial, con la actividad disminuyendo con la profundidad (Lee y Cundy, 2001).

La metodología básica para el fechado con ^{210}Pb fue establecida por Goldberg (1963). La mayoría de los estudios confirman que el depósito atmosférico del ^{210}Pb en alguna región está regida por los factores geográficos o meteorológicos locales, y es razonablemente constante cuando es promediado a través de muchos años. Donde el régimen de los factores ambientales es estable y dan un flujo de

masa constante, entonces es razonable suponer que también habrá una tasa constante de acumulación de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, y que cada capa de material tendrá la misma concentración inicial de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$:

$$C_0 = C(0)$$

donde $C(0)$ es la concentración en el depósito actual. La actividad en sedimentos de edad t es de acuerdo a:

$$C = C(0)e^{-\lambda_{210}m/r}$$

donde “ m ” denota la masa acumulada por unidad de área sobre esa capa y “ r ” es la tasa de acumulación sedimentaria ($\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$). Cuando la concentración de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, C , es graficada contra la masa acumulada “ m ” en una escala semi-logarítmica, el perfil será lineal, con una pendiente $-\lambda_{210}/r$.

Las Tasas de Acumulación Másica (TAM) y de Acumulación Sedimentaria (TAS) se calculan con base a las fórmulas siguientes (Appleby y Oldfield, 1992):

$$\text{TAM} = \frac{\text{Densidad del sedimento } (\text{g cm}^{-3}) * \text{grosor del sedimento (cm)}}{\text{Edad (años)}}$$

$$\text{TAS} = \frac{\text{Grosor del sedimento (cm)}}{\text{Edad (años)}}$$

Toda geocronología de núcleos de sedimento debe ser corroborada con algún otro método independiente. Los fechados con el método de ^{210}Pb son frecuentemente verificados con el método de ^{137}Cs . Este último es un radionúclido artificial con un tiempo de vida media de 30.14 años. Desde que se usan ambos radiotrazadores, se mejora la precisión del fechado proveyendo dos maneras independientes de medir el mismo proceso de enterramiento que ocurre dentro de un núcleo de sedimento. El ^{137}Cs está presente en el ambiente, principalmente debido al aerosol radiactivo generado en la atmósfera durante las pruebas de armas nucleares. Este aerosol radiactivo, a una escala global, empezó poco después de las pruebas iniciales a principios de los 1950's, obteniéndose los valores más altos en 1963 y después su rápido declive seguido por la implementación del tratado internacional de la prohibición de dichas pruebas. La historia de este aerosol

radiactivo es preservada frecuentemente en los registros sedimentarios de lagos y reservorios, donde en este caso, el pico más alto de la actividad de ^{137}Cs contra el perfil de profundidad es utilizado para identificar la profundidad del año 1963. En algunos casos, particularmente en Europa y la Antigua Unión Soviética, hubo un aerosol sustancial ocasionado por el accidente e incendio consecuente del reactor nuclear de Chernobyl en 1986, hasta donde el efecto del aerosol radiactivo llegó, el registro sedimentario también puede contener un segundo pico que puede ser utilizado para identificar la profundidad al año de 1986 (Ruiz-Fernández et al., 2005).

1.1.2. Elementos traza en la columna sedimentaria

La contaminación por elementos traza originada por actividades humanas puede ser identificada más fácilmente en reservorios concentrados como sedimentos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los elementos traza en sedimentos se presentan de manera natural y que sus altas concentraciones no siempre significan contaminación. Por lo anterior, antes de poder evaluar la contaminación por elementos traza en la columna sedimentaria, es importante distinguir las concentraciones naturales de las concentraciones anómalas causadas por aportes antropogénicos a los sedimentos. Por otro lado, cuando se trabaja con la evolución histórica de la contaminación por elementos traza, es importante tener en cuenta que variaciones en parámetros sedimentológicos (como el tamaño de grano), la mineralogía o parámetros geoquímicos (tales como la concentración de materia orgánica o de carbonatos), pueden afectar las concentraciones de metales, dando la falsa apariencia de un incremento o reducción en el flujo de metales (Luoma, 1990).

1.1.3. Normalización

El uso de mediciones del tamaño de partícula de los sedimentos, el cálculo de las proporciones metal/Al, metal/Li, u otra relación de elementos son aproximaciones útiles hacia una normalización completa de las concentraciones de metales, para compensar las variaciones en el tamaño de grano y la mineralogía, con lo cual es posible identificar concentraciones anómalas de metales en los

sedimentos. Los niveles anómalos de elementos traza no siempre se deben a la contaminación, sino que en algunas ocasiones pueden ser un reflejo de diferencias en las fuentes de sedimento (Loring y Rantala, 1992), o bien resultado del incremento en el contenido de material fino en el sedimento.

Para propósitos de normalización (para distinguir entre las concentraciones naturales y las antropogénicas), se recomiendan al menos las determinaciones de Li y/o Al, Sc, seguidas por Fe y Mg (para utilizarlos como elemento de referencia). También se recomiendan las determinaciones de los contenidos de materia orgánica y carbonatos, debido a que los carbonatos pueden ser un diluyente importante (bajo ciertas condiciones) y la materia orgánica a veces es un concentrador de metales pesados en sedimentos, particularmente de Hg, Pb, Cd, Fe, Cu, entre otros (Coquery y Welbourn, 1995; Sun et al., 2006). Dado que las concentraciones de elementos traza usualmente se incrementan cuando el tamaño de grano decrece, para evaluar la contaminación es importante discriminar las variaciones en el tamaño de grano. Una estrategia puede ser graficar las concentraciones del metal contra el contenido de la fracción lódica (limos y arcillas) en los sedimentos (Loring, 1990).

La normalización de las concentraciones de metales utilizando un metal de referencia, se basa en el principio de que el metal de referencia representa una cierta fracción del mineral del sedimento (por ejemplo el uso del Al como un proxy de las variaciones de la fracción de los aluminosilicatos, particularmente la fracción arcillosa y el uso del Li como un proxy para micas, y/o minerales arcillosos). El elemento utilizado tiene que ser conservativo y no ser susceptible a cambios en las condiciones de reducción/oxidación u otros procesos diagenéticos que se presentan en el sedimento y que pudieran alterar su concentración. Por lo tanto, se asume que el elemento normalizador tiene un flujo uniforme desde la corteza terrestre y consecuentemente, es posible identificar fuentes antropogénicas de metales mediante las alteraciones que se encuentren en las relaciones con los metales con respecto al elemento de referencia (Shiff y Weisberg, 1999).

1.1.4. Factor de Enriquecimiento Normalizado (FEN)

El Factor de Enriquecimiento Normalizado (FEN) permite evaluar el incremento de las concentraciones de metales por encima de los niveles basales tomando en consideración las variaciones en las características del sedimento como tamaño de grano o la mineralogía por medio de un proceso de normalización, mediante el uso de un elemento de referencia tal como Fe, Al, Ti o Li (Abraham y Parker, 2008). El elemento de referencia actúa como proxy de la fracción fina del sedimento y se considera conservativo ya que tiene un flujo uniforme desde la corteza terrestre (Loring y Rantala, 1992).

Para evaluar el nivel de contaminación por elementos traza en el sedimento de una zona, es esencial establecer los valores base o de referencia de los elementos en cuestión, para lo cual se consideran dos métodos; el primero es utilizando el promedio de los valores naturales o base de la zona y el segundo es el establecimiento de un valor de referencia local mediante el promedio de los valores de las concentraciones de elementos traza de las capas más profundas de un núcleo sedimentario que corresponda a un periodo pre-industrial. Este último método permite una comparación real hecha entre las concentraciones propias del sedimento de las capas profundas, con las concentraciones posiblemente contaminadas de las capas superiores (Abraham y Parker, 2008). Sutherland (2000) propuso una clasificación para el grado de contaminación basada en el FEN, la cual considera:

- a) $FEN < 2$ No contaminado o mínimamente contaminado
- b) $FEN 2 - 5$ Moderadamente contaminado
- c) $FEN 5 - 20$ Significativamente contaminado
- d) $FEN 20 - 40$ Fuertemente contaminado
- e) $FEN > 40$ Extremadamente contaminado

1.1.5. Diagénesis

La diagénesis se define como aquellos cambios que ocurren en el sedimento una vez que éste ha sido depositado y que pueden alterar la composición química del mismo; tales cambios varían con respecto a las condiciones redox del sedimento

(Calvert y Pedersen, 1993). Las condiciones redox (Eh) de los sedimentos están controladas principalmente por la descomposición bacteriana de la materia orgánica sedimentaria y están limitadas por la tasa de suministro de la materia orgánica (producción primaria u otras fuentes), así como de la tasa a la que ésta se acumula (tasa de acumulación de materia orgánica). Durante la descomposición bacteriana se produce una secuencia de reacciones en las que se involucra a una serie sucesiva de oxidantes (o aceptores de electrones) entre los cuales, el oxígeno (O₂) es el oxidante primario. Sin embargo, cuando el O₂ disuelto se ha consumido y el potencial redox ha disminuido lo suficiente, la descomposición de la materia orgánica continúa mediante el uso de oxidantes secundarios (proceso conocido como “Díagénesis sub-óxica”) (Ruiz-Fernández y Sanchez-Cabeza, 2009). La secuencia en la cual los agentes oxidantes secundarios son utilizados para ambientes sedimentarios sub-óxicos es: nitratos > óxidos de manganeso > óxidos de hierro > sulfatos (Chester y Jickells, 2012).

Las fluctuaciones del potencial redox en los sedimentos con respecto a la profundidad y la participación de los óxidos de Fe y Mn como oxidantes secundarios pueden provocar la disolución de sus fases sólidas en la zona sub-óxica y causar la movilidad de los metales disueltos en la columna sedimentaria hacia la superficie, así como su reprecipitación como oxi-hidróxidos de Fe⁺³ y Mn⁺⁴ en la interfase óxica (Tessier et al., 1996); lo cual puede ser fácilmente confundido con un incremento en las concentraciones de estos metales como producto de la acumulación por alguna fuente alóctona, cuando en realidad es el resultado de su precipitación bajo condiciones óxicas. Por lo anterior, es importante discriminar entre los perfiles de concentración de metales producidos por diagénesis y aquellos que son resultado de la contaminación.

2. ANTECEDENTES

2.1. Ritmos de acreción sedimentaria

2.1.1. Estudios realizados en México

En México, los estudios sobre ritmos de acreción sedimentaria específicamente en zonas de marismas son escasos, y solo se cuenta con 3 trabajos. El más antiguo corresponde a Lynch y colaboradores (1989) en la Laguna de Términos, a través del método de ^{210}Pb . Se tomaron 4 núcleos sedimentarios (2 por estación) en zonas junto a la orilla y tierra adentro de Boca Chica y en el Estero del Pargo (Isla del Carmen). Este último no tiene influencia de ríos u otro aporte de sedimento además del mareal. Los resultados de ritmos de acreción media que más se asemejaron al valor de cambio de nivel del mar global son los de la zona más cercana a la orilla del Estero del Pargo (2.90 mm año^{-1}), confirmando así la importancia del sitio de muestreos en estudios de acreción que reflejen cambios de nivel del mar. Los siguientes dos estudios son recientes: Ruiz-Fernández y colaboradores (2016) calcularon tasas de acreción en núcleos sedimentarios de 3 marismas del Estero de Urias (Golfo de California) utilizando ^{210}Pb . Debido a factores como topografía o mayor aporte de partículas continentales, los resultados sobre evidencia de transgresión marina y ritmos de acreción se enfocaron solamente en una marisma (EUI). Los ritmos de acreción mostraron incrementos a inicios del siglo XX (0.73 mm año^{-1}), sin embargo, a partir de 1990 hasta 2012, la acreción aumentó a 3.87 mm año^{-1} . Se concluyó que el aumento del nivel del mar durante los últimos 27 años (1995-2012) fue 3 veces más rápida que durante los primeros 100 años del registro. Y por último, el más reciente estudio se desarrolló en la Península de Yucatán, por Carnero-Bravo y colaboradores (2016). En dicho estudio se calcularon las tasas de acreción sedimentaria en 3 núcleos de marismas de distintas zonas de la reserva de la biósfera Sian Ka'an. Los resultados mostraron aumentos en la tasa de acreción en los núcleos: PUPA de 1.4 mm año^{-1} (1997-2001) hasta 3.0 mm año^{-1} , mientras que en ISCUL de 0.72 mm año^{-1} a partir de 1985 y alcanzando un máximo de 4.5 mm año^{-1} de 2001 a 2013. Dichos resultados coincidieron con las tasas de aumento de nivel del mar regionales y globales. El tercer sitio, LANE, no parece ser afectado por el aumento de nivel del mar (tasa de

acreción constante de 0.9 mm año⁻¹ desde 1900 a 2013) probablemente debido a que es el sitio más elevado con respecto al nivel del mar.

2.1.2. Estudios realizados alrededor del mundo

En la literatura internacional existen estudios sobre cambios de nivel del mar basados en ritmos de acreción medidos con ²¹⁰Pb, realizados en ecosistemas costeros que no son precisamente marismas.

Los cambios del nivel del mar a través de fechados en núcleos sedimentarios al sur de Nueva Zelanda y en la costa Este de Canadá fueron reportados por Gehrels y colaboradores (2005; 2008). Los resultados en Nueva Zelanda mostraron una tasa de elevación del nivel del mar promedio de 2.8 mm año⁻¹ correspondiente al siglo XX, la cual coincide con los registros de marea regionales (2.1 mm año⁻¹). La zona ha presentado estabilidad tectónica desde 1850. Para la bahía Chezzetcook, Canadá, los resultados reflejaron un incremento en la tasa de cambio del nivel del mar de 3.2 mm año⁻¹ entre 1900 y 1920, la cual fue relacionada con efectos de calentamiento global reflejados como expansión térmica.

En Italia, Bellucci y colaboradores (2007) obtuvieron tasas de acreción en 5 núcleos sedimentarios de zonas de marismas de la laguna de Venecia. Los resultados mostraron una tasa de acreción promedio de 2.5 mm año⁻¹ que coincide con la tasa promedio de cambio del nivel del mar regional. Contrastantemente, los resultados de uno de los sitios que permanece constantemente inundado no pudieron ser comparados con los demás, por tanto, son zonas no aptas para estudios de acreción relacionados con cambios del nivel del mar. Para la región de Sudamérica, Sanders y colaboradores (2010) realizaron una evaluación de ritmos de acumulación sedimentaria de 3 núcleos colectados en la bahía de Cananeia, Brasil. Los resultados mostraron variaciones de tasas de sedimentación entre 2.5 y 3.9 mm año⁻¹, las cuales fueron más bajas que la tasa de aumento del nivel del mar regional (4.0 mm año⁻¹) reportada por mareógrafos durante los últimos 50 años. Los autores atribuyen esta variación a la inestabilidad tectónica que presenta esa zona. Existen otros estudios que realizan evaluaciones de cambio de nivel del mar en núcleos sedimentarios localizados en zonas aledañas a desembocaduras de ríos.

Sin embargo, este tipo de evaluaciones suelen sobrestimar los valores de acreción debidos a aporte mareal. Por ejemplo, en el estudio realizado en el estuario del río Hamble, Reino Unido (1995), Cundy y Croudace obtuvieron tasas de acumulación entre 5 y 8 mm año⁻¹, las cuales superaron la tasa de aumento del nivel del mar a escala global. Es evidente que el aporte sedimentario por vía fluvial enmascaró la tasa de acreción debida al aumento del nivel del mar. Otro caso es el estudio realizado por Callaway y colaboradores (2012) en el estuario de la bahía de San Francisco, donde se estimaron los ritmos de acreción en 6 sitios que incluían zonas de humedales. Los ritmos de acreción obtenidos variaron entre 2 y 5 mm año⁻¹, los cuales fueron superiores a la tasa de aumento del nivel del mar global, muy probablemente debido al aporte de sedimento continental.

2.2. Elementos traza en sistemas cercanos a centrales nucleoelectricas

La Central Nuclear Laguna Verde (CNLV) es la única industria de su tipo en México. Actualmente no existe información referente a elementos traza en sedimentos aledaños a esas instalaciones, de hecho, la información generada en este trabajo de tesis será la base para futuros estudios relacionados con elementos traza. En este estudio, solamente los núcleos de Laguna Salada podrán ser contrastados con trabajos similares ya que la Laguna El Llano no presenta influencia de plantas nucleares.

En el ámbito internacional los estudios sobre elementos traza en sedimento de zonas cercanas a plantas de energía nuclear son escasos. Orescanin y colaboradores (2004) evaluaron las concentraciones de elementos traza en sedimento superficial a lo largo del río Sava, que cruza Eslovenia y Croacia. El muestreo incluyó 7 muestras, una de ellas localizada río arriba con respecto a la planta nuclear Krsko, las 6 restantes fueron río abajo. Las concentraciones de los elementos presentaron los siguientes intervalos 58.0 - 122.0 mg kg⁻¹ para Cr, 20.0 - 57.0 mg kg⁻¹ para Cu, 6.4 - 12.9 mg kg⁻¹ para Pb, 82.8 - 157.0 mg kg⁻¹ para Sr y 55.0 - 249.0 mg kg⁻¹ para Zn. Las concentraciones de elementos traza en la zona aledaña a la planta nuclear resultaron mucho menores a los límites permisibles de las normas regulatorias.

Dalmacija y colaboradores (2006) estudiaron sedimentos superficiales en 14 sitios del canal Begej, Serbia y Montenegro, el cual actúa como vertedero de desechos domésticos y de plantas de energía de la región. Los resultados de elementos traza en sedimento variaron entre 0.9 - 66.0 mg kg⁻¹ para Cd, 50.0 - 800.0 mg kg⁻¹ para Cr, 42.0 - 940.0 mg kg⁻¹ para Cu, 0.2 - 1.1 mg kg⁻¹ para Hg, 30.0 - 100.0 mg kg⁻¹ para Ni, 28.0 - 680.0 mg kg⁻¹ para Pb y 100.0 - 1770.0 mg kg⁻¹ para Zn. Dichas concentraciones reflejaron contaminación severa en los casos de Cr, Cu, Cd y Zn, probablemente debido a las descargas de aguas residuales domésticas e industriales. Sin embargo, no se detectó contaminación por elementos radiactivos provenientes de la planta nuclear. En la costa de Guangdong, China, Gu y colaboradores (2012) evaluaron los elementos traza en sedimentos superficiales de distintas zonas, incluyendo sitios aledaños a dos plantas de energía nuclear: Lingao y Baya Bay. Los resultados de los elementos mostraron intervalos de 5.0 - 64.7 mg kg⁻¹ para Cu, 0.0 - 0.2 mg kg⁻¹ para Hg, 16.0 - 33.9 mg kg⁻¹ para Ni, 18.1 - 40.7 mg kg⁻¹ para Pb, 64.6 - 399.0 mg kg⁻¹ para Sr, 46.1 - 85.1 mg kg⁻¹ para Zn. La agrupación de los elementos en el análisis de factores permitió identificar dos fuentes antropogénicas en la zona: a) plantas nucleares e industrias de transporte marítimo, y b) descarga de desechos domésticos e industrial termoeléctrica.

Por otro lado, Bojakowska y Krasuska (2014) evaluaron elementos traza en sedimento superficial en el distrito lagunar Gniezno, Polonia. En la zona se encuentra la planta de energía nuclear Konin, y los sitios de muestreo incluyeron áreas donde se descarga el agua de enfriamiento de la planta nuclear. Las concentraciones promedio de elementos en sedimentos encontradas en zonas con influencia de agua de enfriamiento fueron: 385 mg kg⁻¹ para Cu, 309 mg kg⁻¹ para Ba, 20 mg kg⁻¹ para Pb, 613 mg kg⁻¹ para Sr, 129 mg kg⁻¹ para Zn y 0.15 mg kg⁻¹ para Hg. En las zonas donde no hay descargas de agua de enfriamiento las concentraciones fueron menores (excepto para Pb): 13 mg kg⁻¹ para Cu, 93 mg kg⁻¹ para Ba, 33 mg kg⁻¹ para Pb, 193 mg kg⁻¹ para Sr y 63 mg kg⁻¹ para Zn. Las altas concentraciones de los elementos antes mencionados, específicamente de Cu, en las zonas con descarga de agua de enfriamiento puede deberse a los materiales utilizados en las tuberías, que comúnmente se encuentran en estado de oxidación.

3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

3.1. Cambio del nivel del mar

En México, los registros mareográficos sobre el cambio del nivel de mar están incompletos. Para poder desarrollar estrategias de adaptación basadas en información científica contrastada es importante disponer de información confiable basada en registros ambientales. Si bien existe evidencia del cambio del nivel del mar a escala global, se necesitan series temporales suficientemente largas que permitan establecer las tendencias en zonas costeras de México. Ante la escasez de información y de disponibilidad de métodos de registro instrumental a largo plazo, se propone determinar las tasas de elevación del nivel del mar a través del estudio de registros sedimentarios utilizando el método de ^{210}Pb .

3.2. Flujo de elementos traza

México cuenta solo con una planta generadora de energía nuclear, CNLV, la cual a su vez, vierte sus aguas de enfriamiento en la Laguna Salada. Hasta el momento, no existe un estudio en el cual se evalúen las concentraciones de elementos traza en la laguna. Además, la Laguna Salada y Laguna El Llano están localizadas cerca de la región minera Chiconquiaco. Por lo tanto, se evaluaron los flujos de elementos mayores y traza en perfiles de sedimentos de marismas de ambas lagunas.

4. HIPÓTESIS

4.1. Cambio del nivel del mar

- 1.- Las tasas de acreción sedimentaria serán equivalentes al cambio en el nivel del mar, y evidenciarían un incremento durante las últimas dos décadas (a partir de 1990 se observa una aceleración en el aumento del nivel del mar a escala global).
- 2.- La tasa de elevación del nivel del mar obtenida, estará de acuerdo con los registros mareográficos durante el periodo disponible.

4.2. Flujo de metales

- 3.- Las concentraciones de elementos traza reflejará la influencia de la región minera cercana en los sedimentos de ambas lagunas.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Evaluar los impactos del cambio global durante los últimos 100 años, tomando como indicadores el cambio del nivel del mar y la contaminación por elementos traza, mediante el estudio de registros sedimentarios recolectados en las marismas de las lagunas costeras Laguna Salada y El Llano de la costa de Veracruz, México.

5.2 Específicos

5.2.1.- Realizar la caracterización e identificación de ambientes sedimentarios.

5.2.2.- Determinar las tasas de acreción (mm año^{-1}) y su relación con el cambio del nivel del mar.

5.2.3.- Completar el registro de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta la fecha.

5.2.4.- Evaluar las concentraciones y flujos de elementos traza y la influencia potencial de la planta nucleoelectrica Laguna Verde así como de la región minera Chiconquiaco.

6. ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se desarrolla en las Lagunas de El Llano y Salada, las cuales están ubicadas en la zona central del estado de Veracruz (Fig. 6.1), en el municipio de Actopan. Ambas lagunas se encuentran dentro de la región hidrológica “Papaloapan” cuya precipitación media anual es de 1460 mm (Moreno-Casasola et al., 2002; CONAGUA, 2012). En la zona predomina el clima cálido húmedo y subhúmedo, con temperaturas entre 21 y 28°C (CONABIO, 2012). Los vientos alisios predominan desde verano hasta otoño, mientras que los “nortes” son característicos del periodo invernal, los cuales son vientos intensos (rachas promedio de 37 km/h) provenientes de Canadá y Estados Unidos (Llanos y Cervantes., 1995; Oliver, 2005). Las mareas en Golfo de México son de régimen micromareal (0-2 m), y específicamente en estado de Veracruz son predominantemente diurnas con una altura de unos 60 cm y un nivel medio de 0.3 m (Álvarez y Gaitán, 1994; CONANP, 2011; SEMAR, 2012).

La geología de la zona corresponde a rocas recientes (cuaternario) de tipo eólicas (INEGI, 2016). La zona se caracteriza por tener sistemas de dunas móviles formadas por montículos de arena, en las cuales las comunidades florísticas se ordenan a lo largo de un gradiente de menor a mayor grado de estabilización, relacionado con la cobertura vegetal, donde las zonas de mayor movimiento de arena tienen una baja cobertura (Moreno y Vázquez, 2006; Moreno y Travieso, 2006). Con respecto a la tectónica, el Golfo de México se encuentra ubicado sobre la placa de Norteamérica. Si bien no existe un valor que refleje la tasa su elevación en la parte del Golfo de México, de acuerdo a Ortlieb (1991), la placa de Norteamérica se ha mantenido a una tasa constante de elevación anual de 0.17 mm año⁻¹ (estudio realizado en la región del Pacífico Nororiental Mexicano). Sin embargo, basados en el trabajo de Martínez y colaboradores (2014) donde se identificaron zonas de riesgo costero en el estado de Veracruz (basadas en los cambios de usos de suelo, expansión urbana, geodinámicas costeras y riesgo potencial de aumento de nivel del mar), las lagunas Salada y El Llano se encuentran en la zona de erosión estable, lo cual permite que los resultados de cambios del nivel del mar de este estudio sean representativos para la zona.

En el estado de Veracruz existen varias zonas mineras (Huayacocotla, Chiconquiaco, Zongolica-Atoyac, Los Tuxtlas y Cuenca Salina), de las cuales, la region Chiconquiaco es la más cercana, (ubicada al Oeste de las lagunas) y cuenta con yacimientos de oro, plata, cobre, plomo, zinc y hierro (Fig. 6.2; SE, 2010). El auge minero de la región finalizó aproximadamente después de 1950's, y actualmente solo existen periodos cortos de actividad por parte de pequeños grupos mineros (SGM, 2014). En la parte costera de la zona, se han reportado enriquecimientos de arsénico y cromo, los cuales fueron atribuidos a la litología de la zona costera de Veracruz (Célis-Hernández et al., 2013).

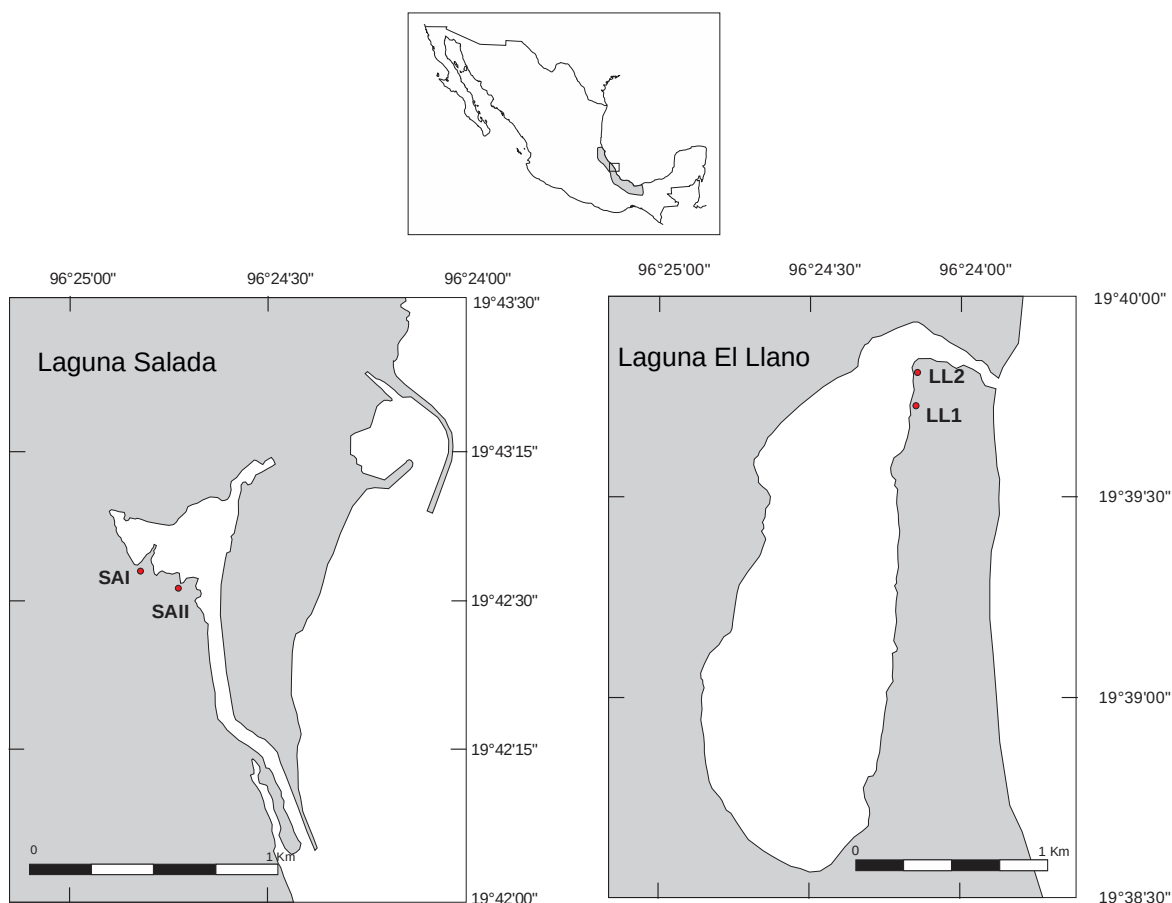


Figura 6.1. Ubicación geográfica de las lagunas Salada y El Llano, en el estado de Veracruz. Localización de los sitios de muestreo en cada laguna.

6.1. Laguna El Llano

La laguna se localiza entre los 19°36' y 19°39' latitud N y entre los 96°21' longitud O (Fig. 6.1). La laguna tiene una extensión de 2,300 Ha y profundidad variable, sin embargo, en la parte más profunda la columna de agua mide 1.7m (Mariano, 1986; Rodríguez-Castañeda, 1994). El agua que compone la laguna es marina (la salinidad oscila entre 20 y 50 ‰ durante el año) y el único aporte de agua dulce es a través de escorrentías en temporada de lluvias (Sosa y Ruiz, 1991). La boca de la laguna tiene barreras arenosas que permanecen abiertas en temporada de lluvias (Lankford, 1977). La vegetación que rodea a la laguna está compuesta principalmente por *Rhizophora mangle*, *Conocarpus erectus* y *Avicenia germinans* (Sosa y Ruiz, 1991).

6.2. Laguna Salada

La Laguna Salada es un cuerpo de agua de forma triangular que se localiza entre los 19°42' y 19°43' latitud N y entre los 96° 24' y 96° 25' longitud O (Fig. 6.1). La laguna es somera (máxima profundidad de 3 m), su extensión aproximada es de 51 Ha y, al igual que El Llano, no recibe descargas directas de agua dulce (CFE, 1987; 1989). Al norte está delimitada por un asentamiento de roca basáltica, mientras que al sur está compuesta por roca andesítica y sedimentos aluviales (CFE, 1989). Hasta mediados de los 70's, la laguna tenía conexión limitada con el mar, la cual ocasionaba una disminución de la columna de agua y por tanto, un aumento de la salinidad (entre 1978 y 1979 se registraron salinidades hasta de 70‰; Rodríguez-Castañeda, 1994). Actualmente, la laguna funciona como cuerpo receptor de agua de enfriamiento de la CNLV, la cual fue construida entre 1976 y 1995 (entró en funcionamiento en 1990); mientras que la construcción del canal de descarga empezó en 1981 (Morales-Lozano, 2011). La apertura del canal estableció una comunicación permanente entre la laguna y el mar, lo cual hizo que los valores de salinidad fueran comparables a los del agua de mar (Rodríguez-Castañeda, 1994).



Figura 6.2. Mapa geológico de la zona norte de Veracruz. Localización de la región minera Chiconquiaco. Modificado del Servicio Geológico Mexicano (2014).

7. MATERIAL Y MÉTODOS

7.1. Muestreo y preparación de muestras

Se recolectaron dos núcleos sedimentarios en las zonas de marismas de cada una de las lagunas Salada y El Llano durante el mes de febrero de 2013 (Fig. 7.1). La salinidad que presentaron ambas lagunas durante el muestreo fue 37‰ para Laguna Salada y 48‰ para El Llano. No se observaron descargas directas de agua dulce en ningún sistema. Para el muestreo se utilizaron tubos de PVC de 50 cm de longitud y 12 cm de diámetro, los sedimentos se cortaron en secciones contiguas de 1 cm de espesor.

La elevación de los sitios de muestreo aproximada fue 60 cm sobre el nivel del mar (datos basados en registros de marea). Las coordenadas de cada punto de muestreo y la longitud (cm) de los cuatro núcleos sedimentarios se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Coordenadas de muestreo y longitud de los núcleos sedimentarios.

Núcleo	Latitud Norte	Longitud Oeste	Longitud (cm)
SAI	19° 42' 47.2"	96° 24' 47.8"	48
SAII	19° 42' 45.1"	96° 24' 42.0"	49
LL1	19° 39' 48.9"	96° 24' 09.5"	50
LL2	19° 39' 57.2"	96° 24' 10.2"	48

En Laguna Salada, ambos núcleos se colectaron a 743 m de distancia con respecto a CNLV. El núcleo SAI se encuentra ubicado junto al canal de la laguna, el cual la conecta de manera permanente con el mar, este núcleo presentó una capa superficial de materia orgánica de 7 mm de espesor. El núcleo SAI está localizado más lejos del canal, a 180 m aproximadamente del núcleo SAI. En la laguna El Llano, el núcleo LL2 es el que se ubicó cerca de la orilla de la laguna, mientras que LL1 se colectó más tierra adentro de la marisma (Fig. 7.1). La distancia entre LL1 y LL2 son aproximadamente 370 m.

El número total de muestras fueron 195, las cuales se pesaron (para determinar el peso húmedo) y se congelaron. Una vez congeladas, las muestras se secaron por liofilización durante 72 horas en un equipo Labconco Freezone cat (No. 77530-00) a un vacío de $36-76 \times 10^{-3}$ Mb y temperatura de -40°C . Finalmente, el sedimento seco se pesó y se calcularon los porcentajes de humedad (Anexo 12.1).

7.1.1. Cálculo de humedad

El contenido de humedad en los sedimentos se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad (\%)} = [(W - D)/W] * 100$$

donde W es el peso húmedo del sedimento (g) y D es el peso seco del sedimento (g).

7.1.2. Cálculo de porosidad

La porosidad del sedimento es definida como la relación del volumen de poros vacíos existentes en el sedimento con respecto al volumen total del sedimento (Berner, 1971).

La porosidad se calcula utilizando la siguiente ecuación (Sorgente et al., 1999):

$$\Phi = (\rho_{\text{sed}} (W-D) / (\rho_{\text{sed}} (W-D)+D)*100)$$

donde Φ es la porosidad (%), ρ_{sed} es la densidad aparente del sedimento (2.5 g cm^{-3}), W es el peso húmedo y D es el peso seco del sedimento (Anexo 12.2).

7.1.3. Cálculo de profundidad de masa acumulada

Para realizar estudios de fechado en sedimentos, primero es necesario considerar el problema de la compactación, el cual es el decremento progresivo del contenido de agua de una capa de sedimento dada durante su enterramiento (disminución de la porosidad), como resultado del incremento en el peso del sedimento que se acumula por encima de esa capa (Robbins et al., 1978). Debido a los efectos de la compactación, cuando se compara el contenido de constituyentes del sedimento entre las capas de un núcleo, las profundidades (en cm) son poco útiles, ya que las más profundas (y más compactas) tendrán más sedimento acumulado (en peso) que las más superficiales (más porosas), aunque tengan el mismo espesor.

La conversión de los valores de la profundidad (en cm) a valores de masa acumulada (g cm^{-2}), se realiza mediante la siguiente secuencia de ecuaciones:

$$d = ((100-\Phi) * \rho_{\text{sed}})/100$$

donde d es la densidad seca aparente (g cm^{-3}), Φ es la porosidad y ρ_{sed} 2.5 g cm^{-3} (densidad aparente del sedimento),

$$E = d * \varepsilon$$

donde E es el peso por área del sedimento (g cm^{-2}); d es la densidad seca (g cm^{-3}) y ε espesor de la capa de sedimento (cm).

La masa acumulada (g cm^{-2}) se calcula con la sumatoria de la profundidad de masa de los estratos del núcleo sedimentario:

$$F = E_1 + E_2 + \dots + E_n.$$

Por último, el punto medio de masa acumulada ($G = \text{g cm}^{-2}$) que es el que se utilizó para graficar los valores de concentración de todas las variables, se calcula como sigue (Sorgente et al., 1999):

a) Para la primera sección del sedimento:

$$G_1 = E_1/2$$

b) Para la segunda sección del sedimento:

$$G_2 = (E_1 + E_2)/2$$

c) Para las secciones sucesivas del sedimento:

$$G_n = (G_{n-1} + E_n)/2$$

Los resultados de masa acumulada se muestran en el Anexo 12.3.

7.2. Caracterización e identificación de ambientes sedimentarios

Para caracterizar los ambientes sedimentarios se tomaron en cuentas las determinaciones de tamaño de grano, susceptibilidad magnética, carbono orgánico e inorgánico, nitrógeno, $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$. Para la identificación de los ambientes sedimentarios se integrarán los datos de isótopos (con sus intervalos específicos para ambientes marinos y terrestres) así como cálculos de la proporción molar C:N, la cual proporciona información sobre la procedencia de la materia orgánica.

7.2.1. Tamaño de grano

El tamaño de las partículas del sedimento es uno de los principales factores que controlan la distribución de metales. En general, las partículas de tamaño fino del sedimento, tales como las arcillas, son acarreadoras de materia orgánica y óxidos de Fe y Mn, y por lo concentran contaminantes como los metales pesados (Ip et al., 2007). El análisis se realizó mediante el método de difracción de rayos láser con un equipo Malvern Masterizer Hydro 2000MU.

7.2.2. Susceptibilidad magnética

La Susceptibilidad Magnética (SM) del sedimento es una medida que depende de la cantidad y tipo de mineral magnético presente en una muestra de sedimento y es útil para evaluar cambios ambientales y la procedencia de sedimentos en sistemas acuáticos (Liu et al., 2010). El análisis se realizó en sedimento seco y molido, utilizando un medidor de susceptibilidad magnética Bartington MS2 acoplado a un sensor de frecuencia simple MSG2.

7.2.3. Carbono Orgánico (C_{org}), Carbono Inorgánico ($CaCO_3$) y Nitrógeno (N)

Las concentraciones de C_{org} , $CaCO_3$, N se midieron utilizando un analizador elemental (TruSpec CN, LECO). Para determinar el C_{org} se añadió HCl 1M al sedimento seco para eliminar el contenido de carbonatos, la muestra se agitó y se dejó secar a 60 °C. Las concentraciones de $CaCO_3$ se obtuvieron por diferencia entre los valores de carbono total y carbono orgánico: $C_{inorg} = C_T - C_{org}$. Derivado de estos análisis se calculará la proporción molar C:N para identificar cambios en los tipos de ambientes sedimentarios (marinos y terrestres).

7.2.4. Composición Isotópica ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$)

La determinación de isótopos estables de carbono y nitrógeno ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$), es una herramienta utilizada para caracterizar e identificar el origen de la fracción orgánica asociada a los sedimentos en los ecosistemas acuáticos (Sweeney y Kaplan, 1980; Kuramoto y Minagawa, 2001). La composición isotópica se midió con un analizador elemental Costech EA, acoplado a un espectrómetro de masas Thermo Finnigan Delta^{Plus} X.

7.2.5. Fósforo Total (P_{Tot})

En este estudio, el fósforo será relacionado con el origen de la materia orgánica presente en la columna de agua, asimismo, es útil para detectar posibles aportes antropogénicos en los ecosistemas (Brasier, 1995; Gao et al., 2005). El análisis se realizó mediante el método del ácido ascórbico (Rosales-Hoz, 1980). El sedimento seco se calcinó en una mufla a 550 °C durante 1 h. Se resuspendió la muestra en HCl 1N y se aforó a 25 ml en un tubo de centrifuga. Posteriormente, se dejó en baño sónico (alrededor de 10 minutos) y se centrifugó a 3000 rpm durante 10 minutos. Se tomó una alícuota de 0.1 ml y se agregaron 10 ml de agua miliQ, 0.25 ml de reactivo mix y 0.25 ml de solución de ácido ascórbico. El reactivo mix contiene molibdato de amonio, H_2SO_4 y tartrato de antimonio potásico ($C_8H_4K_2O_{12}Sb_2$). La solución de ácido ascórbico contiene ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) y H_2SO_4 . Se midió su absorbancia a 880 nm. La curva de calibración se preparó con KH_2PO_4 como estándar.

7.2.6. Sílica Biogénica (bSi)

El sílice biogénico (u ópalo biogénico) es un compuesto inorgánico que forma parte del esqueleto silíceo de algunos microorganismos (como las diatomeas), y su presencia en los sedimentos puede ser usado como un marcador de paleoproductividad (Ohlendorf y Sturm, 2008). La determinación del contenido de sílica biogénica se realizó mediante método empleado por Mortlock y Froelich en 1989. Se pesaron aproximadamente 100 mg de sedimento seco y molido en tubos de centrífuga de 50 ml, se les agregaron 5 ml de una solución de H_2O_2 al 10% y se dejaron reposar durante 30 minutos. Posteriormente se agregaron 5 ml de HCl 1N a cada tubo y se sonificaron durante 30 minutos. Después se agregan 20 ml de agua desionizada y las muestras se centrifugan 5 min a 3500 rpm. El sobrenadante se desechó y los tubos se colocaron en una estufa a 60 °C para ser secados durante 12 hrs. Una vez secos, se agregan 30 ml de Na_2CO_3 2M a cada tubo con muestra y se mezcla mediante un agitador Vortex. Posteriormente, las muestras son sonificadas y colocadas en un baño maría a 85 °C durante 2 h. Después de las 2 h y a las 4 h se agita bien cada tubo, a la 5 h de baño maría a muestra es centrifugada durante 5 minutos a 3500 rpm. Una vez centrifugados, se retiran 20 ml de sobrenadante de los tubos de centrífuga y se transfieren a frascos de polietileno con tapa para su almacenamiento. Para la determinación del sílice biogénico se tomaron 125 μl de muestra (de los 20 ml que se almacenaron), se le agregaron 17.5 ml de solución de molibdato y las soluciones se dejan reaccionar durante 20 minutos. Posteriormente se agregan 7.5 ml de solución reductora en cada muestra, se mezclaron y se leyeron en un espectrofotómetro a 812 nm.

Para la lectura se preparó una curva de calibración a distintas concentraciones de sílice biogénico. El reactivo que se utilizó para hacer la solución estándar fue Sílico Fluoruro de Sodio (Na_2SiF_6), a la cual también se le agregó la solución alcalina de Na_2CO_3 2M.

7.3. Determinación de los ritmos de acreción sedimentaria

En virtud de que la zona de estudio tiene zonas de marismas, sin influencia directa de ríos, una tectónica estable a través del tiempo y los núcleos sedimentarios

sin perturbar, se realizó el fechado de los núcleos con ^{210}Pb para calcular las tasas de acreción sedimentaria.

7.3.1. Fechado con el método de ^{210}Pb

La metodología de fechado con ^{210}Pb se basa en el principio de que el flujo de este radioisótopo sobre la superficie del sedimento es constante donde, una vez enterrado, su concentración disminuye siguiendo la ley de la desintegración radiactiva (Ivanovich et al., 1992). Esta metodología permite fechar sedimentos de hasta unos 100-150 años y es el método preferido para evaluar los cambios ambientales ocurridos a consecuencia del desarrollo y crecimiento promovidos por la Revolución Industrial. La actividad del ^{210}Pb se determinó por espectrometría alfa a través de su nieto ^{210}Po , utilizando ^{209}Po como trazador (Flynn, 1968). Una vez obtenido el fechado, es posible calcular los ritmos de acreción en los núcleos sedimentarios.

La actividad del ^{210}Pb , se determinó por espectrometría alfa, a través de las mediciones de su nieto ^{210}Po (Robbins, 1978) asumiendo equilibrio secular entre ambos isótopos. Se pesaron aproximadamente 0.5 g de sedimento por muestra en recipientes de teflón; se añadió una cantidad conocida de ^{209}Po como trazador a cada recipiente y posteriormente se dejó digerir en una mezcla de ácidos 5:4:1 de HNO_3 - HCl - HF concentrados, en una plancha de calentamiento a 120°C durante 14 h. El digerido se dejó evaporar hasta sequedad a temperatura controlada de 70°C , el residuo se re-disolvió en HCl concentrado y se evaporó nuevamente a sequedad, esta operación se realizó 3 veces con el fin de que el digerido esté libre de HNO_3 y HF . El residuo se disolvió en 50 ml de HCl 0.5 N y se centrifugó 10 minutos a 3000 rpm. El sobrenadante se depositó en un vaso de precipitados, se añadieron 0.2 g de ácido ascórbico a la solución, para reducir el hierro presente (de Fe^{+3} a Fe^{+2}) que puede interferir con el depósito de los isótopos de Po. El aislamiento de los isótopos de Po se realizó por depósito espontáneo en discos de Ag de 2 cm de diámetro. La actividad del ^{210}Pb se midió en un detector de partículas alfa (detector de barrera con superficie de silicón EG&G Ortec TM modelo 5764) hasta obtener al menos 2000 conteos en el espectro más débil entre los isótopos analizados (^{210}Po y ^{209}Po ;

error <3%). La corroboración del fechado se llevó a cabo a través de la medición de ^{137}Cs mediante espectrometría gamma.

7.3.2. ^{210}Pb soportado ($^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$)

El valor de concentración de $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ en los sedimentos puede obtenerse a través de las siguientes maneras: 1) calculando el promedio de las concentraciones de la parte asintótica del perfil (valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ que se mantienen constantes con respecto a la profundidad), o 2) midiendo los valores del ^{214}Pb y ^{214}Bi (asumiendo equilibrio secular entre el ^{210}Pb y los dos progenitores) mediante espectrometría gamma (Appleby, 2001). Para los núcleos de laguna Salada, los valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ se determinaron a través de ^{214}Pb , mientras que para la laguna El Llano se tomó el valor de ^{210}Pb total obtenido por espectrometría alfa.

7.3.3. ^{210}Pb en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$)

Las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ se calcularon restando los valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ a los valores de ^{210}Pb total (Shukla, 1943; Sorgente et al., 1999).

7.3.4. Modelos de fechado con ^{210}Pb

Existen diversos modelos para fechar perfiles de ^{210}Pb en núcleos de sedimento no perturbados, entre los más comunes se encuentran: CFCS (Constant Flux-Constant Sedimentation) y CF (Constant Flux). Estos modelos están basados en diferentes hipótesis acerca de las tasas de suministro de ^{210}Pb y partículas en el sedimento (Sanchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012).

En el modelo CFCS, ambas tasas (de suministro de ^{210}Pb y de sedimentación) se consideran constantes, en este caso, la actividad de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ decrecerá en el perfil de acuerdo a su decaimiento radiactivo natural (Appleby y Oldfield, 1978).

El modelo CF considera una tasa constante de suministro de ^{210}Pb y una tasa de sedimentación variable (Sorgente et al., 1999).

La selección del modelo de fechado con ^{210}Pb se basa en la inspección del perfil de ^{210}Pb obtenido, con la finalidad de definir si se debe considerar una tasa de

sedimentación constante o variable. Si la tasa de sedimentación no ha variado con el tiempo, se deberá obtener una correlación altamente significativa ($P < 0.05$) entre el $\ln^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ y la masa acumulada (g cm^{-2}); de lo contrario, una dispersión considerable entre los puntos y un coeficiente de correlación de $r < 0.90$, pudiera ser el resultado de variaciones en las características del sedimento (i.e. tamaño de grano, materia orgánica) o de una tasa de acumulación variable (Appleby, 2001).

7.3.5. Flujo atmosférico de ^{210}Pb

El cálculo del flujo atmosférico de ^{210}Pb es una manera de evaluar si existen procesos de dilución por mezcla del sedimento o por exceso de lluvias, lo cual es una situación común en zonas tropicales (Díaz-Asencio et al., 2011). Además, el cálculo del ^{210}Pb atmosférico permite corroborar si el inventario de ^{210}Pb está completo, de ser así, los valores del flujo de ^{210}Pb serán comparables con los valores de flujo establecidos por Preiss y colaboradores (1996) para diversas latitudes.

El flujo atmosférico de ^{210}Pb en el área de estudio se calculó multiplicando el inventario total de ^{210}Pb (g cm^{-2}) por la constante de decaimiento de ^{210}Pb ($\lambda = 0.03114 \text{ año}^{-1}$; Preiss et al., 1996).

7.4. Registro completo de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta 2013 y su comparación con los registros de marea disponibles

Para lograr este objetivo fue necesario elegir el método de fechado correcto. Esto dependió de los perfiles obtenidos de ^{210}Pb (Sección 8.2). Una vez realizado el fechado, se obtuvieron las tasas de acreción sedimentarias (equivalentes a la tasa de cambio del nivel del mar) para los últimos 100 años. Se tomaron los datos disponibles sobre cambio de nivel del mar con registros de mareas para la zona y se contrastó la información.

7.5. Evaluación de las concentraciones de elementos traza y la influencia de la planta nucleoelectrónica Laguna Verde

Se analizaron los siguientes elementos: Ag, Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Th, U, V, Zn con la finalidad de evaluar los tipos de aportes de elementos traza en ambas lagunas.

Los sedimentos secados y pulverizados con mortero de ágata, fueron digeridos totalmente con HNO₃, HCl y HClO₄. La determinación de elementos mayoritarios y traza se realizó por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) utilizando un nebulizador microconcéntrico con una cámara estándar de spray condensador de doble paso para la introducción de muestras (Voica et al., 2012). La determinación de Hg se realizó mediante la técnica de vapor frío. El análisis de las muestras fue realizado en los laboratorios Actlabs (Ontario, Canadá) y los resultados se validaron con estándares de referencia certificados (PACS-2, MESS-3, AGV-2).

7.5.1. Determinación de factores de enriquecimiento normalizados

En este estudio, se eligió el Aluminio como elemento normalizador debido a que además de ser de los más abundantes en la corteza terrestre, su contenido no está enriquecido en este sistema y su desviación estándar es mínima (<0.8%). El cálculo del FEN se realizó de acuerdo a la siguiente fórmula (Glasby y Szefer, 1998):

$$FE = \frac{[E]_{muestra} / [Al]_{muestra}}{[E]_{corteza} / [Al]_{corteza}}$$

donde E es la concentración del elemento y Al la concentración del Aluminio.

Los FENs se calcularon en base a los valores de la corteza superior (Wedepohl, 1995) y con respecto a los valores de fondo de cada perfil (obtenidos mediante el promedio de los últimos 3 valores de cada perfil), y sustituyéndolo por el valor de la corteza, como se muestra en la fórmula:

$$FE = \frac{[Me]_{muestra} / [Al]_{muestra}}{[Me]_{fondo} / [Al]_{fondo}}$$

7.5.2. Determinación de flujos de elementos

Los flujos de elementos se calcularon con la finalidad de evaluar la acumulación de los elementos por unidad de área a través del tiempo. El cálculo de los flujos se realiza de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo de Elementos} = E * \text{TAM}$$

donde E es la concentración del elemento ($\mu\text{g g}^{-1}$) y TAM es la tasa de acumulación másica ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$). Las unidades de los flujos son $\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$.

Debido a que para el cálculo de los flujos son necesarias las TAM (derivadas del fechado), los resultados obtenidos solo comprenden desde el inicio del fechado (aproximadamente a partir de 1900) hasta 2013. El cálculo de los flujos de elementos se realizará solamente con los elementos que hayan resultado enriquecidos en los sedimentos.

7.6. Control de calidad

La exactitud de los análisis se evaluó mediante el uso de materiales de referencia certificados: Bartington G-039 para susceptibilidad magnética, urea para $\delta^{13}\text{C}$, sulfato de amonio para $\delta^{15}\text{N}$, IAEA-300 para ^{210}Pb .

La precisión de los análisis se reportó como el coeficiente de variación. Primero se realizaron análisis de al menos 6 réplicas de la misma muestra por cada análisis, posteriormente se calculó el promedio $\bar{X}$, la desviación estándar σ y, finalmente el coeficiente de variación CV de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{CV} = \left(\frac{\sigma}{\bar{X}} \right) * 100$$

Los coeficientes de variación para los análisis realizados fueron los siguientes: <0.1% para susceptibilidad magnética, <7.0% para tamaño de grano, <20.0% para CaCO_3 , <1.5% para C_{org} , 1.7% para N, 0.2% para $\delta^{15}\text{N}$, 0.3% para $\delta^{13}\text{C}$, <17.0% para sílice biogénico, <3.0% para P y <5.0% para ^{210}Pb .

La exactitud del análisis de elementos mayores y traza se evaluó mediante el uso de materiales de referencia PACS2, MESS3 y AGV2 (sedimento marino). El porcentaje de recuperación se calculó comparando la concentración obtenida en

cada metal con la concentración del elemento mostrado en el certificado oficial del estándar (Tabla 7.6).

Tabla 7.6. Porcentajes de recuperación obtenidos para los elementos medidos en los materiales de referencia PACS-2, MESS-3 y AGV-2.

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Li	As	Be	Co	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	U	V	Zn
PACS2 n=3	89	95	93	91	91	86	93	97	150	98	112	89	104	87	87	82	92	102
MESS3 n=2	106	100	96	90	122	87	119	99	126	96	114	65	103	104	96	84	85	101
AGV2 n=3	94	94	93	68	104	91	93	86	132	94	78	65	103	104	96	84	85	101

n= número de réplicas

En los 4 núcleos, los perfiles de Hg presentaron concentraciones por debajo del límite de detección del equipo ($<10 \text{ ng kg}^{-1}$), las cuales fueron reportadas como 10 ng kg^{-1} para fines gráficos.

7.7 Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos comprendieron coeficientes de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (ver sección 9.0).

El análisis de correlación de Pearson es un método que permite ver el grado de asociación entre las variables analizadas y determina cuales valores, resultantes de la correlación, son proporcionales entre sí (Spiegel, 1991). Este análisis se realizó utilizando el programa estadístico Statistica versión 10 para Windows. Una vez obtenidos los coeficientes de correlación r para todas las variables, es necesario saber si estos son significativos o no, lo cual depende del número de muestras (n) y del nivel de confianza, usualmente 95% ($\alpha=0.05$). El cuadrado del coeficiente de correlación es conocido como coeficiente de determinación r^2 , el cual indica la proporción (o porcentaje) de la variación total de Y (variable dependiente) con respecto a X (variable independiente; Kaplan y Saccuzzo, 2006).

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción del número de variables. Esta técnica estadística, transforma un número de variables correlacionadas linealmente en un

set de variables independientes entre sí, llamadas “factores” o componentes principales (Gurrea, 2000). Para hacer que los resultados sean interpretados más fácilmente, se aplica este análisis con la opción “VARIMAX normalized”, la cual tiene como objetivo maximizar la varianza de cada factor (Yongming et al., 2006).

El primer factor resultante será el que contenga el mayor porcentaje de varianza de todo el set de factores. El análisis de componentes principales también se realizó utilizando el programa estadístico Statistica versión 10.

8. RESULTADOS

8.1. Caracterización de los núcleos sedimentarios

Los resultados de los análisis que permitieron caracterizar los cuatro núcleos sedimentarios se presentan en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Resultados de los análisis geoquímicos realizados en los núcleos sedimentarios correspondientes a Laguna Salada y Laguna El Llano.

Variable (unidades)	Laguna Salada		El Llano	
	SAI	SAII	LL1	LL2
SM (SI)	74.2-461.7	47.6-244.1	705.0-1154.8	581.3-1208.0
<i>Tamaño de grano</i>				
Arenas (%)	14.8-74.7	13.4-89.8	20.9-90.1	74.3-88.3
Limos (%)	21.4-71.7	8.9-70.4	8.1-65.5	9.5-21.1
Arcillas (%)	3.9-16.4	1.8-19.4	0.8-13.6	1.3-5.4
C _{org} (%)	0.2-1.9	0-6-3.6	0.1-3.0	0.8-12.9
N (%)	0.02-0.1	0.03-0.29	0.0-0.09	0.01-0.2
δ ¹³ C (‰)	-17.2-(-21.7)	-22.9-(-15.2)	-26.9-(-22.4)	-25.5-(-22.7)
δ ¹⁵ N (‰)	-4.6 a 2.7	-0.6 a 3.5	-6.1 a -2.0	-3.8 a 3.3
CaCO ₃ (%)	5.3-10.1	1.5-28.9	9.0-13.4	6.4-11.3
C:N	13.9-43.7	18.9-30.3	26.6-102.7	20.7-83.7
Fósforo total (mg g ⁻¹)	1.4-2.6	1.3-3.1	1.1-2.5	1.6-3.1
Sílice Biogénico (%)	0.5-1.2	0.3-1.5	0.3-0.7	0.0-0.5

8.1.1. Perfiles de Tamaño de grano y Susceptibilidad Magnética (SM) con respecto a la profundidad

En Laguna Salada, el sedimento del núcleo SAI (Fig. 8.1.1a) presentó una predominancia de la fracción limosa a lo largo del perfil (21.4–71.7%). Los valores de SM presentaron un incremento a partir de los 30 cm de profundidad y hasta la superficie del núcleo.

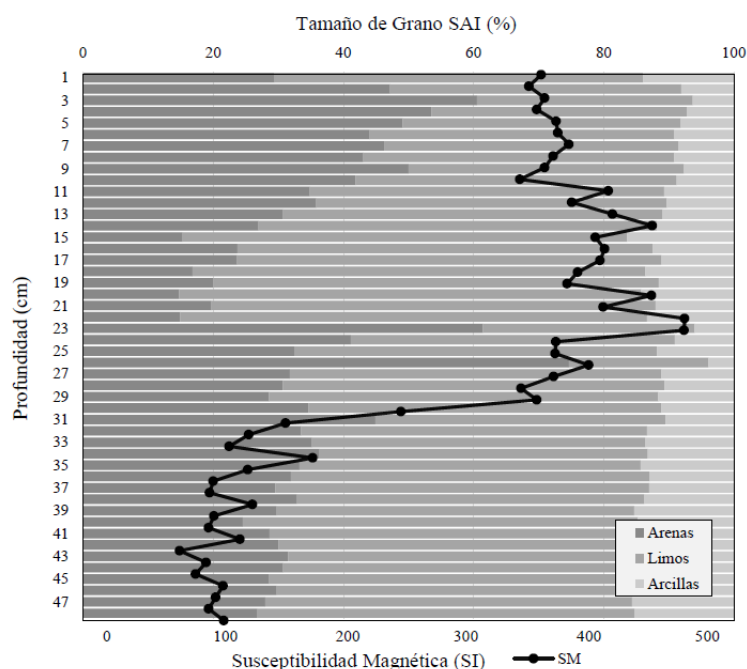


Figura 8.1.1a. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo SAI de laguna Salada.

Para SAI (Fig. 8.1.1b) el perfil de distribución de tamaño de grano mostró tres secciones, la superficial y la más profunda que estuvieron caracterizadas por arenas (13.4–89.9%), y la sección intermedia donde predominaron los limos (8.9–70.4%). Al igual que el núcleo SAI, en SAI se observó un incremento en los valores de SMpero en una sección más superficial (a partir de los 15 cm de profundidad y hasta la superficie).

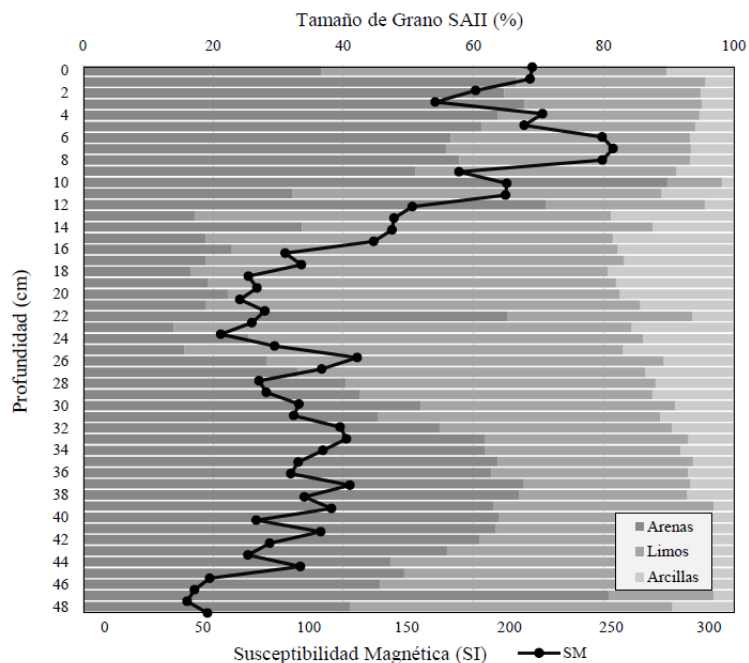


Figura 8.1.1b. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo SAII de laguna Salada.

En la laguna El Llano (Fig. 8.1.1c y d), tanto el núcleo LL1 como LL2 estuvieron caracterizados principalmente por arenas (LL1 20.9–90.1%; LL2: 74.3–88.3%). Asimismo, los valores de SM de ambos núcleos mostraron valores relativamente homogéneos (Fig. 8.1.1c y d). Sin embargo, en esta laguna, las concentraciones de SM sobrepasan por más del doble a los valores obtenidos para los núcleos de Laguna Salada.

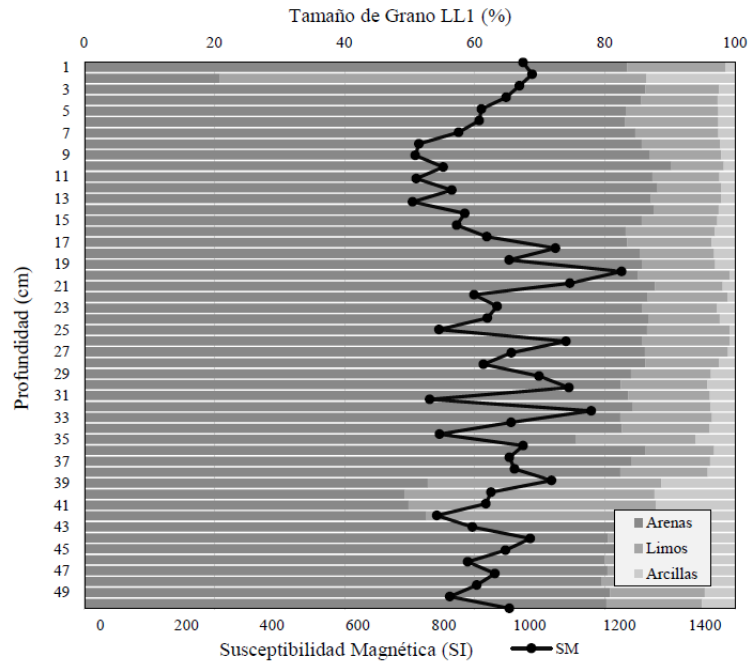


Figura 8.1.1c. Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo LL1 de laguna El Llano.

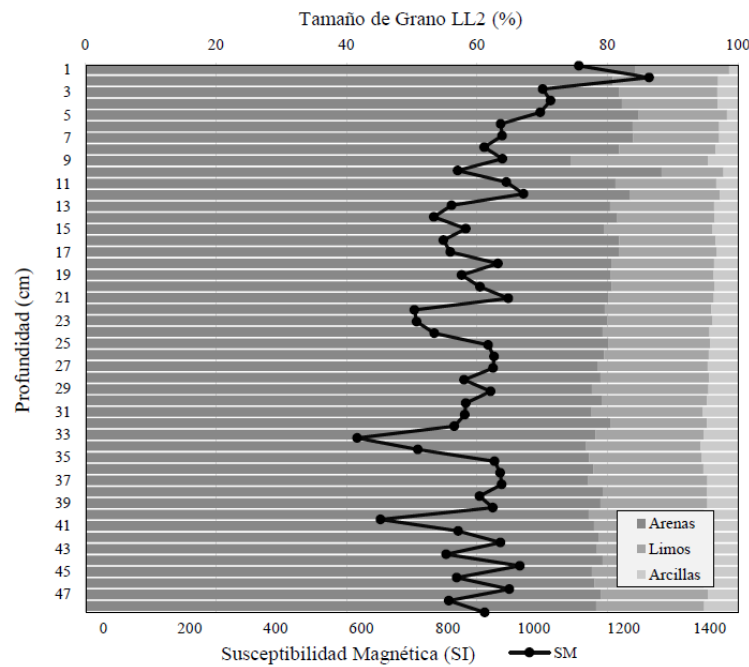


Figura 8.1.1d Distribuciones de tamaño de grano (%) y susceptibilidad magnética (SI) con respecto a la profundidad (cm) en el núcleo LL2 de laguna El Llano.

8.1.3. Perfiles de Carbono orgánico (C_{org}), Nitrógeno (N), $CaCO_3$, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ y C:N con respecto a la profundidad

En el núcleo SAI (Fig.8.1.2a), los perfiles de C_{org} y N del núcleo SAI tuvieron tendencias similares a disminuir sus valores hacia la parte superficial. El perfil de $CaCO_3$ tuvo una tendencia relativamente constante a lo largo del perfil (solo un máximo de 10.1 % a 3.5 cm de profundidad). Los valores de $\delta^{15}N$ tendieron a disminuir hacia la superficie, mientras que los de $\delta^{13}C$ fueron prácticamente homogéneos a lo largo del perfil (solo se presentaron 2 mínimos: -21.62 ‰ a los 5.5 cm y -21.72‰ a 39.5 cm de profundidad).

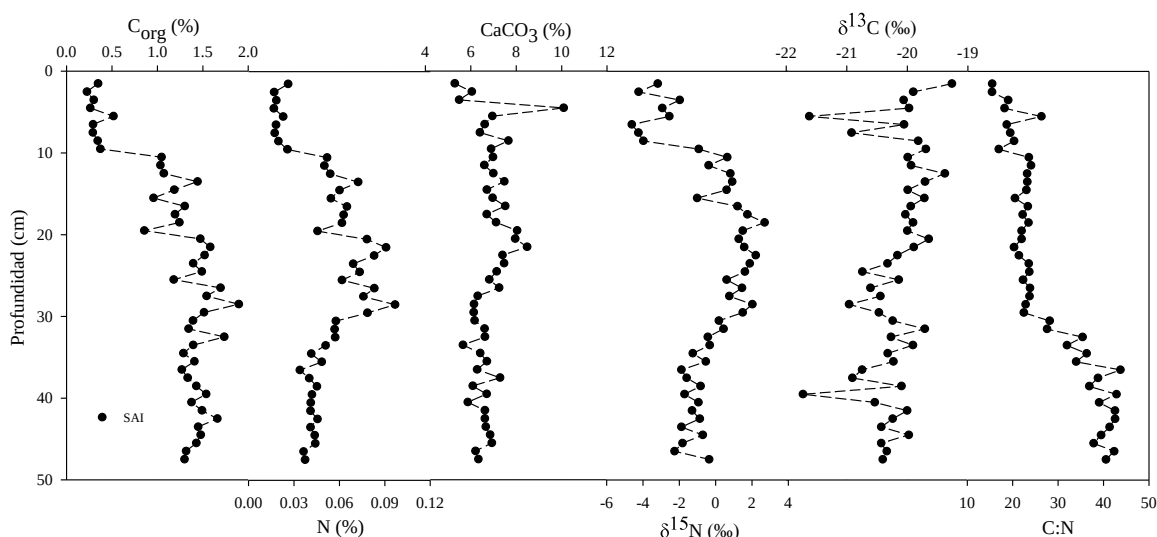


Figura 8.1.2a. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, $CaCO_3$ (%); $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo SAI de laguna Salada.

Para SAI (Fig.8.1.2b), los perfiles de C_{org} y N presentaron una sección donde los valores se incrementan (entre 15 y 25 cm) y que coinciden con la sección donde predominaron los limos. Los porcentajes de $CaCO_3$ tuvieron una tendencia a disminuir sus valores hacia la superficie del núcleo. Los valores de $\delta^{15}N$ tendieron a aumentar en las secciones más profundas del núcleo y posteriormente disminuyeron hacia la superficie, mientras que los de $\delta^{13}C$ fueron casi constantes a lo largo del perfil.

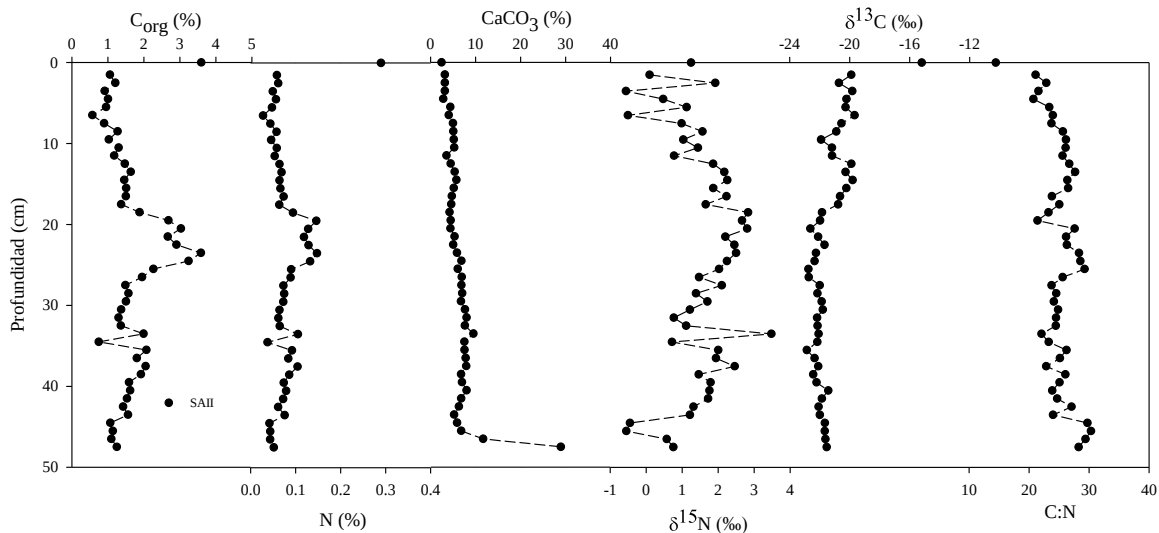


Figura 8.1.2b. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, $CaCO_3$ (%); $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo SAlI de laguna Salada.

En El Llano, el núcleo LL1 (Fig.8.1.2c), los porcentajes de C_{org} , N, $CaCO_3$ y la proporción isotópica de $\delta^{13}C$ fueron casi constantes a lo largo del perfil (se presentó un mínimo superficial de -26.9 a 2.5 cm de profundidad). Los valores de $\delta^{15}N$ tendieron a aumentar a partir de los 20 cm hacia la superficie.

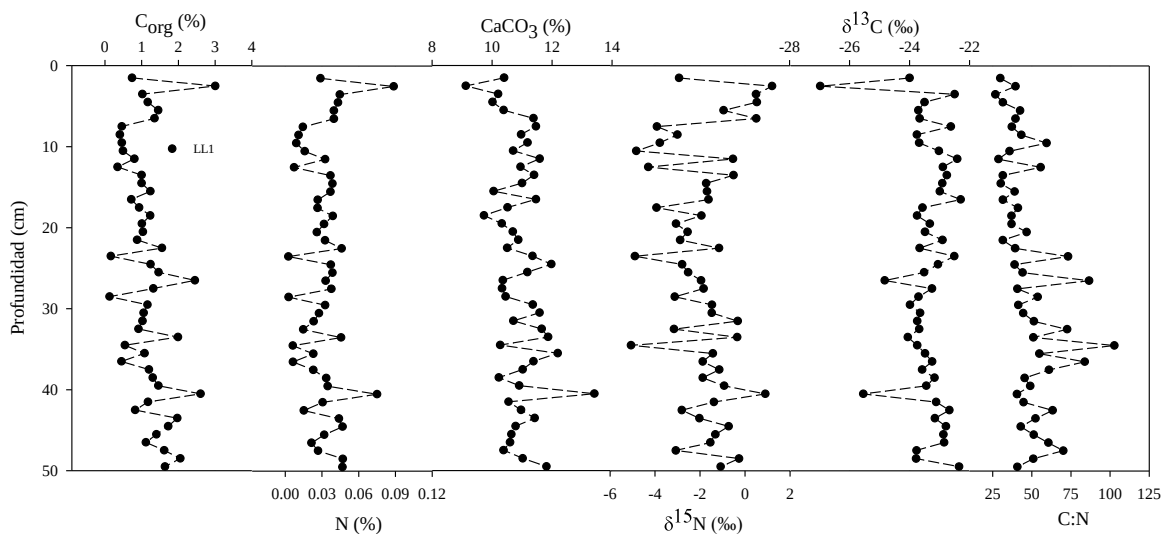


Figura 8.1.2c. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, $CaCO_3$ (%); $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo LL1 de laguna El Llano.

En LL2 (Fig.8.1.2d), los perfiles de porcentaje C_{org} , N, $CaCO_3$ y $\delta^{13}C$ permanecieron casi homogéneos a lo largo del perfil, excepto los máximos subsuperficiales en C_{org} y N a los 7.5 cm de profundidad; y el mínimo de $\delta^{13}C$ de -25.6 a 45.5 cm de profundidad. Los valores de $\delta^{15}N$ tendieron a aumentar hacia la superficie.

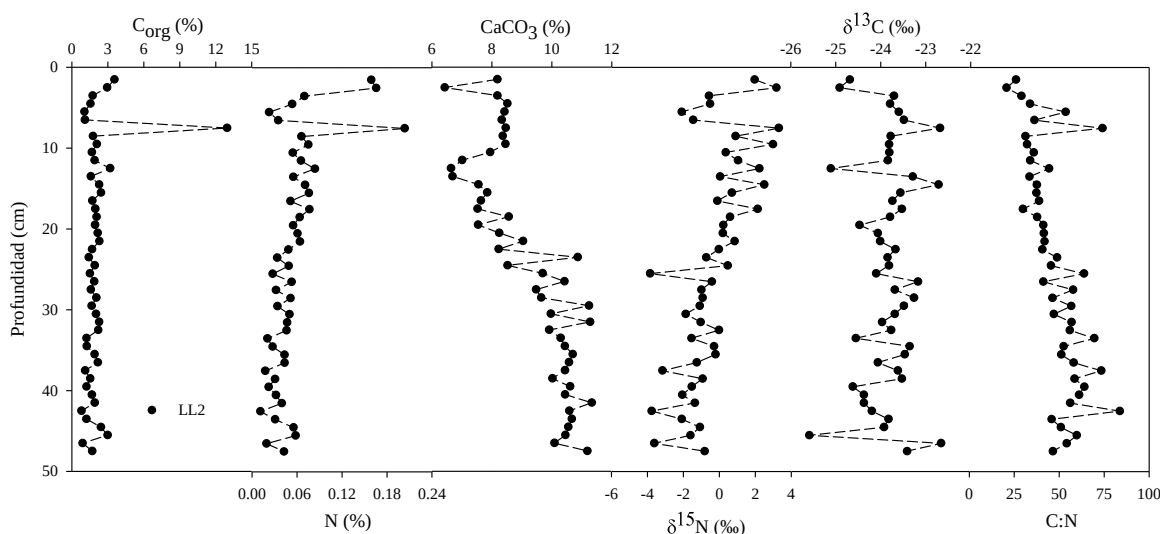


Figura 8.1.2d. Perfiles de concentración respecto a la profundidad de C_{org} , N, $CaCO_3$ (%); $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ (‰) y valores de la proporción molar C:N para el núcleo LL2 de laguna El Llano.

8.1.4. Fósforo Total (P_{tot}) y Sílice Biogénico (bSi)

Los perfiles de P_{tot} con respecto a la profundidad de los cuatro núcleos se presentan en la Fig. 8.1.4a. En laguna Salada, el núcleo SAI presenta dos máximos de 2.3 mg g^{-1} a 11.5 y 25.5 cm de profundidad, mientras que SAII presentó valores ascendientes desde las capas profundas hacia la superficie del núcleo.

Para El Llano, los valores de P_{tot} mostraron perfiles relativamente homogéneos con respecto a la profundidad.

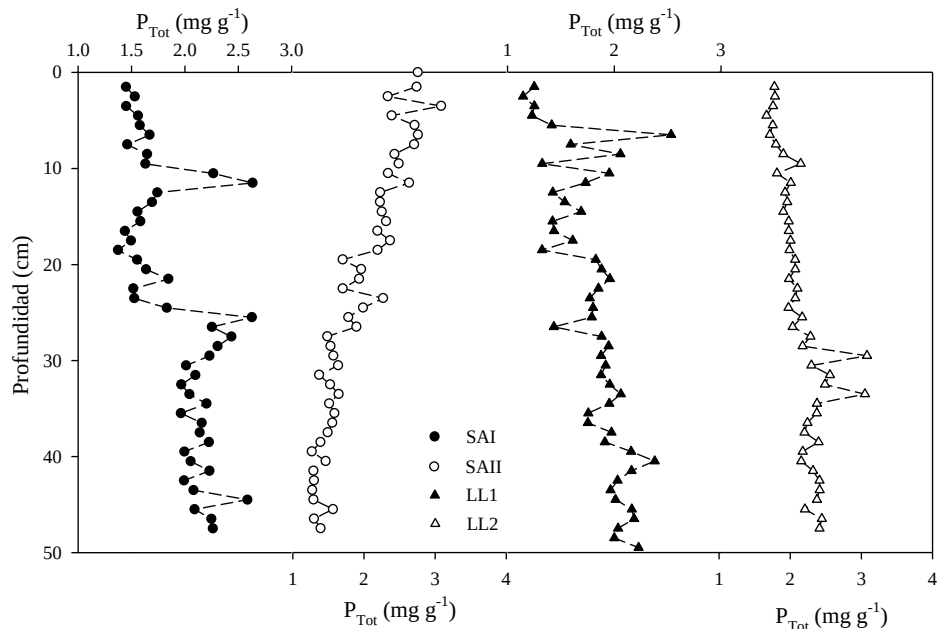


Figura 8.1.4a. Perfiles de concentración de Fósforo total (P_{Tot} ; mg g^{-1}) con respecto a la profundidad en los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

Los valores de SiO_2 en los cuatro núcleos permanecieron constantes a lo largo de los perfiles (Fig. 8.1.4b).

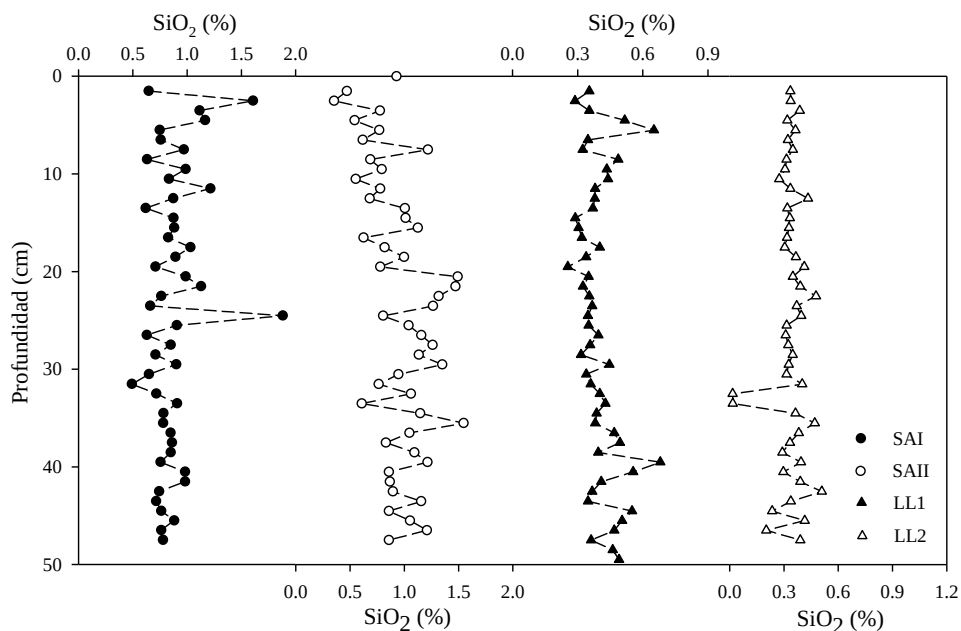


Figura 8.1.4b. Perfiles de concentración de sílice biogénico (SiO_2 ; %) con respecto a la profundidad en los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

8.2. Tasas de acreción (mm año⁻¹) y su relación con el cambio del nivel del mar

Los intervalos de valores de ²¹⁰Pb total (²¹⁰Pb_{tot}), ²¹⁰Pb soportado (²¹⁰Pb_{sop}), ²¹⁰Pb en exceso (²¹⁰Pb_{xs}), así como los intervalos de edad, Tasas de Acumulación Sedimentaria y Másica (TAS y TAM, respectivamente) para los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2) se muestran en la tabla 8.2.

Tabla 8.2. Valores de ²¹⁰Pb_{tot} obtenidos en los cuatro núcleos de Laguna Salada y El Llano.

Variable	Laguna Salada		El Llano	
	SAI (n=21)	SAII (n=22)	LL1 (n=15)	LL2 (n=23)
²¹⁰ Pb _{tot} (Bq kg ⁻¹)	26.7-55.2	17.8 – 37.9	14.4 – 25.2	13.3 – 28.1
²¹⁰ Pb _{xs} (Bq kg ⁻¹)	3.5-32.6	4.9-24.1	0.7-11.5	0.9-15.7
²¹⁰ Pb _{sop} (Bq kg ⁻¹)	22.6	13.8	13.7	12.4
Fechado (años)	1886-2013	1892-2013	1907-2013	1903-2013
TAS (cm año ⁻¹)	0.0-0.7	0.0-0.7	0.0-0.2	0.0-0.6
TAM (g cm ⁻² año ⁻¹)	0.0-0.6	0.0-0.3	0.0-0.3	0.0-0.7

8.2.1. ²¹⁰Pb total

Los cuatro núcleos sedimentarios muestran actividades de ²¹⁰Pb_{tot} que disminuyen con la profundidad (Fig. 8.2.1). La actividad de ²¹⁰Pb_{xs} se observó hasta 21 cm de profundidad en SAI, 22 cm para SAI, 15 cm para LL1 y 23 cm para LL2.

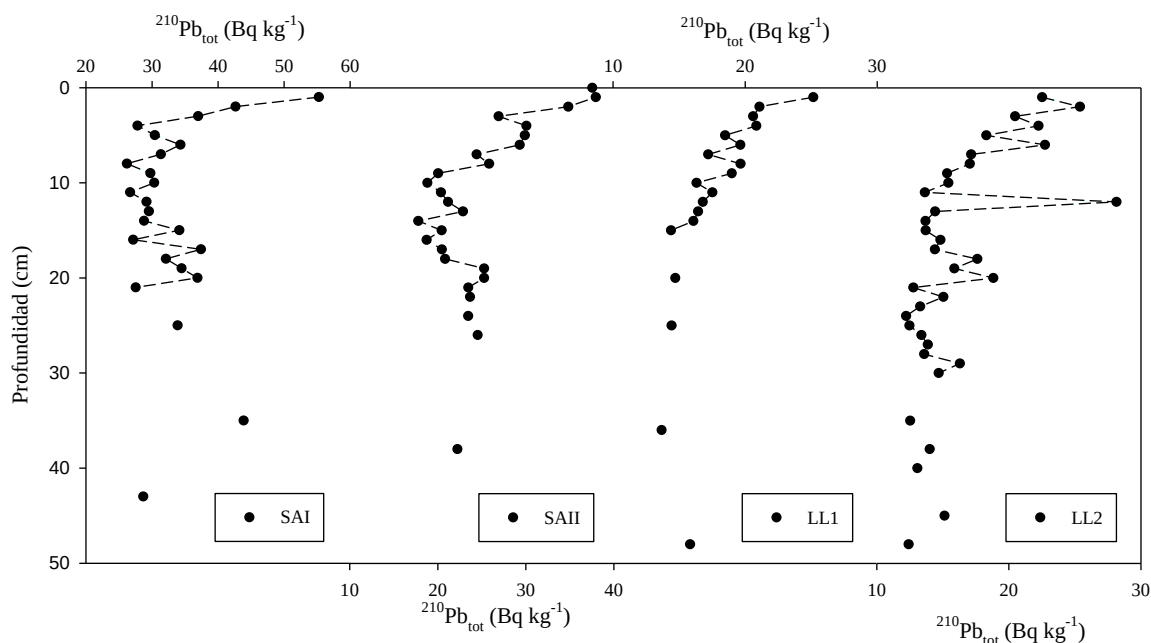


Figura 8.2.1. Perfiles de actividad de ^{210}Pb total (Bq kg^{-1}) con respecto a la profundidad (cm) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

8.2.2. ^{210}Pb soportado

A pesar de que los núcleos sedimentarios son geográficamente cercanos, los valores $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ fueron distintos, probablemente debido al aporte de sedimentos de distintas fuentes.

Con el propósito de evaluar el cambio de procedencia de los sedimentos en los núcleos SAI y SAII se utilizó el índice de terrígenos ($\text{TIF} = \text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$), el cual permite evaluar el aporte de material detrítico a los sedimentos. Los valores de TIF bajos indican que el sedimento proviene de sitios lejanos, mientras que los valores altos indican sedimentos procedentes de lugares más cercanos (Boström, 1973). Los valores de TIF variaron de 0.38 a 0.57 en SAI, y de 0.54 a 0.63 en SAII (Fig. 8.2.2). Los valores de TIF en la parte más profunda de ambos núcleos (por debajo de 25 cm) muestran cambios drásticos en las tendencias. A partir de esa profundidad (hacia las capas más profundas) se observa una transición hacia valores de TIF ligeramente más altos, y posteriormente ocurre una disminución en los valores que indican la acumulación de sedimentos procedentes de fuentes más lejanas. En la parte superior (de 10 cm a la superficie) los valores TIF muestran una

tendencia al incremento, lo cual sugiere un nuevo cambio de procedencia de los sedimentos, con un origen más cercano. Las variaciones observadas por los valores de TIF en SAI y SAII indican que los sedimentos por debajo de 25 cm de profundidad tienen una procedencia distinta a los acumulados en la sección intermedia, lo cual explica las altas actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ observadas en la sección más profunda de ambos núcleos (Fig. 8.2.1).

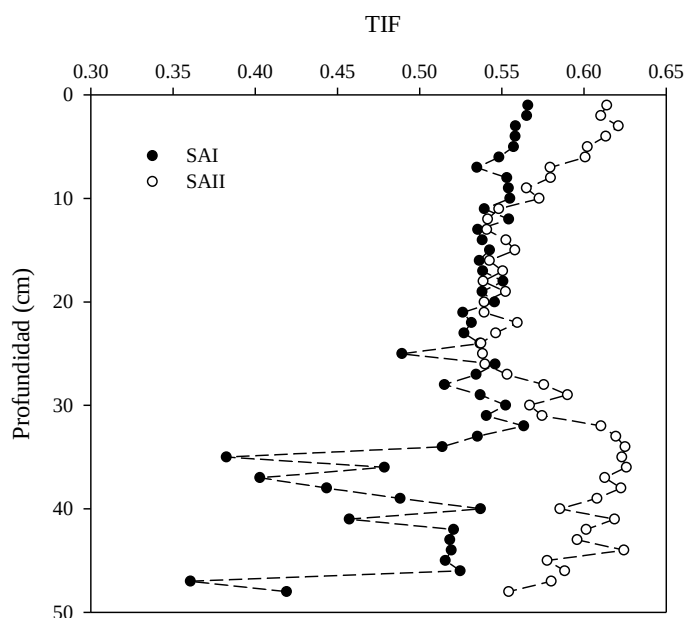


Figura 8.2.2. Perfiles de valores de los índices de TIF con respecto a la profundidad (cm) de los núcleos SAI y SAII de laguna Salada.

En la laguna El Llano, los valores de ^{214}Pb obtenidos por espectrometría gamma fueron más elevados que los valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$. Debido a que las incertidumbres de las determinaciones por espectrometría gamma tienden a ser mayores a los valores derivados de la espectrometría alfa, se decidió tomar el valor más profundo del perfil de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ como $^{210}\text{Pb}_{\text{sop}}$ para los núcleos LL1 y LL2.

8.2.3. ^{210}Pb en exceso

Las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ en todos los núcleos presentaron una tendencia a disminuir con la profundidad (Fig. 8.2.3). El intervalo de valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ en SAI fue ligeramente más alto que el de SAII, mientras que los valores en los núcleos LL1 y LL2 fueron comparables entre sí.

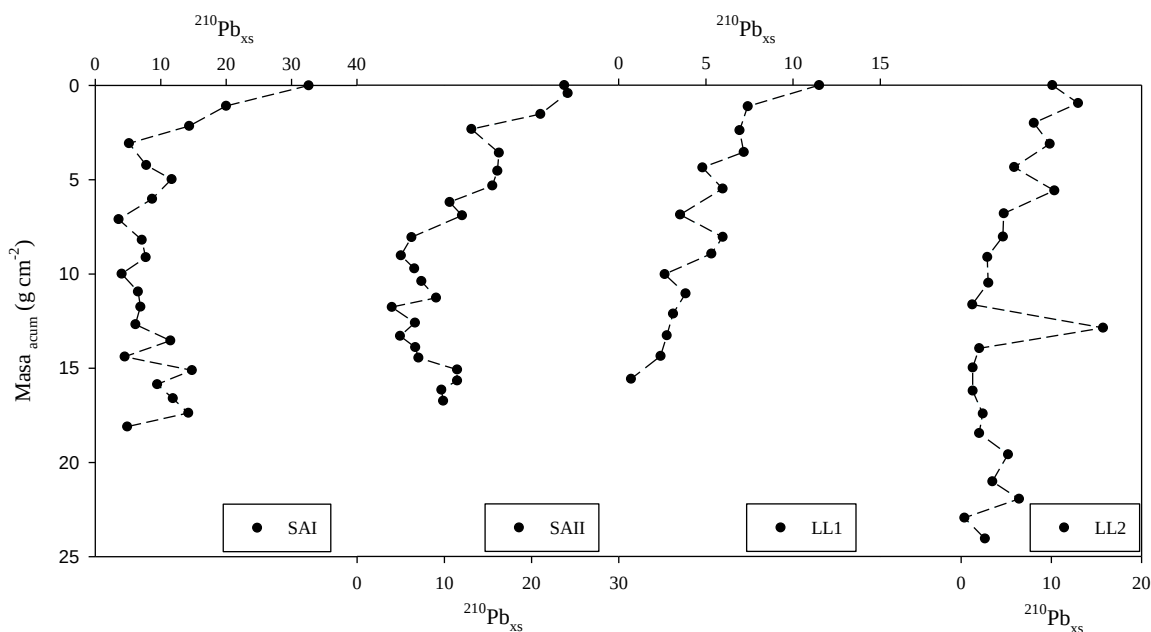


Figura 8.2.3. Perfiles de actividad de ^{210}Pb en exceso (Bq kg^{-1}) con respecto a la masa acumulada (g cm^{-2}) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAIL) y El Llano (LL1 y LL2).

Los inventarios totales de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ para SAI y SAIL fueron 1952 ± 123 y 1992 ± 65 Bq m^{-2} , mientras que para LL1 y LL2 fueron 817 ± 76 y 1328 ± 126 Bq m^{-2} respectivamente. Los flujos atmosféricos de ^{210}Pb calculados a partir de los inventarios corresponden a 61 ± 4 , 62 ± 2 , 26 ± 2 y 41 ± 4 $\text{Bq m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ para SAI, SAIL, LL1 y LL2, respectivamente.

8.2.4. Fechado

Para elegir el modelo de fechado adecuado se realizó una correlación entre los valores de $\ln^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ y $\text{Masa}_{\text{acum}}$. En la Fig. 8.2.4a se observó que para SAI, SAIL y LL2 no existe una correlación lineal significativa entre $\ln^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ y $\text{Masa}_{\text{acum}}$, y a pesar de que la R^2 para LL1 si fue significativa ($p < 0.05$), sus valores presentan una ligera dispersión. Por lo tanto, se asumió una tasa de sedimentación variable para todos los casos.

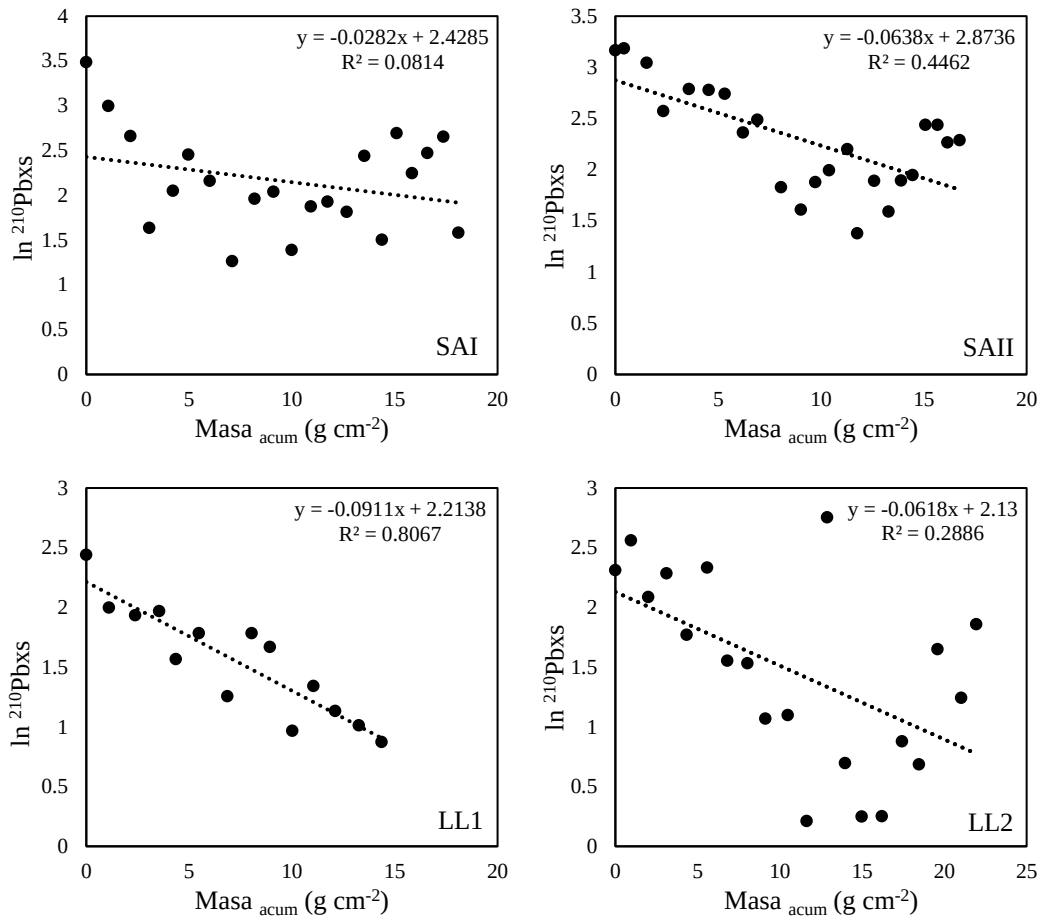


Figura 8.2.4a. Regresión lineal entre los valores de $\ln^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ y la masa acumulada (g cm^{-2}) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

Una vez que se identificó que la tasa de sedimentación no ha sido constante a través del tiempo, se eligió el método de fechado CF (Constant Flux), bajo la suposición de flujo constante de ^{210}Pb y una tasa de acumulación másica variable (Sanchez-Cabeza et al., 2012). La aplicación del modelo CF requiere el conocimiento del inventario total de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en el núcleo (expresado en Bq m^{-2}), lo cual no siempre es posible. Un caso habitual es que, debido a la longitud del núcleo muestreado, el ^{210}Pb no llegue al valor de base. En este caso tenemos como alternativas utilizar los modelos CA (Constant Activity; para fechar) y CFCS (para obtener tasas de acumulación medias), o bien estimar el inventario que falta a través de: a) tasas de acumulación de referencia (calculadas a partir del modelo CFCS), o b) utilizando una fecha de referencia del núcleo que se conozca con precisión

(Appleby, 1998; Sanchez-Cabeza et al., 2012). Los inventarios de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ calculados en este estudio resultaron completos.

El fechado abarcó periodos de 127 años para SAI (desde 2013 ± 0.0 a 1886 ± 68.0), 121 para SAII (desde 2013 ± 0.0 a 1892 ± 20.4), 106 para LL1 (desde 2013 ± 0.0 a 1907 ± 70.0) y 110 para LL2 (desde 2013 ± 0.0 a 1903 ± 94.0 ; Fig. 8.2.4b; Tabla 8.2).

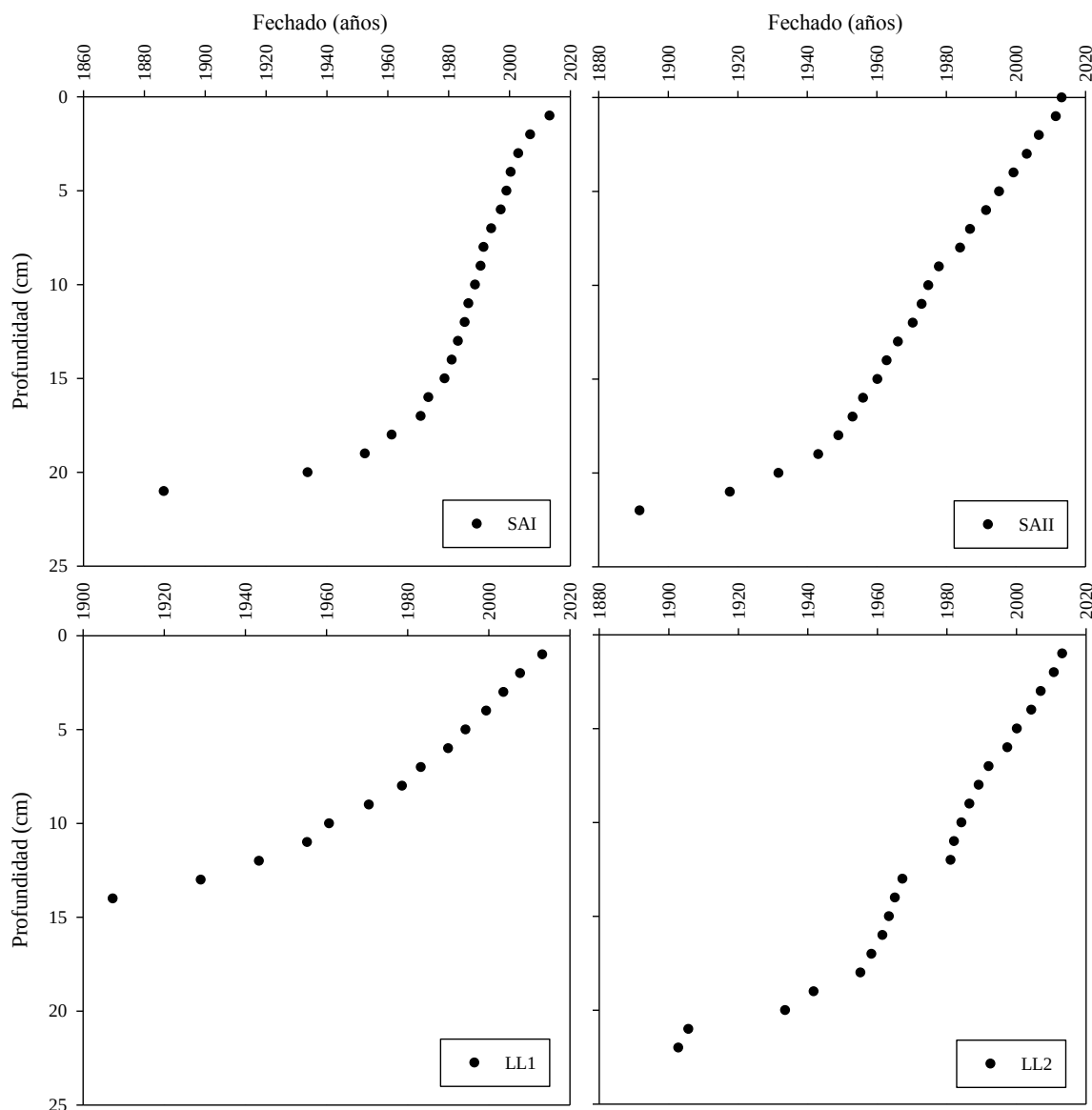


Figura 8.2.4b. Modelos de edad derivados del método de ^{210}Pb de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2) con respecto a la profundidad.

8.2.5. Tasas de Acumulación Sedimentaria y Másica

Las tasas de acumulación sedimentaria (TAS; cm año^{-1}) en los núcleos SAI y SAII tuvieron una tendencia a aumentar hacia años recientes. Sin embargo, a partir de los años 1980's, las tasas aumentan aceleradamente en el núcleo SAI (sitio más alejado del canal) mientras que en SAII (que está localizado junto al canal), disminuyen drásticamente (Fig. 8.2.5a). En los núcleos LL1 y LL2, de manera general, las TAS tienden a aumentar hacia años recientes (Fig. 8.2.5a).

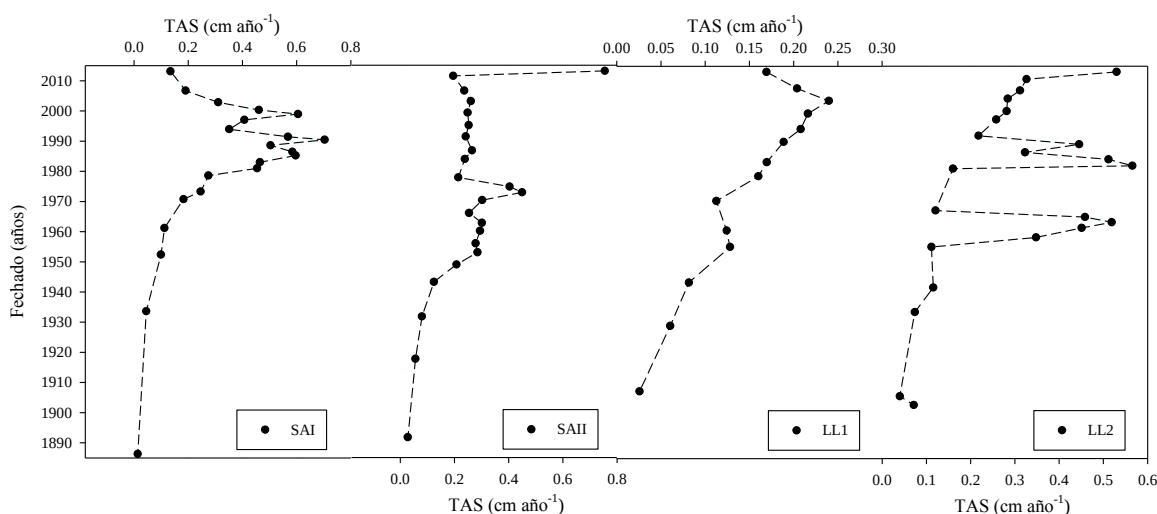


Figura 8.2.5a. Perfiles de tasas de acumulación sedimentaria (cm año^{-1}) con respecto a la edad (años) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

Las tasas de acumulación másica (TAM, $\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$) tendieron a aumentar hacia años recientes en todos los núcleos, excepto SAI, en el cual se observó una disminución de la acumulación a partir de los años 2000's (Fig. 8.2.5b).

Las actividades de ^{137}Cs no pudieron ser detectadas mediante el análisis de espectrometría de rayos gamma, sin embargo, en este caso, el método de fechado pudo ser corroborado con las fechas de inicio y operación de la CNLV.

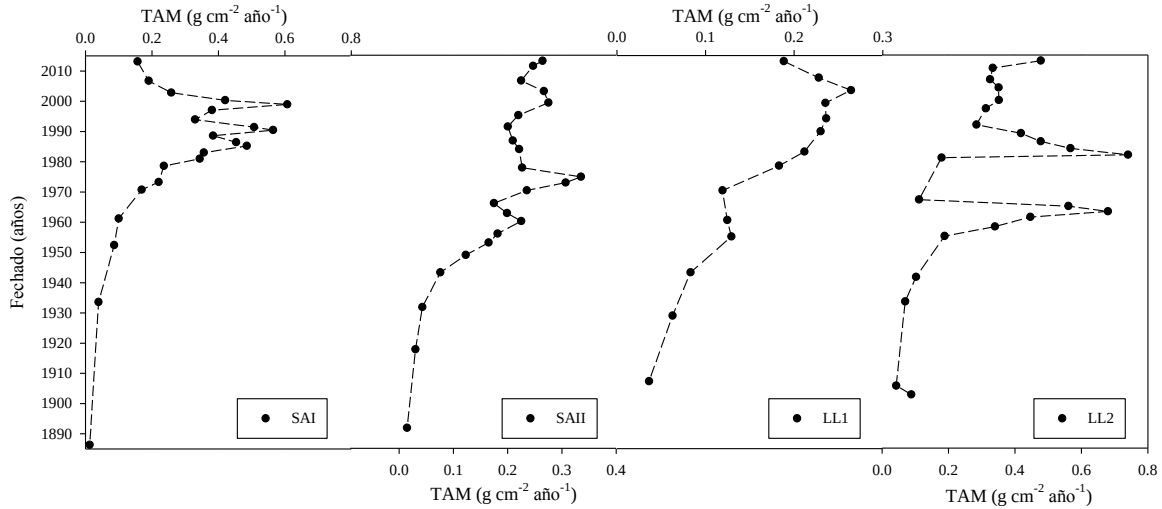


Figura 8.2.5b. Perfiles de tasas de acumulación másica ($\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) con respecto a los fechados (años) de los núcleos de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

8.3. Registro de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta 2013

Partiendo de la hipótesis que en zonas de marismas (influenciadas por mareas), los ritmos de acreción sedimentarios son equivalentes a los cambios en el nivel del mar (Bindoff et al., 2007), las TAS calculadas anteriormente (sección 8.2.5) equivalen a las tasas de cambio de nivel del mar en Laguna Salada y Laguna El Llano.

El registro mareográfico para la zona de Veracruz tiene periodos incompletos (Fig. 8.3), y reporta una tasa de elevación del nivel del mar de $1.9 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$, cuyo cálculo está basado solamente en 16 años de registros de mareas desde 1952 hasta 2003 (Zavala-Hidalgo et al., 2010). En este estudio fue posible realizar estimaciones de cambio de nivel de mar basadas en periodos superiores a 100 años (Tabla 8.3).

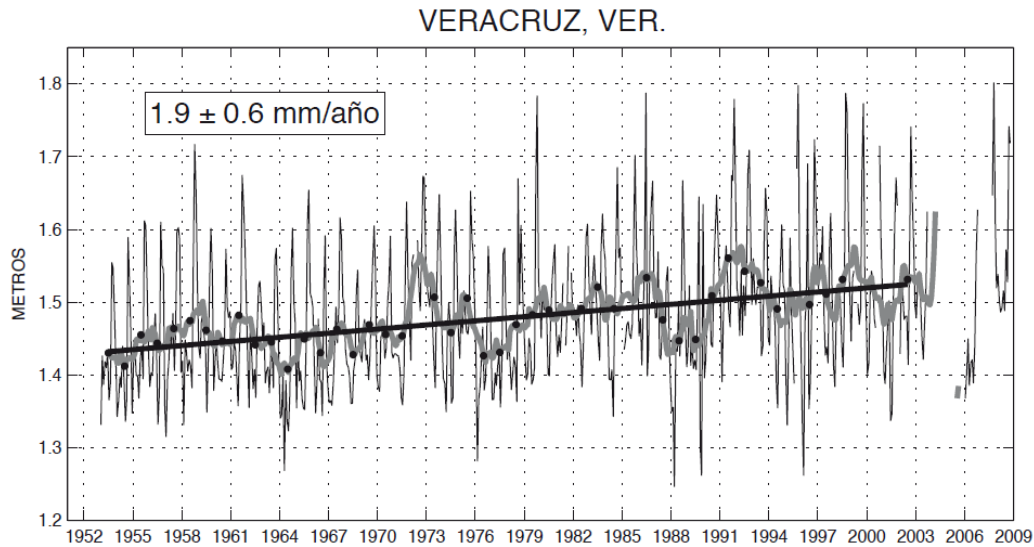


Figura 8.3. Tendencia de cambio del nivel del mar en la estación mareográfica de Veracruz. Tomado de Zavala-Hidalgo, et al., 2010.

Tabla 8.3. Tasas medias de cambio de nivel del mar (mm año^{-1}) y su periodos de cálculo para los núcleos Laguna Salada (SAI y SAI) y El Llano (LL1 y LL2).

Núcleo	Tasas medias de cambio de nivel del mar (fechado completo)	Tasas medias de cambio de nivel del mar (a partir de apertura del canal de la CNLV, 1980's)	Tasa de cambio de nivel del mar para el mismo periodo del que se tienen datos mareográficos (1952 a 2003)	Tasa de cambio de nivel del mar para la costa de Veracruz (datos de mareógrafos de 1952 a 2003; Zavala-Hidalgo et al., 2010)
SAI	$3.5 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$	$4.9 \pm 0.9 \text{ mm año}^{-1}$	$1.8 \pm 0.2 \text{ mm año}^{-1}$	$1.9 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$
SAII	$2.6 \pm 0.2 \text{ mm año}^{-1}$	$3.0 \pm 0.1 \text{ mm año}^{-1}$	$2.8 \pm 0.2 \text{ mm año}^{-1}$	
LL1	$1.4 \pm 0.2 \text{ mm año}^{-1}$	$2.0 \pm 0.1 \text{ mm año}^{-1}$	$1.7 \pm 0.1 \text{ mm año}^{-1}$	
LL2	$3.1 \pm 1.1 \text{ mm año}^{-1}$	$3.5 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$	$3.4 \pm 1.0 \text{ mm año}^{-1}$	

8.4. Concentraciones de elementos mayores y traza, y la influencia de la Central Nuclear Laguna Verde

8.4.1. Concentraciones de elementos mayores y traza

Los intervalos de concentraciones de los elementos mayoritarios (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na) y traza (Li, Ag, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sr, U, V, Zn) se muestran en la Tabla 8.4.1.

Tabla 8.4.1. Intervalos de concentraciones y promedios de elementos (mayores y traza) en los núcleos sedimentarios SAI, SAIL, LL1 y LL2.

Elemento	SAI		SAIL		LL1		LL2	
	Intervalo	Prom	Intervalo	Prom	Intervalo	Prom	Intervalo	Prom
Al (%)	3.9-7.4	6.3	3.4-7.7	6.2	3.2-3.8	3.4	2.7-4	3.6
Ca (%)	1.5-3.8	2.2	1.3-4	2.5	4.4-8	4.9	3.3-6	4.3
Fe (%)	3.8-5.7	4.9	1.9-5.8	4.1	2.6-4	3.4	2.8-4.1	3.4
K (%)	1.1-1.4	1.2	0.8-1.6	1.4	0.9-1	0.9	0.8-1.2	1.0
Mg (%)	1.8-3	2.3	1.1-2.5	1.9	1.4-2	1.5	1.4-1.9	1.5
Mn (mg kg ⁻¹)	366-5110	989	256-751	444	454-1140	577	508-1310	609
Na (%)	2.4-3	2.8	1.5-3	2.8	1.3-2.8	1.5	1.4-2.7	1.6
Ag (mg kg ⁻¹)	0.06-0.5	0.1	0.05-7.9	0.3	0.1-1.0	0.1	0.1-10	0.4
As (mg kg ⁻¹)	1.6-6.3	3.4	1.4-15.6	5.5	1.1-8.9	2.2	0.4-4.0	1.6
Be (mg kg ⁻¹)	0.9-2.3	1.6	0.5-1.7	1.4	0.2-2.6	0.3	0.3-1.3	0.8
Cd (mg kg ⁻¹)	0.1-0.3	0.1	0.1-0.6	0.1	0.1-0.2	0.1	0.1-0.9	0.1
Co (mg kg ⁻¹)	19-77	31.6	10.2-30.8	21.7	10.6-16	13.1	9.8-17.8	12.5
Cr (mg kg ⁻¹)	97-189	128	52.5-165	94.3	106-207	165	118-311	162
Cu (mg kg ⁻¹)	49.4-103	69.8	21-91	54.3	14-45	17.7	15.2-31.7	22.2
Hg (ng kg ⁻¹)	10-70	25.6	10-10	10.0	10-30	10.6	10-50	18.1
Li (mg kg ⁻¹)	21.6-37	27.9	14.4-43	29.9	14-16.5	14.9	13.8-21.3	17.8
Mo (mg kg ⁻¹)	0.05-1.1	0.2	0.1-2.6	0.5	0.1-1.7	0.1	0.1-0.5	0.1
Ni (mg kg ⁻¹)	47-93	66.0	27.4-86	56.8	23.3-30.7	26.8	24.1-34.5	28.5
Pb (mg kg ⁻¹)	12-17.2	14.7	8.2-19.7	14.9	10-14	11.7	10.6-16.6	12.4
Sr (mg kg ⁻¹)	181-338	284	171-331	260	251-431	280.2	207-327	266
Th (mg kg ⁻¹)	1.5-5.8	4.9	2.6-7.6	5.1	2.5-4.3	3.1	2.7-11.5	3.5
U (mg kg ⁻¹)	0.9-2.2	1.7	1.0-3.1	2.0	1.0-22.8	1.5	0.8-2.5	1.1
V (mg kg ⁻¹)	62-165	106	70-232	128	44-136	78	41-126	74
Zn (mg kg ⁻¹)	76-133	95	52-143	96	48-74	64	56-83	68

En SAI (Fig. 8.4.1a), los perfiles que se mantuvieron homogéneos a lo largo del núcleo fueron todos los elementos mayoritarios y algunos traza: Al, Be, Ca, Cd, Fe, K, Li, Mg, Na, Pb, Sr, Th y U. Los elementos como Ag, As, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, V y Zn presentaron aumentos en la sección intermedia del núcleo (20-35 cm), mientras que Co, Mn, y nuevamente Cu, Mo, Ni y Zn tuvieron incrementos en la sección más profunda (35-48 cm).

Para el núcleo SAII (Fig. 8.4.1b), los valores de Al, Be, Cr, Hg, K, Na, Pb, Sr, Th y Zn se mantuvieron homogéneos a lo largo de sus perfiles. Los elementos como Ag, As, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, U y V presentaron aumentos en la sección intermedia del núcleo (10-20 cm). Los elementos en la sección del tapete superficial que estuvieron más enriquecidos respecto a la corteza terrestre fueron Ag, As, Cr, Cu, Mo, Ni y V, con valores de FENs de 187, 3.8, 6.1, 4.3, 2.0, 3.1 y 3.3, respectivamente; asimismo, sus contenidos en el tapete superficial fueron 7.9, 5.9, 165, 46.5, 2.2, 44.7 y 135 mg kg⁻¹, respectivamente.

En el Llano, el núcleo LL1 (Fig. 8.4.1c) mostró perfiles homogéneos de Al, Ca, Cd, Hg, K, Sr y Th a lo largo del núcleo. A pesar de que dichos perfiles fueron homogéneos, cabe resaltar que el Ca tuvo un máximo de 8 mg kg⁻¹ a los 41 cm de profundidad. Por otro lado, los perfiles de As, Cr, Co, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni y Zn presentaron homogeneidad a lo largo del perfil, sin embargo en la parte superficial (0-5 cm) se observaron incrementos. Finalmente, los valores de Ag, Be, U y V presentaron una tendencia errática con incrementos a lo largo de sus perfiles.

En LL2, se observaron perfiles homogéneos de Al, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, K, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Th y U, de los cuales, Cd, Co, Mn y Pb, presentaron un valor máximo sub-superficial a los 12 cm de profundidad (para Co, Mn y Pb) y a los 8 cm (para Cd). En los perfiles de Ag, Mg, Na y Zn se observaron aumentos superficiales entre 0 y 10 cm de profundidad, mientras que As, Be, Cu, Hg, Li y V mostraron perfiles erráticos a lo largo del núcleo.

De manera general, las concentraciones de Al, Cu, Mg, Mn (especialmente en las secciones más profundas de SAI), Na y Ni fueron más altas en sedimentos de Laguna Salada con respecto a los de El Llano, sin embargo, Ca y Cr resultaron más elevados en la laguna El Llano.

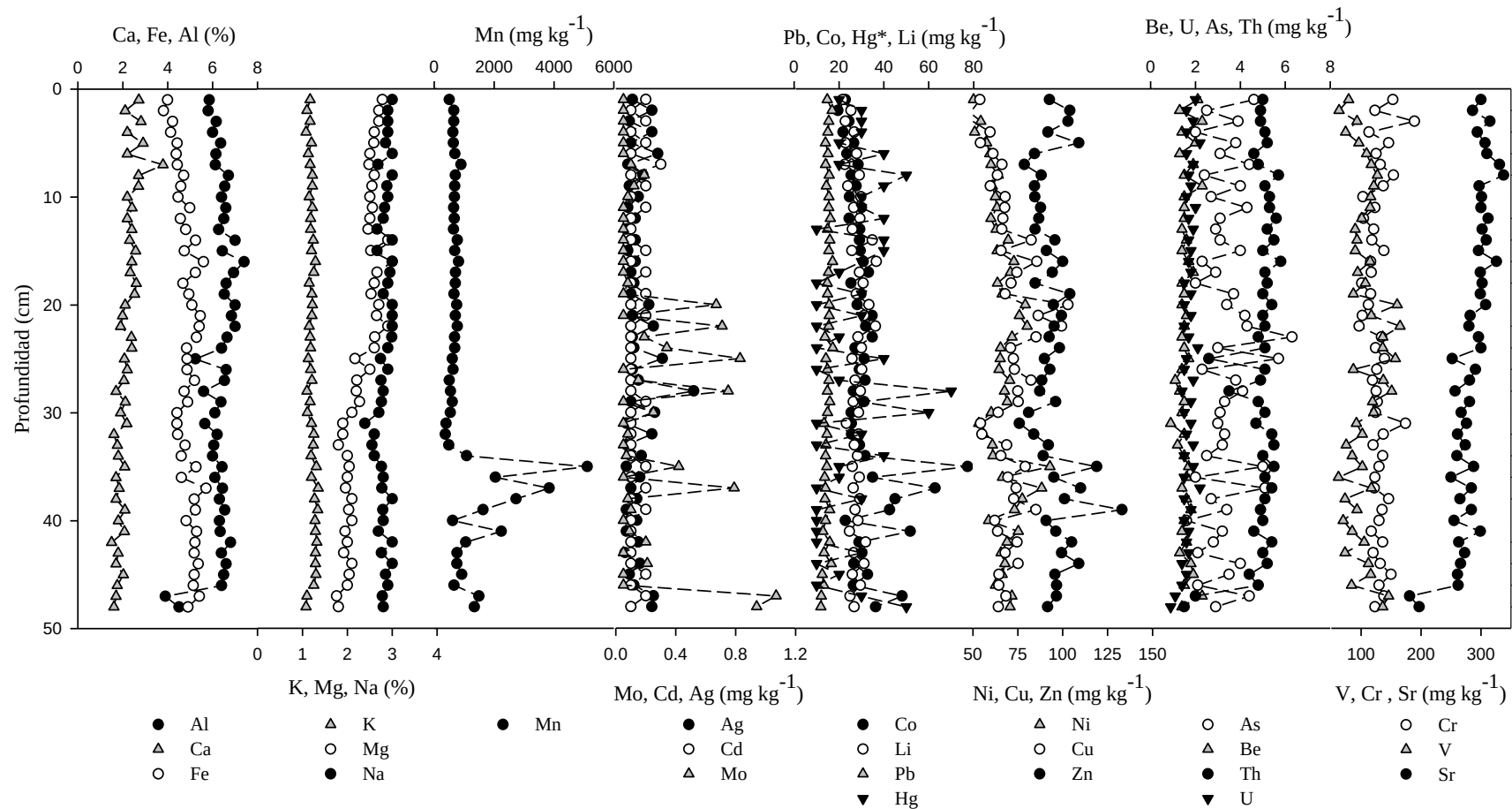


Fig. 8.4.1a. Perfiles de concentraciones de elementos (mg kg⁻¹, excepto *Hg: ng kg⁻¹) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo SAI de laguna Salada.

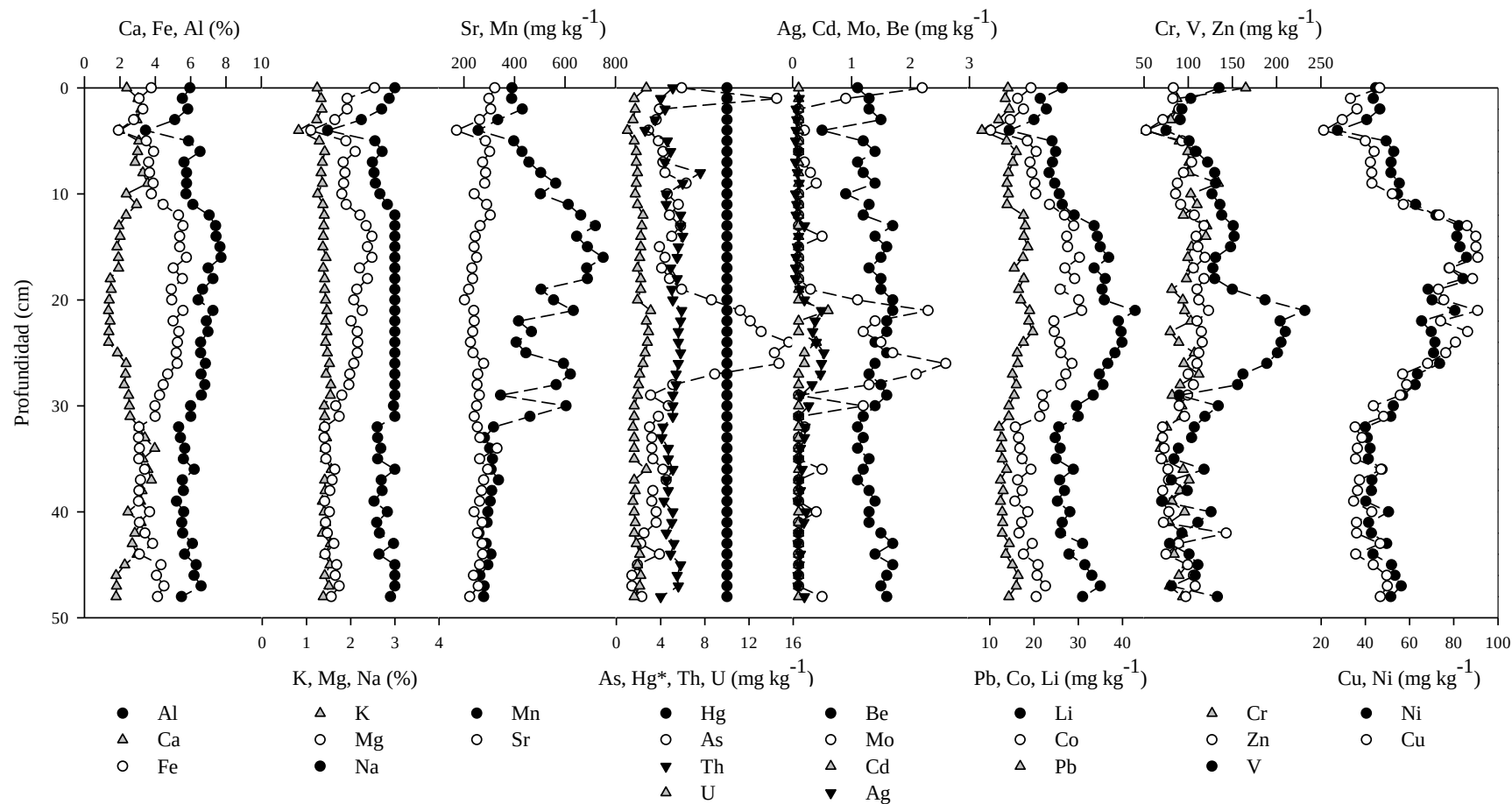


Fig. 8.4.1b. Perfiles de concentración de elementos (mg kg⁻¹, excepto *Hg: ng kg⁻¹) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo SAIL de laguna Salada.

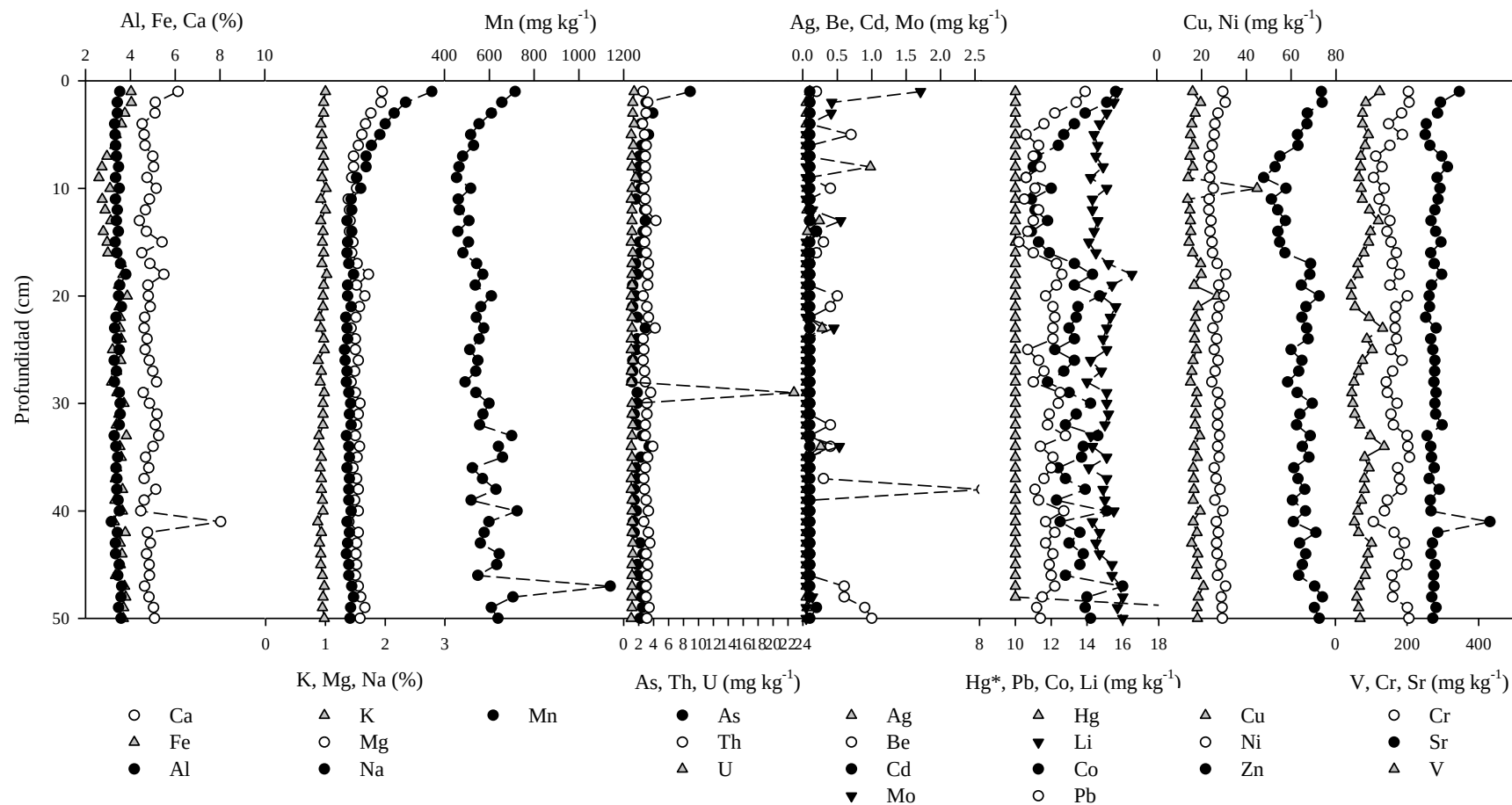


Fig. 8.4.1c. Perfiles de concentración de elementos (mg kg⁻¹, excepto *Hg: ng kg⁻¹) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo LL1 de laguna El Llano.

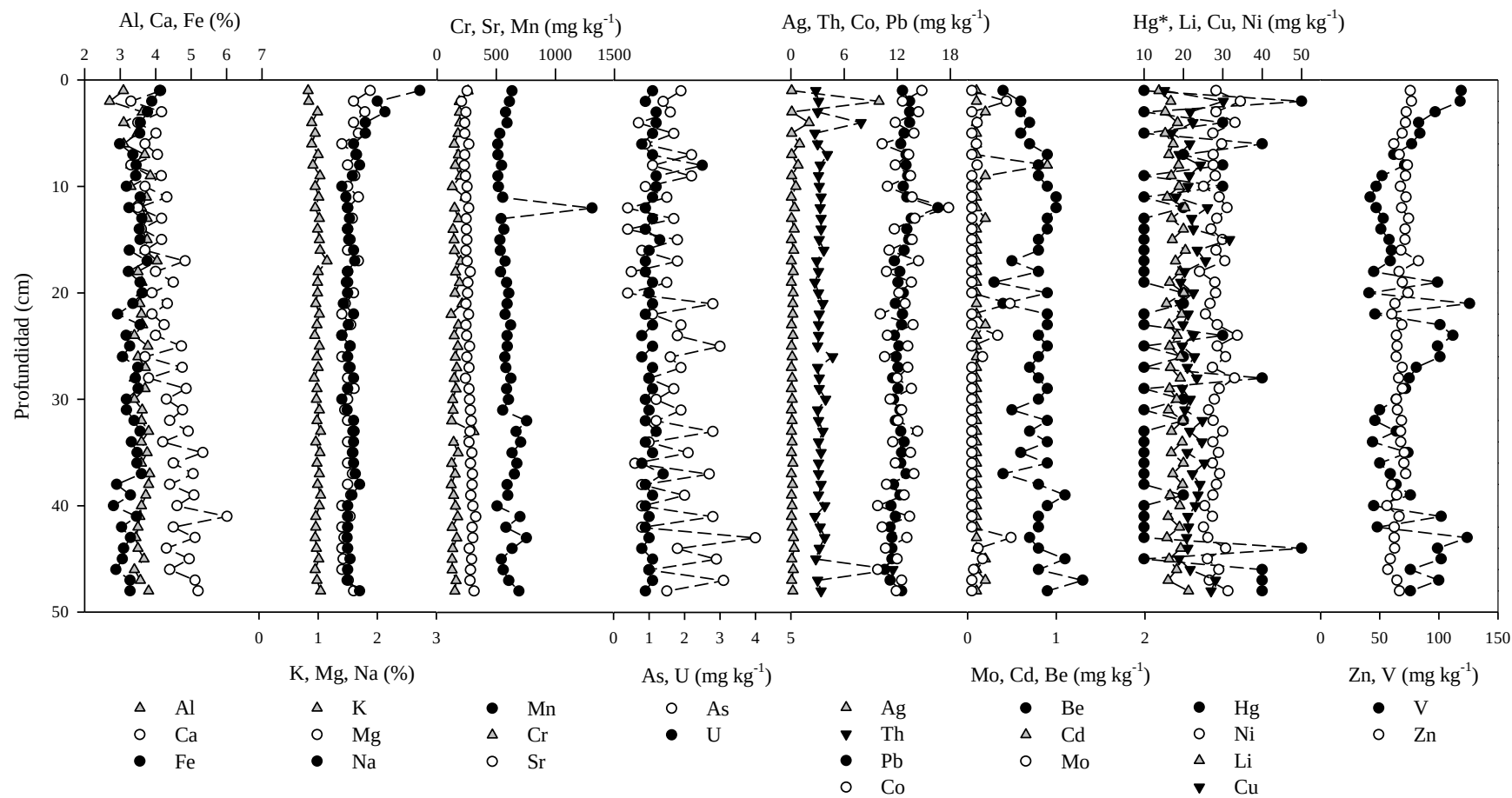


Fig. 8.4.1d. Perfiles de concentraciones de elementos (mg kg^{-1} , excepto $^*\text{Hg}$: $\mu\text{g kg}^{-1}$) con respecto a la profundidad (cm) para el núcleo LL2 de laguna El Llano.

8.4.2. Factores de enriquecimiento normalizados

La Tabla 8.4.2 muestra los intervalos de los valores de FENs obtenidos por ambos métodos (VC: Valores de la Corteza; VF: Valores de Fondo) para los 4 núcleos sedimentarios, así como, los valores de referencia de elementos reportados por Wedepohl (1995) para la corteza continental superior y los valores de fondo regionales obtenidos para cada elemento.

Los valores de FENs calculados en base a los VC mostraron enriquecimientos moderados ($FEN > 2$; Tabla 8.4.2) para Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, V y Zn en los cuatro núcleos (SAI, SAII, LL1 y LL2). Sin embargo, en los resultados con respecto a los VF solamente resultaron enriquecidos Ag y As para Laguna Salada, y Ag y Cr para el Llano (Fig. 8.4.2a, b, c y d).

El hecho de que el número de elementos enriquecidos disminuyera cuando se utilizaron los VF indica que en la zona de estudio, los elementos se encuentran naturalmente más enriquecidos en el sedimento. Para discusiones posteriores se tomarán en cuenta los FENs calculados a partir de los VC.

Tabla 8.4.2. Intervalos de valores de Factores de Enriquecimiento (FENs) calculados a partir de los Valores de la Corteza (VC, Wedepohl, 1995) y los Valores de Fondo (VF) locales.

Elemento	SAI		SAII		LL1		LL2		VC Wedepohl, 1995	VF		VF	
	FEN VC	FEN VF	FEN VC	FEN VF	FEN VC	FEN VF	FEN VC	FEN VF		SAI	SAII	LL1	LL2
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	7.7	6.3	6.2	3	3
Ca	0.4-1.2	0.6-1.7	0.4-1.4	0.6-2.3	2.6-5.1	0.9-1.8	2.0-3.4	0.9-1.5	2.9	2.3	2.5	4	3
Fe	1.7-3.5	0.7-1.6	1.4-2.0	1.0-1.4	1.9-3.0	0.9-1.4	1.9-3.6	0.8-1.5	3.1	4.9	4.1	3	3
K	0.5-0.8	0.7-1.2	0.5-0.7	0.7-1.1	0.7-0.8	1.0-1.1	0.7-0.9	0.9-1.1	2.9	1.2	1.4	0.9	0.9
Mg	1.8-2.8	0.7-1.2	1.5-2.5	0.9-1.5	2.4-3.4	0.9-1.3	2.3-3.6	0.8-1.3	1.4	2.3	1.8	1.4	1.4
Mn	0.6-8.6	0.6-8.7	0.5-1.1	0.7-1.8	1.4-3.4	0.9-1.9	1.4-3.9	0.8-2.1	527	650	445.2	458	524
Na	1.3-2.3	0.7-1.3	1.3-1.7	0.9-1.2	1.2-2.6	0.9-1.9	1.3-2.9	0.8-1.9	2.6	2.8	2.8	1.3	1.4
Ag	1.3-13	0.6-6.3	1.0-187	0.4-68	1.9-40	0.9-18.3	1.7-519	0.7-218	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
As	1.0-4.4	0.6-2.5	0.8-10	0.6-7.7	1.3-9.8	0.9-7.0	0.4-4.5	0.8-8.0	2.0	3.7	4.1	1.2	0.4
Be	0.4-1.5	0.6-2.1	0.4-0.7	0.7-1.5	0.1-1.9	0.9-24.8	0.2-0.9	0.7-2.9	3.1	1.5	1.4	0.1	0.4
Cd	1.0-3.9	0.6-2.3	1.0-6.3	0.6-3.8	2.0-4.4	0.9-1.9	1.9-20.7	0.7-8.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Co	2.2-3.0	0.7-2.6	1.8-3.0	1.0-1.6	2.0-2.9	0.9-1.3	1.8-3.2	0.8-1.4	12	30.5	21.7	11	10
Cr	3.1-7.8	0.6-1.6	2.5-6.1	0.8-1.9	7.1-13.5	1.0-1.8	6.9-19	0.8-2.1	35	133	92	109	120
Cu	4.5-9.7	0.7-1.6	3.2-6.9	0.9-2.0	2.3-7.1	0.9-2.9	2.7-6.2	0.8-1.9	14	68.8	54.5	14	17
Hg	0.2-1.7	0.5-4.3	0.2-0.4	0.6-1.3	0.4-1.2	0-0	0.3-2.6	0.7-5.5	0.1	22.9	10	10	10
Li	1.3-2.3	0.7-1.3	1.3-2.1	0.9-1.5	1.5-1.6	1.0-1.1	1.5-2.2	0.8-1.2	22	25.8	30	14	15
Mo	0.0-1.5	0.6-25	0.1-2.1	0.6-17.4	0.1-2.7	0.9-31	0.1-0.9	0.7-9.7	1.4	0.7	0.2	0.1	0.1
Ni	3.3-7.5	0.7-1.6	3.0-4.7	0.9-1.5	2.8-3.7	0.9-1.2	2.8-5.2	0.8-1.5	19	64.9	57.1	23	25
Pb	0.9-1.4	0.7-1.2	1.0-1.3	0.9-1.2	1.4-1.8	0.9-1.2	1.3-2.3	0.8-1.3	17	14.4	15	10	11
Sr	0.9-1.3	0.8-1.2	0.8-1.3	0.6-1.1	1.8-2.4	0.9-1.8	1.5-2.3	0.8-1.2	316	287	258.5	252	224
Th	0.3-0.7	0.6-1.8	0.5-0.7	0.9-1.7	0.6-1.0	0.9-1.6	0.5-2.5	0.8-3.7	10	4.8	5	3	3
U	0.6-1.1	0.1-0.1	0.8-1.4	0.9-1.6	0.9-20	0.9-21	0.7-2.3	0.8-2.8	2.5	1.8	1.9	1	0.8
V	1.5-5.5	0.6-2.4	1.8-4.7	0.8-2.0	1.8-5.9	0.9-2.9	1.6-6.4	0.8-3.0	53	103.9	127.7	45	43
Zn	1.9-3.7	0.7-1.4	1.9-3.8	0.8-1.7	2.1-3.2	0.9-1.4	2.3-4.2	0.8-1.4	52	93.5	94.8	51	58

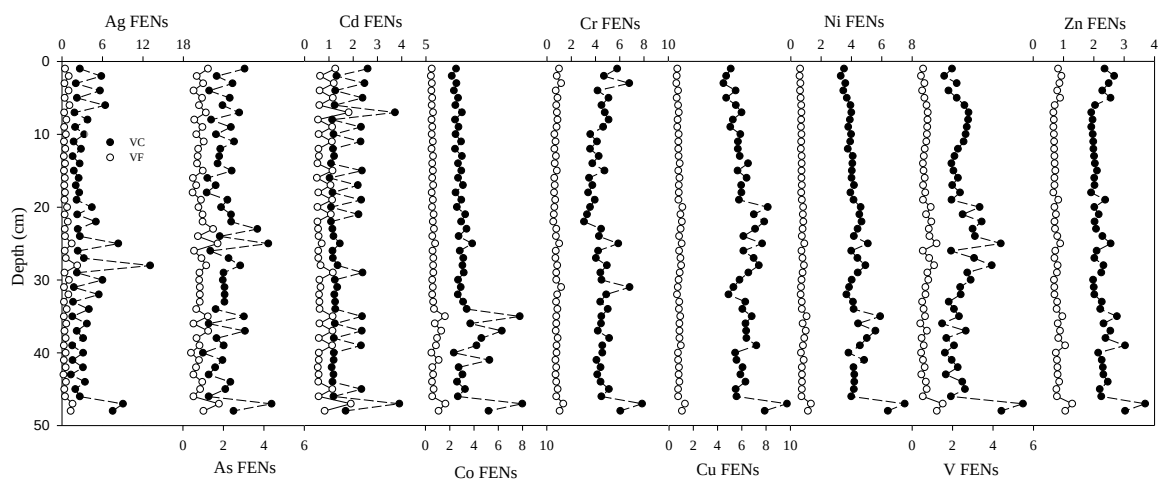


Fig. 8.4.2a. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo SAI de laguna Salada.

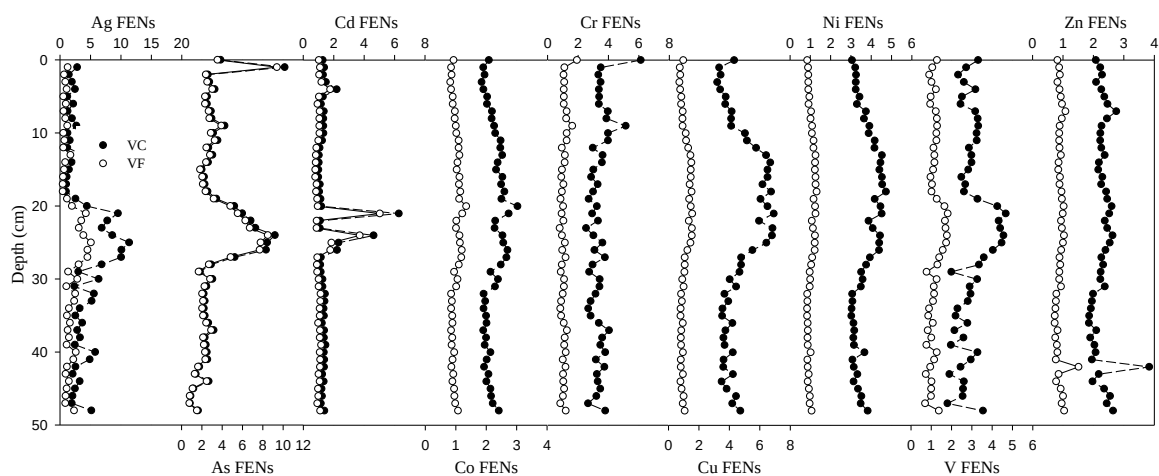


Fig. 8.4.2b. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo SAII de laguna Salada.

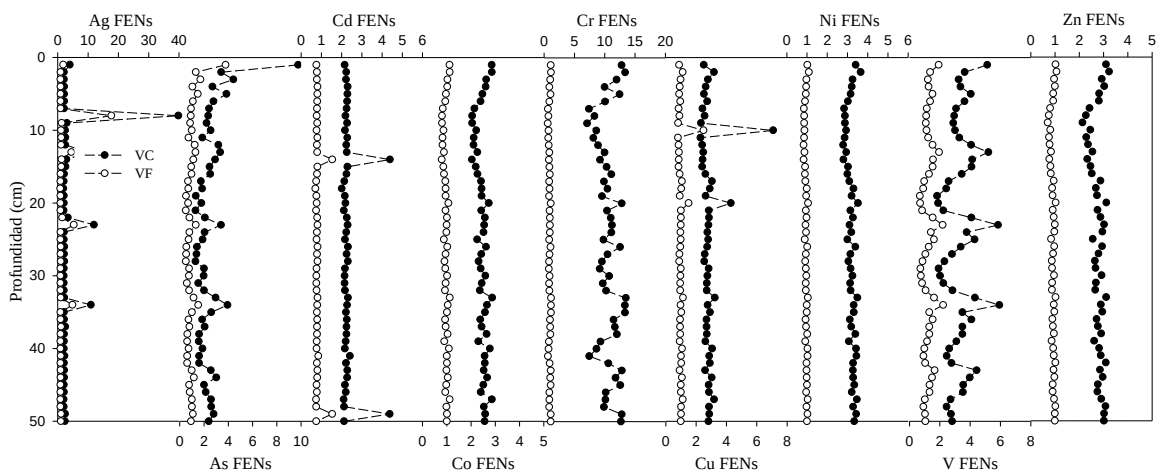


Fig. 8.4.2c. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo LL1 de laguna El Llano.

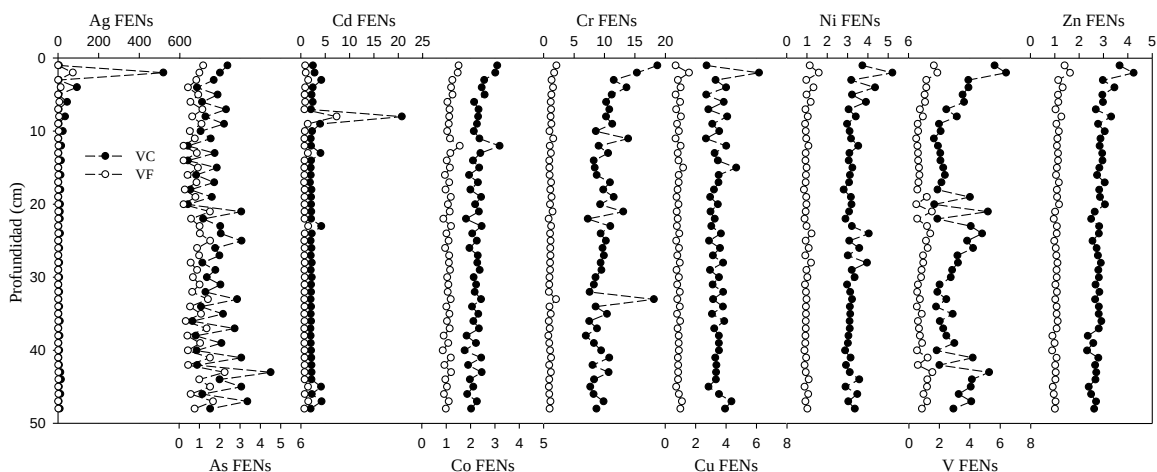


Fig. 8.4.2d. Factores de Enriquecimiento Normalizados (FENs) calculados en base a los Valores de la Corteza (VC) y los Valores de Fondo (VF) para el núcleo LL2 de laguna El Llano.

8.4.3. Flujos de elementos

Los intervalos de los flujos de elementos enriquecidos se muestran en la Tabla 8.4.3. Los cálculos de los flujos se realizaron para los elementos enriquecidos, así como para Hg y Pb, ya que son emitidos como resultado de numerosas actividades industriales, desde lugares densamente poblados y áreas industrializadas hasta los lugares más prístinos y remotos del mundo (Steinnes y Friedland, 2006).

Tabla 8.4.3. Intervalos de los valores de flujos de elementos enriquecidos para los núcleos de Laguna Salada y El Llano.

Elemento	Flujos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$)			
	SAI	SAII	LL1	LL2
Ag	0.0-0.1	0.01-2.1	0.0-0.1	0.01-3.3
As	0.05-2.3	0.2-3.6	0.09-1.7	0.03-1.2
Cd	0.0-0.1	0.00-0.03	0.01-0.03	0.0-0.4
Co	0.4-16.1	0.3-7.2	0.4-3.7	0.5-10.1
Cr	1.2-88.6	1.5-43.6	5.2-48.9	8.9-174
Cu	1.05-33.7	1.1-20.3	0.5-5.6	0.8-21.6
Hg	0.0-0.03	0.0-0.0	0.0-0.0	0.8-17
Ni	0.9-35.0	0.9-19.3	0.1-0.9	1.1-21.5
Pb	0.2-8.4	0.3-4.8	0.4-3.2	0.5-9.7
V	1.4-68.3	2.9-42.5	0.1-1.0	2.9-56.9
Zn	1.2-66.2	1.6-28.8	0.08-0.8	2.7-53.5

En el núcleo SAI (Fig. 8.4.3a), los valores de los flujos incrementan a partir de 1970's y posteriormente, después del año 2000 y hasta años recientes, se observó la disminución de los flujos. Para el caso de SAI (Fig. 8.4.3b), los flujos incrementan a partir de 1940 y posteriormente, disminuyen después de 1970's. El flujo de Hg permaneció constante a lo largo de ambos perfiles.

En la laguna del Llano, el núcleo LL1 (Fig. 8.4.3c), los perfiles de Ag, Cd y Hg permanecieron constantes a lo largo del núcleo, excepto un máximo de Ag registrado en 1979 ($0.18 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$). Los flujos de As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn incrementaron hacia años recientes. En el caso del Cu, su perfil mostró un flujo máximo ($5.58 \mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) en 1961.

Para el caso de LL2 (Fig. 8.4.3d), los flujos mostraron un incremento drástico en 1984 y en 1986 todos los perfiles disminuyen a sus valores mínimos para posteriormente incrementar en 1989.

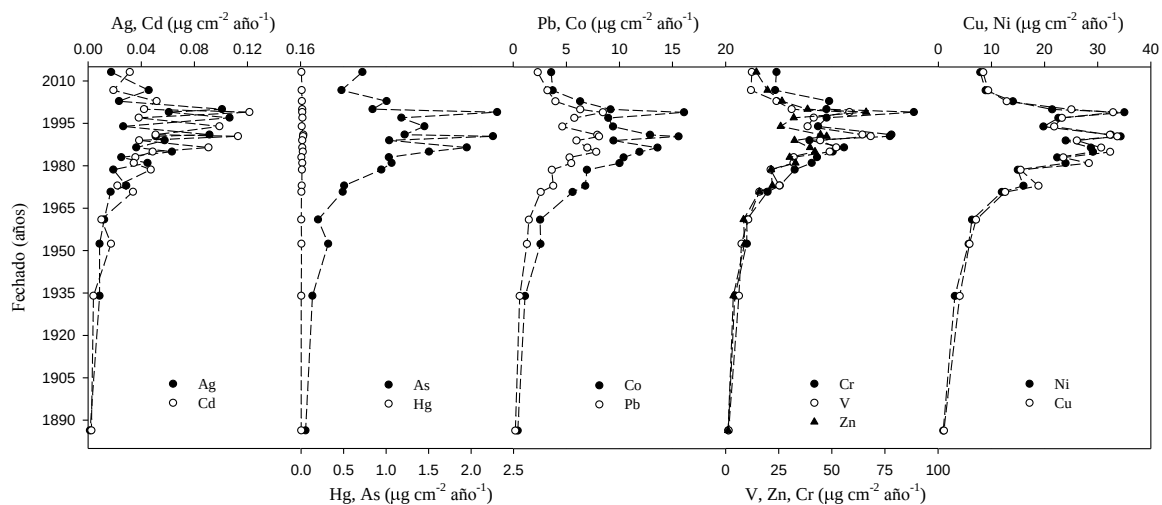


Figura 8.4.3a. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo SAI de laguna Salada.

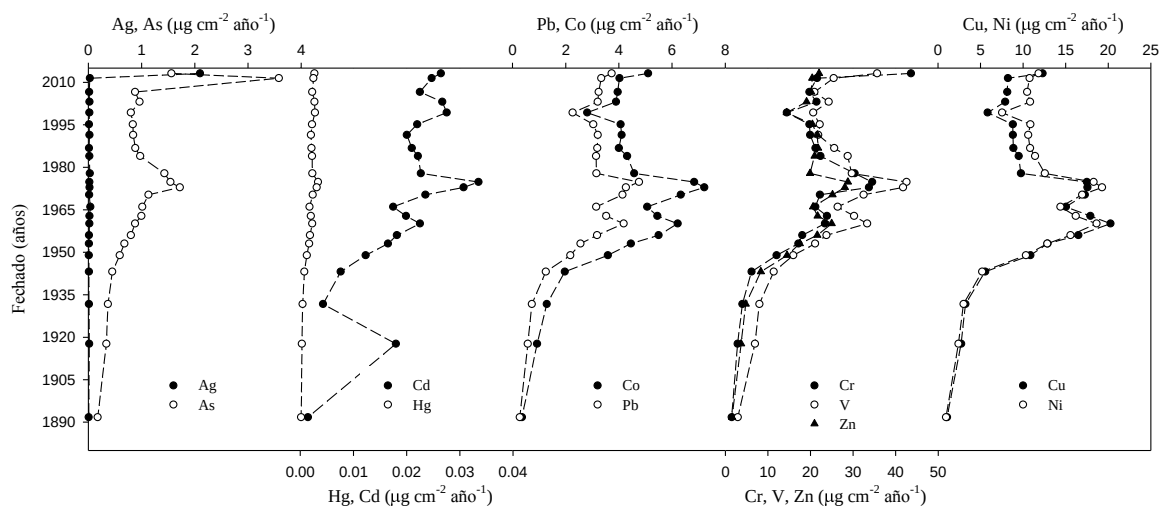


Figura 8.4.3b. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo SAI de laguna Salada.

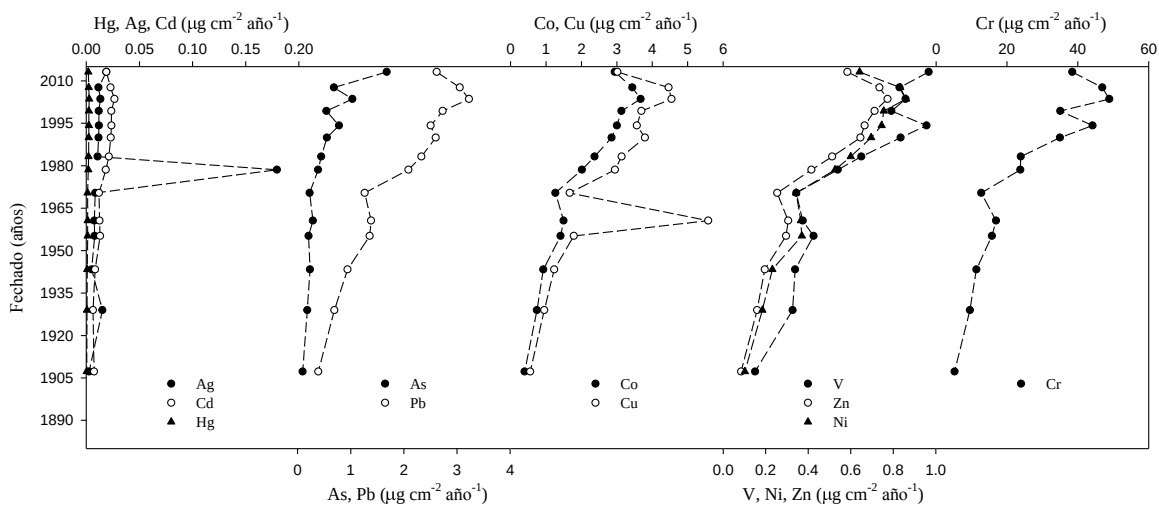


Figura 8.4.3c. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo LL1 de laguna El Llano.

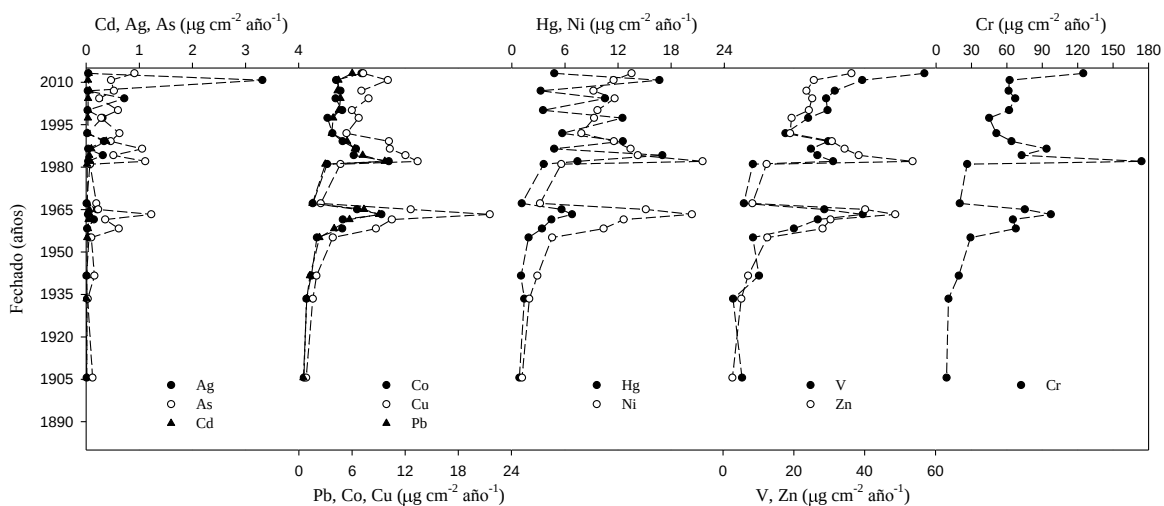


Figura 8.4.3d. Perfiles de flujos de elementos enriquecidos ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$) con respecto al tiempo en el núcleo LL2 de laguna El Llano.

9. DISCUSIÓN

9.1. Caracterización de ambientes sedimentarios

El núcleo SAI mostró un mayor contenido de material fino que SAI. Sin embargo, los núcleos de la laguna El Llano presentaron contenidos de arenas más elevados con respecto los de Laguna Salada.

Los valores de SM en ambos núcleos sugieren posibles cambios en la fuente de aporte de sedimento en el sitio. Los valores de SM en Laguna Salada indican un cambio en la mineralogía ya que los perfiles mostraron aumentos que permiten inferir un mayor contenido de compuestos ferromagnéticos en el sedimento a partir de 30 cm de profundidad y hacia la superficie en SAI, y a los 20 cm de profundidad en SAI. En los núcleos LL1 y LL2, los perfiles de SM no mostraron una tendencia de cambio específica. Sin embargo, los valores fueron mucho mayores (al menos el doble) que los encontrados en Laguna Salada, esto debido a que, por su tamaño de grano arenoso, está relacionada con minerales ferromagnéticos (Shoji et al., 1993). Los porcentajes de C_{org} fueron similares entre los cuatro núcleos a pesar de que los núcleos LL1 y LL2 resultaron más arenosos que SAI y SAI. Una de las posibles explicaciones sería la poca cantidad de materia orgánica que esté llegando a la zona. Además, comúnmente, la cantidad de C_{org} está directamente relacionada con el tamaño de grano; ya que, las partículas más finas del sedimento tienen mayor afinidad para atrapar C_{org} (Reible, 2014) como se ha visto en diversos estudios (Tue et al., 2012; Kumar y Patterson, 2009), razón por la cual, los mayores porcentajes de C_{org} se encontraron en las secciones donde predominó el tamaño de grano fino. Los valores de $\delta^{13}C$ típicos de carbono orgánico de origen marino son -22‰ a -20‰ (Meyers y Lallier, 1999); de origen costero de -26‰ a -18‰ (Thornton y McManus, 1994, Kuramoto y Minagawa, 2001) y de origen terrestre de -28‰ a -26‰ (Fontugne y Jouanneau, 1987; Boutton, 1991). Para $\delta^{15}N$, el intervalo característico de materia orgánica de origen costero va de 0‰ a 4‰ y de origen terrestre entre -5‰ a 18‰ (Maksymowska et al., 2000; Kuramoto y Minagawa, 2001). Los cuatro núcleos sedimentarios mostraron valores isotópicos de $\delta^{13}C$ característicos de materia orgánica de origen costero y marino. En Laguna Salada, ambos núcleos tienen perfiles de $\delta^{13}C$ que tienden tendencias generales de aumento desde la profundidad

(a partir de 1980) hacia la superficie, que indican la presencia de materia orgánica de origen marino (Figs. 8.3.1a y b). En el caso de $\delta^{15}\text{N}$, todos los núcleos presentaron valores típicos de carbono orgánico tanto de origen costero como de marino.

Asimismo, los valores de la proporción molar de C:N típicos de materia orgánica de origen terrestre son ≥ 20 , mientras que los característicos de algas marinas oscilan entre 4 y 10 (Meyers, 1994). La proporción C:N en los cuatro núcleos sedimentarios mostró una transición de valores terrígenos en las secciones más profundas hacia valores marinos en la superficie de los núcleos (Figs. 8.3.1a, b, c y d).

Los valores de tamaño de grano, $\delta^{13}\text{C}$ y C:N indican una acumulación de sedimento grueso con características costero-marinas.

Los porcentajes de CaCO_3 en casi todos los núcleos (excepto LL1) tendieron a disminuir hacia la superficie, lo cual indica una disminución de la cantidad de compuestos calcáreos en el sedimento. Posiblemente cese de la extracción de minerales calcáreos en la región minera Chiconquiaco (a inicios de 1900's cesó su producción), la cual, además de elementos metálicos, contaba con yacimientos de piedra caliza (SGM, 2014).

Los valores de las variables (C_{org} , N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, P_{tot} y bSi) que permitieron caracterizar el sedimento de los cuatro núcleos son comparables con los reportados en otros estudios de ecosistemas costeros del mundo (Tabla 9.1).

Tabla 9.1. Comparación entre las variables geoquímicas de sedimentos reportadas alrededor del mundo.

Localidad	C _{org} (%)	CaCO ₃ (%)	C:N	N (%)	δ ¹³ C (‰)	δ ¹⁵ N (‰)	P _{tot} (mg g ⁻¹)	bSi (%)	Referencia
Laguna Salada									
SAI	0.2 - 1.9	5.3 - 10.1	13.9-43.7	0.0 - 0.1	-21.7 a -17.2	-4.6 a +2.7	1.4 - 2.6	0.5 - 1.2	Este estudio
SAII	0.6 - 3.6	1.5 - 28.9	18.9-30.3	0.0 - 0.3	-22.9 a -15.2	-0.6 a +3.5	1.4 - 3.1	0.3 - 1.5	Este estudio
Laguna El Llano									
LL1	0.1-3.0	9.0-13.4	26.6-102.7	0.0-0.09	-26.9 a -22.4	-6.1 a -2.0	1.1-2.5	0.3-0.7	Este estudio
LL2	0.8-12.9	6.4-11.3	20.7-83.7	0.01-0.2	-25.5 a -22.7	-3.8 a +3.3	1.6-3.1	0.0-0.5	Este estudio
Laguna Cananeia, Brasil	0.3 - 7.5	n.d.	n.d.	0.0 - 0.5	-28.8 a -26.5	-0.4 a +5.0	0.1 - 0.8	n.d.	Sanders et al., 2010.
Sand Point, N. Carolina, E.U.	11.1 - 48.8	n.d.	11.1 - 42.3	n.d.	-28.2 a -21.8	n.d.	n.d.	n.d.	Kemp et al., 2010.
Rhode Island, E.U.	5.0 - 60.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Bricker-Urso et al., 1989.
Bahía San Francisco, E.U.	10.3 - 18.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Callaway et al., 2012.
Estuario Zhangjiang, China	0.6 - 1.5	n.d.	6.9 - 11.0	n.d.	-22.3 a -21.6	n.d.	n.d.	n.d.	Xue et al., 2009.
Estuario Culiacán, México	0.3 - 3.0	n.d.	7.8 - 17.3	0.0 - 0.3	-29.0 a -27.0	+5.0 a +7.0	0.5 - 3.5	n.d.	Ruiz-Fernández et al., 2002.
Laguna Shinji, Japón	1.0 - 3.0	n.d.	n.d.	0.1 - 0.4	n.d.	n.d.	0.5 - 1.8	n.d.	Yamamuro y Kanai, 2005.
Estuario Delaware, E.U.	0.7 - 4.6	n.d.	n.d.	0.0 - 0.2	-28.5 a -22.5	+4.1 a +7.3	0.1 - 1	n.d.	Church et al., 2006.
Estero Urías, México	11.0-18.0	n.d.	10.0 - 40.0	n.d.	-26.0 a -20.0	+4.0 a +8.0	n.d.	n.d.	Ruiz-Fernández et al., 2016.
Laguna de Términos, México	0.2 - 12	n.d.	n.d.	0.2 - 0.5	-28.0 a -26.0	-2.0 a +3.0	n.d.	n.d.	Gonneea et al., 2004.

9.2. Relación de las tasas de acreción sedimentaria (TAS) y el cambio del nivel del mar

Las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ en los cuatro núcleos fueron bajas, lo cual es común en las zonas tropicales debido a los patrones de vientos en esas latitudes (de Norte a Sur en invierno), donde los valores de ^{210}Pb más altos se encuentran durante el mes de enero (Llanos y Cervantes, 1995; Liu et al., 2001; Su y Huh, 2003; Baskaran, 2011). Sin embargo, las actividades de $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ fueron comparables con las reportadas en el estuario del río Coatzacoalcos, ubicado aproximadamente 400 km al sur de Laguna Salada (Rosalez-Hoz et al., 2003; Ruiz-Fernández et al., 2012), y con las actividades reportadas para un núcleo (EUII) de una marisma del Estero de Urías en Mazatlán, en la costa del Pacífico Nororiental Mexicano (Ruiz-Fernández et al., 2016).

Los valores de flujo atmosférico de ^{210}Pb calculados en este estudio están dentro del intervalo de flujo atmosférico de ^{210}Pb (entre 30 y 150 Bq m⁻² año⁻¹) estimados para intervalos de latitud similares (Appleby y Oldfield, 1992; Preiss et al., 1996) y con aquellos reportados en la zona del Caribe (Díaz-Asencio et al., 2009; 2011). La coincidencia entre los valores de flujos reportados para la zona y los obtenidos para los cuatro núcleos, sugieren que los inventarios de ^{210}Pb están completos y por lo tanto, es posible utilizarlos para el cálculo de edades correspondientes.

En Laguna Salada, las diferencias entre los valores de TAS observados en SAI y SAII podría deberse a que en 1981, cuando el canal de descarga de aguas de enfriamiento de la Central Nuclear Laguna Verde (CNLV) se abrió, en SAII (ubicado junto a la boca del canal) la energía hidrodinámica en la zona de descarga de agua de enfriamiento se incrementó y por tanto, el depósito de partículas disminuyó, mientras que en la zona de SAI (más alejado del canal) existen condiciones de calma que favorece la acumulación de sedimentos (Jia et al., 2014). Asimismo, tanto el fechado como las variaciones en algunos parámetros sedimentológicos y geoquímicos (especialmente las variaciones de tamaño de grano) mostraron claramente 2 periodos importantes relacionados con CNLV: a) la apertura del canal de descarga de agua de enfriamiento (1981), la cual provocó un

incremento en el contenido de arenas en SAI, y b) el inicio su operación a partir de 1990, reflejada en el aumento del contenido de arenas en el núcleo SAI.

En la laguna El Llano se observó que la tasa de acreción media en LL1 es menor con respecto a todos los demás núcleos, esto probablemente se deba a la ubicación del núcleo, ya que se encuentra en una zona de marisma más alejada de la orilla de la laguna, a diferencia de la ubicación de LL2, que se encontró en una marisma junto a la laguna. Esta lejanía, en términos de sedimentación, implica que la cantidad de sedimento que llegue LL1 sea mucho menor, posiblemente debido a que en ese sitio, la acreción dependa más de procesos eólicos o de precipitación, que debido al material sedimentario transportado por mareas.

Los resultados de tasas de acreción de este estudio son comparables con los reportados en otras zonas de marismas por Ruiz-Fernández et al. (2016) y Carnero-Bravo et al. (2016) para la zona del Pacífico y Península de Yucatán, respectivamente, y en todos se refleja un aumento del nivel del mar para inicios de 1990's.

9.3. Registro de cambio del nivel del mar desde el año 1900 hasta 2013

En la tabla 9.3 se muestran estudios de cambio del nivel del mar en la zona del Golfo de México (GM) por métodos de acreción sedimentaria y registros mareográficos.

Las tasas medias de acreción obtenidas en este estudio coinciden con los valores de ritmos de acreción reportados para otras zonas del GM que no tienen influencia directa de ríos (Lynch et al., 1989; Bricker-Urso et al., 1989, Smoak et al., 2013). Sin embargo la mayor cantidad de información existente acerca de cambios en el nivel del mar es a través de registros de mareas. Cabe resaltar que los estudios de acreción sedimentaria para evaluar cambios en el nivel del mar deben ser llevados a cabo en zonas influenciadas por mareas y con el menor aporte de material continental posible, ya que los resultados de variaciones del nivel del mar pueden ser sobreestimados, por ejemplo, ritmos de acreción $>20 \text{ mm año}^{-1}$ sobre la desembocadura del río Mississippi, el cual aporta grandes cantidades de sedimento vía fluvial que puede enmascarar los valores propios de acreción por mareas

(Delaune et al., 1996); o procesos de subsidencia por extracción de petróleo que provoquen desaceleración del nivel del mar (Simms et al., 2013).

En la zona norte del GM (perteneciente a Estados Unidos), se tienen registros mareográficos de hasta 90 años, y todas las estaciones mareográficas pertenecientes a esa zona van de acuerdo a la tasa de cambio del nivel del mar global propuesta por el IPCC (3.2 mm año^{-1} ; 2013), a excepción de la costa de Texas, cuyos valores son hasta dos veces mayores a la tasa de aumento global. En la parte oeste y sur del GM (correspondiente a México), los registros de mareas también coinciden con la tasa de aumento global (Zervas, 2009; Zavala-Hidalgo et al., 2010). Asimismo, las tasas de acreción medias obtenidas en este estudio coinciden con la tasa de aumento del nivel del mar global estimada por Church y White (2011) a partir de registros mareográficos (2.8 mm año^{-1}), y es comparable con la tasa media global reportada por IPCC en 2013.

Tabla 9.3. Estudios sobre evidencia de cambio del nivel del mar en la zona del Golfo de México.

Localidad	Métodos	Resultados	Relevancia	Procesos	Referencia
Laguna de Términos, Campeche	^{210}Pb y ^{137}Cs	Tasa de acreción entre 1.0 y 2.9 mm año^{-1}	Estudio en sitios influenciados por agua dulce y salada	Ritmos de acreción de marismas inundadas con agua salada coincidieron con los registros de mareas	Lynch et al., 1989.
Marismas en Louisiana	^{137}Cs	Tasas de acreción hasta 20 mm año^{-1} .	No existe equilibrio entre la acreción y el nivel del mar	Erosión del delta del río Mississippi	Delaune et al., 1996.
Bahía de Galveston, Texas	Diferencia de elevación	Tasa de desaceleración $0.03\text{-}0.09 \text{ mm año}^{-1}$	Desaceleración menor a la tasa de subsidencia de la placa tectónica	Subsidencia	Simms et al., 2013.
Manglar en Everglades, Florida	^{210}Pb	Tasa de acreción entre 3.3 y 5.9 mm año^{-1} entre 1924 y 2009	Tasas de acreción de acuerdo al nivel del mar	Huracanes depositan grandes cantidades de sedimento	Smoak et al., 2013.
Marismas en Texas	^{210}Pb y ^{137}Cs	Ritmos de acreción entre 1.8 y 2.6 mm año^{-1}	Resultados de acuerdo al cambio del nivel del mar	-----	Bianchi et al., 2013.

Key West, Florida	Mareas	Tasa de cambio media de 2.2 mm año ⁻¹	Periodo de 1913-2006	-----	Zervas, 2009.
Cedar Kay, Florida	Mareas	Tasa de cambio media de 1.8 mm año ⁻¹	Periodo de 1914-2006	-----	Zervas, 2009.
Pensacola, Florida	Mareas	Tasa de cambio media de 2.1 mm año ⁻¹	Periodo de 1923-2006	-----	Zervas, 2009.
Grand Isle, Louisiana	Mareas	Tasa de cambio media de 9.2 mm año ⁻¹	Periodo de 1947-2006	Acumulación de sedimento en la plataforma continental	Zervas, 2009.
Galveston Pier 21, Texas	Mareas	Tasa de cambio media de 6.3 mm año ⁻¹	Periodo de 1908-2006	Subsidencia	Zervas, 2009.
Rockport, Texas	Mareas	Tasa de cambio media de 5.1 mm año ⁻¹	Periodo de 1948-2006	Subsidencia	Zervas, 2009.
Port Isabel, Texas	Mareas	Tasa de cambio media de 3.6 mm año ⁻¹	Periodo de 1944-2006	-----	Zervas, 2009.
Tuxpan, Veracruz	Mareas	Tasa de cambio media de 2.8 mm año ⁻¹	Periodo de 1958-1988	-----	Zavala- Hidalgo et al., 2010.
Veracruz, Veracruz	Mareas	Tasa de cambio media de 1.9 mm año ⁻¹	Periodo de 1952-2003	-----	Zavala- Hidalgo et al., 2010.
Coatzacoalcos, Veracruz	Mareas	Tasa de cambio media de 2.9 mm año ⁻¹	Periodo de 1952-1988	-----	Zavala- Hidalgo et al., 2010.
Cd. del Carmen, Campeche	Mareas	Tasa de cambio media de 3.4 mm año ⁻¹	Periodo de 1956-1990	-----	Zavala- Hidalgo et al., 2010.
Progreso, Yucatán	Mareas	Tasa de cambio media de 2.4 mm año ⁻¹	Periodo de 1952-1984	-----	Zavala- Hidalgo et al., 2010.
Laguna Salada, Veracruz	²¹⁰ Pb	Tasa de acreción media entre 2.6 y 3.5 mm año ⁻¹	Periodo de 1900-2013	-----	Este Estudio
El Llano, Veracruz	²¹⁰ Pb	Tasas de acreción media entre 1.4 a 3.1 mm año ⁻¹	Periodo de 1900-2013	-----	Este Estudio

9.4. Concentraciones de elementos mayores y traza, y la influencia de la Central Nuclear Laguna Verde

Las concentraciones más elevadas de Ca en los sedimentos de El Llano y la predominancia de arenas en los perfiles de tamaño de grano pueden indicar que el material arenoso en esa laguna es de tipo calcáreo.

De acuerdo a la tabla 9.4, las concentraciones de elementos traza en los núcleos de Laguna Salada son comparables con las encontradas por Orescanin et al. (2004), donde no hubo reflejo de contaminación a causa de la planta nuclear Krsko (localizada entre Eslovenia y Croacia). Asimismo, los resultados de este estudio fueron comparables con los encontrados por Gu y colaboradores (2012) para la costa de Guangdong en China, aun cuando en dicho estudio se hayan reportado como concentraciones elevadas, sin embargo, las más altas concentraciones de Hg, Ni, Pb y Sr se encontraron en los sitios de muestreo cercanos a las plantas de energía nuclear (Lingao y Baya Bay).

Las concentraciones de Cu, Hg, Pb y Zn reportadas en Serbia y Montenegro fueron mayores que las encontradas en este estudio, sin embargo, esos valores altos no resultaron ser influenciados por la industria nuclear de la zona (Dalmacija et al., 2006). Finalmente, en la zona cercana a la planta nuclear Konin, en Polonia, se reportó contaminación por Cu (cuyos valores fueron mucho mayores a los encontrados en Laguna Salada) asociada a la composición de las tuberías a través de las cuales se descargan las aguas de enfriamiento de la planta (Bojakowska y Krasuska, 2014). Si bien no son numerosos los estudios realizados específicamente en sedimentos aledaños a centrales de generación de energía nuclear, existen otros que evaluaron elementos traza en distintas matrices. El estudio hecho por Shahabuddin y colaboradores (2010) en el que se evalúan elementos traza en muestras de suelo alrededor del reactor nuclear TRIGA MARK II, en Savar, Bangladesh. Los resultados mostraron concentraciones más elevadas a las del promedio mundial de U, K, Sm, Sc, Al, Na, Yb. Sin embargo, hubo variaciones en las concentraciones dependiendo de la ubicación de la muestra, solamente el K mostró concentraciones elevadas en todos los sitios de muestreo. Otro ejemplo es el estudio de 42 elementos traza en *Pleurozium schreberi*, realizado por Thinova y colaboradores (2014) en el área circundante a la planta nuclear Temelin, República Checa. Los resultados no mostraron contaminación por elementos traza ni de radionúclidos provenientes de la planta nuclear.

Tabla 9.4. Estudios sobre evaluaciones de elementos traza en zonas cercanas a plantas de energía nuclear alrededor del mundo.

Localidad	Matriz	Concentración del elemento (mg kg ⁻¹)											Referencia
		As	Cd	Cr	Cu	Ba	Hg	Ni	Pb	Sr	V	Zn	
SAI (Golfo de México)	Sedimento	1.6-6.3	0.1-0.3	96.7-189.0	49.4-103.0	n.r.	0.0-0.1	46.9-92.9	11.9-17.2	181.0-338.0	62.0-165.0	75.9-133.0	Este estudio
SAII (Golfo de México)	Sedimento	1.4-15.6	0.1-0.6	52.5-165.0	21.2-90.9	n.r.	0.0-0.0	27.4-85.8	8.2-19.7	171.0-331.0	70.0-232.0	52.4-143.0	Este estudio
Lago Gniezno, Polonia *	Sedimento	n.r.	n.r.	n.r.	385.0	309.0	0.2	n.r.	20.0	613.0	n.r.	129.0	Bojakowska y Krasuska, 2014
Canal Begej, Serbia y Montenegro	Sedimento	n.r.	0.9-66.0	50.0-800.0	42.0-940.0	n.r.	0.2-1.1	30.0-100.0	28.0-680.0	n.r.	n.r.	100.0-1770.0	Dalmacija et al., 2006
Costa de Guangdong, China	Sedimento	n.r.	n.r.	n.r.	5.0-64.7	n.r.	0.0-0.2	16.0-33.9	18.1-40.7	64.6-399.0	n.r.	46.1-85.1	Gu et al., 2012
Río Sava, Eslovenia y Croacia	Sedimento	n.r.	n.r.	58.0-122.0	20.0-57.0	n.r.	n.r.	n.r.	6.4-12.9	82.8-157.0	n.r.	55.0-249.0	Orescanin et al., 2004
Savar, Bangladesh	Suelo	1.6-7.1	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	49.7-120.7	n.r.	Shahabuddin et al., 2010
República Checa	Plantas	n.r.	0.1-0.4	n.r.	n.r.	n.r.	0.2-5.6	n.r.	n.r.	6.0-22.0	n.r.	26.0-70.0	Thinova et al., 2014

n.r. no reportado

* Valores promedio

9.4.1. Influencia de actividad minera en la zona

Para Laguna Salada, los resultados de la normalización con Aluminio mostraron tendencias de elementos traza similares entre ambos núcleos, reflejando una composición geoquímica similar. Desde 2013 hasta donde terminó el fechado (22 cm de profundidad aproximadamente) no se observaron incrementos en las concentraciones de los elementos (Figs. 9.4.1a y b), dicho periodo abarcó la construcción de la CNLV. Sin embargo, en la sección intermedia (a partir de 20 cm de profundidad) se observaron incrementos de Ag, As, Cd, Cu y V (los cuales resultaron enriquecidos de acuerdo a los FENs). Dichos incrementos corresponden a periodos más antiguos de 1900's, los cuales no fueron posibles de fechar a través de método de ^{210}Pb , no obstante, podrían estar relacionados con la actividad minera de la región Chiconquiaco, la cual fue descubierta en el siglo XVII y cuyo máximo periodo de explotación fue entre 1800's y 1900's (SGM, 2014). Los demás elementos (Co, Cr, Ni, Zn) mostraron perfiles constantes a lo largo del núcleo, lo que indica que su procedencia puede ser litogénica.

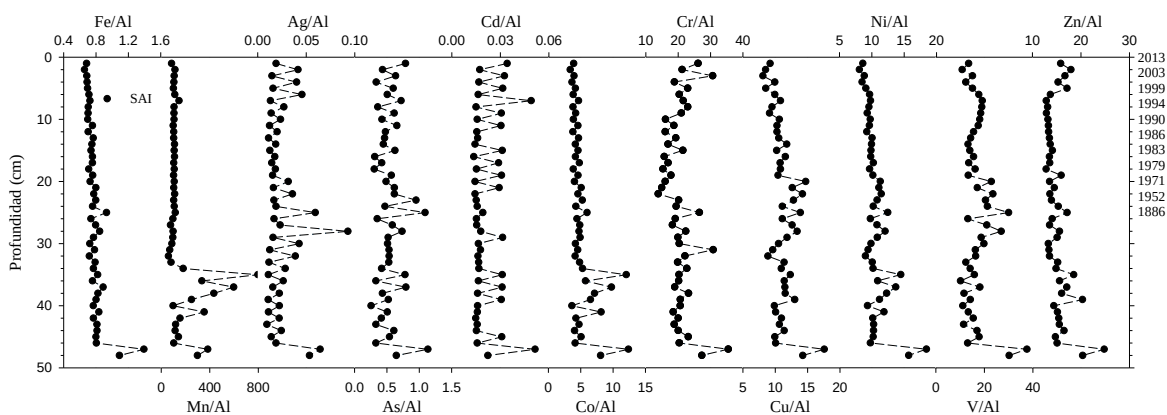


Figura 9.4.1a. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo SAI de laguna Salada.

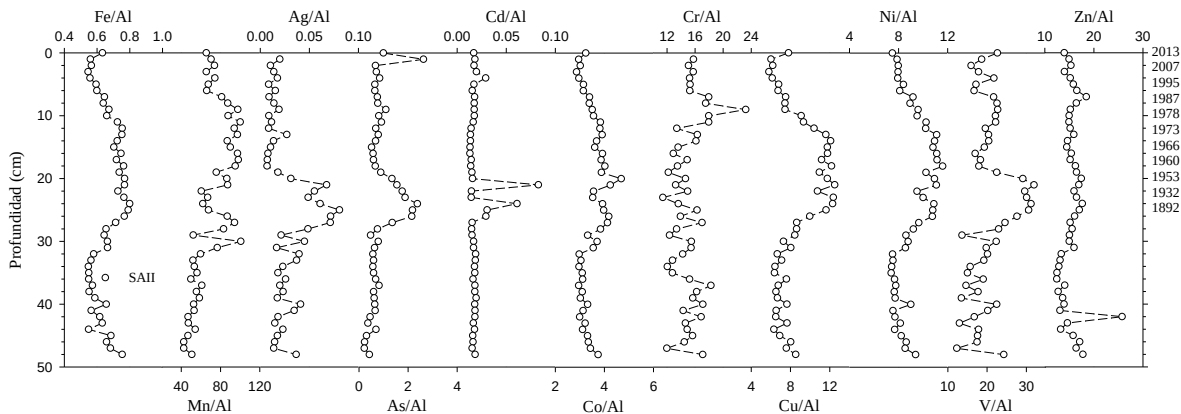


Figura 9.4.1b. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo SAIL de laguna Salada.

Para el caso de El Llano, a excepción de los picos observados para Ag, Cd, y Cu, el perfil de V mostró incrementos periódicos a lo largo del perfil, y durante el periodo fechado se observaron incrementos en 1929 y en 2013 para LL1 (Fig. 9.4.1c) y en 1942 y 2011 para LL2 (Fig. 9.4.1d).

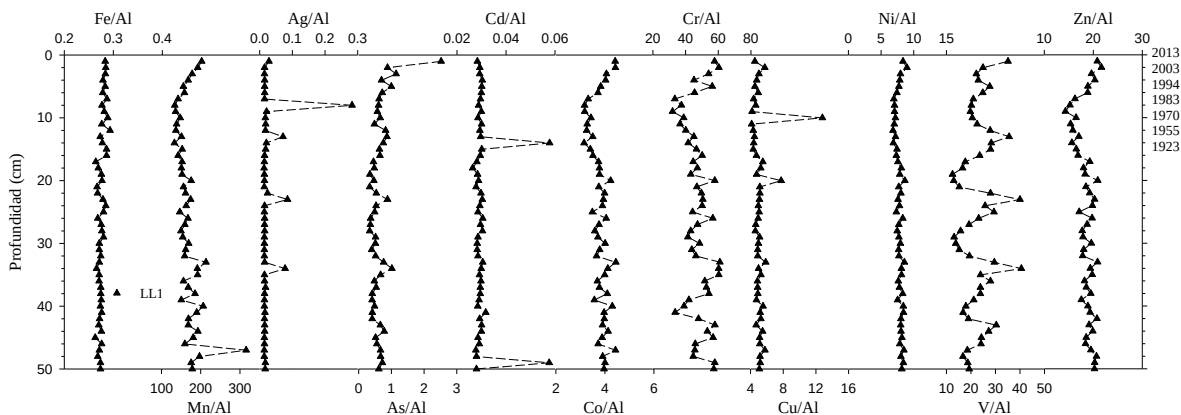


Figura 9.4.1c. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo LL1 de laguna El Llano.

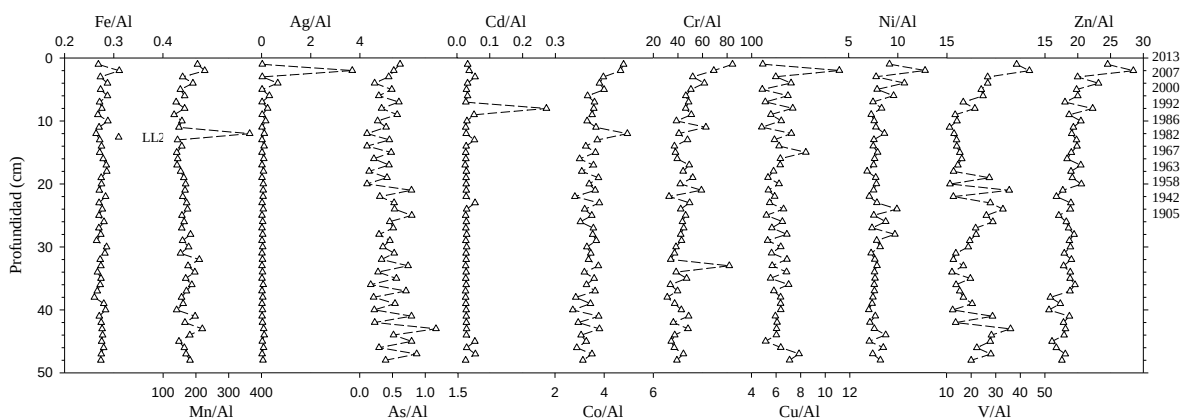


Figura 9.4.1d. Perfiles de la proporción de elementos enriquecidos/Al con respecto a la profundidad (cm) y la edad (años) en el núcleo LL2 de laguna El Llano.

Este estudio no cuenta con mediciones del Eh de los núcleos sedimentarios analizados, para poder corroborar el estado redox de los sedimentos; sin embargo, el perfil de concentración de Mn (el cual no resultó enriquecido) en el núcleo SAI parecen estar influenciados por la diagénesis ya que muestra incrementos significativos en las secciones más profundas (30-48 cm); así como otros elementos redox sensibles Co, Cu, Ni y Zn (Fig. 9.4.1a). Chester y Jickells (2012) hacen referencia a la relación Mn:Ni como un posible indicador de procesos diagenéticos. En este estudio, la relación Mn:Ni fue 0.69 para SAI y 0.84 para SAI, ambos casos con correlaciones significativas ($p < 0.001$). Además, en SAI, las correlaciones entre Mn y los demás elementos redox sensibles fue 0.93 para Co ($p < 0.001$), 0.52 para Zn ($p < 0.001$) y 0.40 para Fe ($p = 0.03$), todas significativas. De acuerdo con esas correlaciones, en la sección más profunda de SAI estén ocurriendo procesos diagenéticos, como se ha observado en otros casos (Zwolsman y Van Eck, 1993; Spencer et al., 2003). Sin embargo, de acuerdo con Salomon y Förstner (1984) y Chester y Jickells (2012), se necesitan más estudios para corroborar la existencia de procesos diagenéticos. Por otro lado, aunque hubo correlación significativa entre Mn y Ni en SAI, se observaron incrementos en los perfiles de los elementos redox sensibles (Fe, Mn, Co, Cu, Ni y Zn) normalizados con Al (Fig. 9.4.1b).

Para los núcleos LL1 y LL2, no se observaron tendencias de posibles procesos diagenéticos en los perfiles de los elementos redox sensibles con respecto a la profundidad (Figuras 9.4.1c y 9.4.1d)

9.4.2. Flujos de elementos

A pesar de que Hg y Pb no resultaron enriquecidos en los sedimentos, fueron considerados en los cálculos debido a su importancia en estudios ambientales así como para fines comparativos, por ejemplo, el estudio de flujos de Hg y Pb en la Bahía de San Francisco (Hornberger et al., 1999).

En Laguna Salada, el estudio de los flujos permitió ver los efectos de la construcción de la CNLV y su influencia en el aporte de elementos a la laguna. En SAI, los flujos de Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, V y Zn tienen una tendencia general a incrementar desde 1890 hasta el año 2000, después de ese periodo, los flujos empiezan a disminuir hacia años recientes (Fig. 9.4.2a).

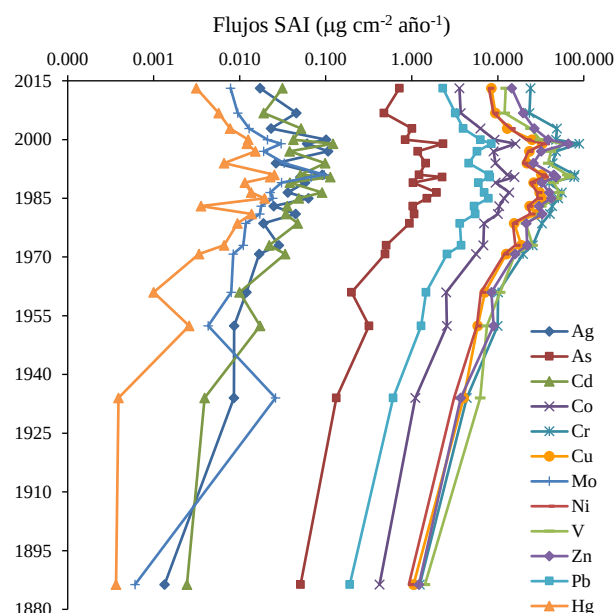


Figura 9.4.2a. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo SAI de laguna Salada.

En el núcleo SAI los flujos tienden a incrementar hasta 1970, posteriormente, casi todos los flujos disminuyen hacia años recientes (Fig. 9.4.2b). La diferencia

entre las tendencias de los flujos observadas en los núcleos de Laguna Salada puede ser resultado de los diferentes procesos sedimentarios que ocurren en cada núcleo. En SAI, la disminución de los flujos es evidente a partir de que la CNLV entró en operación, mientras que en SAI fue a partir de que inició la construcción. El cambio en los aportes de flujos de elementos puede deberse a que una vez que la CNLV fue construida y entró en funcionamiento, el canal de descarga de agua que conecta a Laguna Salada con el mar, permitió una columna de agua constante en la laguna, disminuyendo así la cantidad de elementos en SAI por procesos eólicos o de escorrentías, mientras que en SAI, los flujos permanecieron constantes hasta la sección subsuperficial.

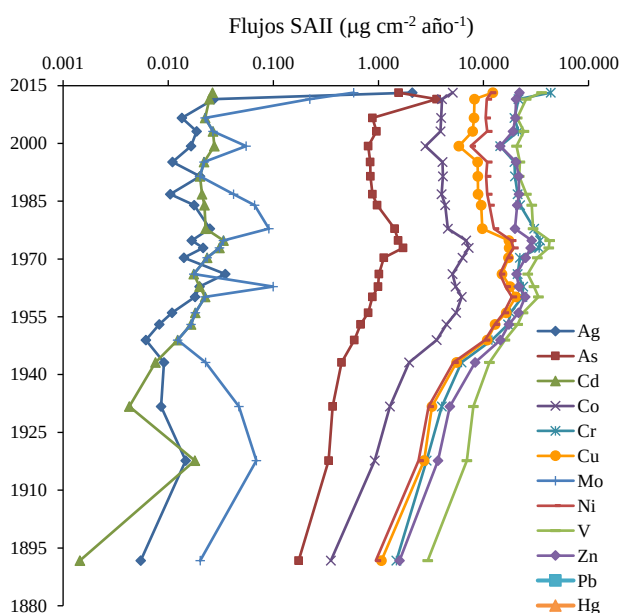


Figura 9.4.2b. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo SAI de laguna Salada.

En el núcleo LL1, los flujos presentaron una tendencia general de aumentar hacia años recientes. El flujo de Ag, mostró tres incrementos mediante pulsos de $0.02 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en 1929, $0.18 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en 1979 y de $0.02 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en 2013. En el caso del Cu solamente se observó un incremento en 1961 de $5.58 \mu\text{g cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Fig. 9.4.2c).

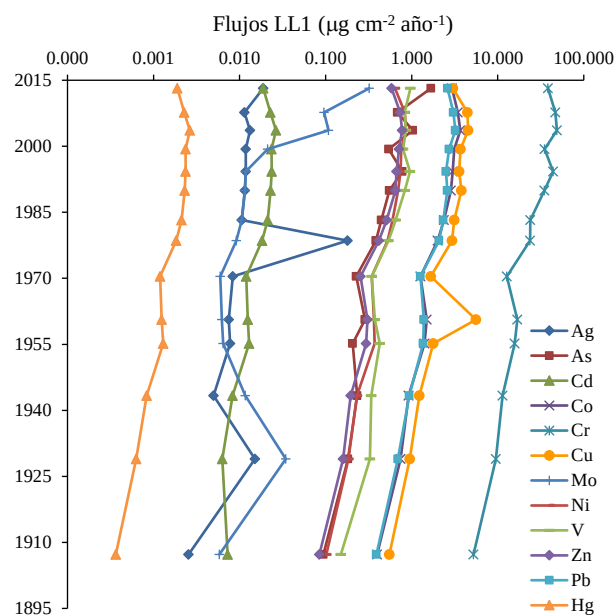


Figura 9.4.2c. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo LL1 de laguna El Llano.

En el núcleo LL2, los flujos tuvieron una tendencia similar al núcleo LL1, sin embargo, todos los elementos presentaron una disminución de sus flujos entre 1967 y 1980, posteriormente se vuelven a incrementar hasta 2013 (Fig. 9.4.2d). Dicho decremento puede ser debido a la disminución en la TAM de dicho sitio (Fig. 8.2.5b).

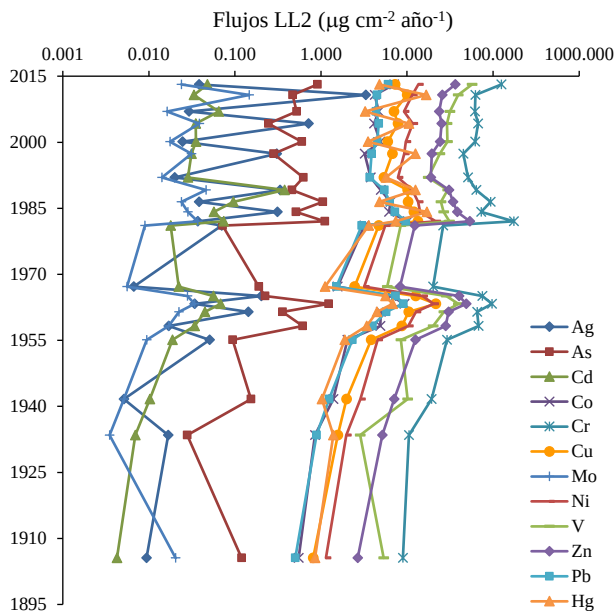


Figura 9.4.2d. Reconstrucción histórica de los flujos de elementos enriquecidos en el núcleo LL2 de laguna El Llano.

Las concentraciones de Hg en los cuatro núcleos fueron más bajas que las encontradas para la corteza superior (56 ng g^{-1} ; Wedepohl, 1995), y en algunos núcleos los perfiles de Hg fueron constantes. Considerando lo anterior, los flujos de Hg serán un reflejo directo de las variaciones de TAM.

Los estudios de flujos de elementos en núcleos sedimentarios de ecosistemas costeros han permitido documentar la historia del desarrollo de actividades económicas alejadas. Por ejemplo, los efectos de la expansión industrial e incremento de la población en el estuario del río Perla, China (Ip et al., 2004); evidencia de actividades agrícolas alrededor de la laguna de Ohuira, Sinaloa, México (Ruiz-Fernández et al., 2009); actividades relacionadas con la industria del petróleo en la zona del Golfo de Tehuantepec, México (Ruiz-Fernández et al., 2004). Asimismo, se han documentado diversas actividades antropogénicas reflejadas en incrementos de flujos de Cr, Cu, Ni y Pb en la laguna de Venecia, Italia (Frignani et al., 1997), Hg y Pb en La Habana, Cuba (Díaz-Asencio et al., 2011), Co, Cu, Ni, Pb, V y Zn en bahía Guanabara, Brasil (Monteiro et al., 2011). Algunos de esos estudios tienen valores de flujos de más de dos órdenes de magnitud mayores a los que se reportan en este estudio, lo cual puede ser explicado por las diferencias en los procesos de sedimentación, considerando que la mayoría de esos estudios reciben sedimento a través de la descarga de ríos, a diferencia de las lagunas evaluadas en este estudio, las cuales no tienen influencia de ríos. A pesar de que en Laguna Salada, la CNLV está localizada muy cerca de los sitios de muestreo, no hubo evidencia de contaminación de elementos debido a las descargas de la planta, por lo tanto, las variaciones observadas en los flujos de ambas lagunas se debe a actividad eólica (especialmente los nortes), escorrentías y a la acreción sedimentaria resultado de las mareas.

9.5. Análisis estadísticos

9.5.1. Correlación de Pearson

Los coeficientes de correlación de Pearson de las variables geoquímicas y los elementos traza que resultaron enriquecidos de los cuatro núcleos sedimentarios se muestran en los anexos 12.4 al 12.7.

A continuación se describirán solamente las correlaciones entre el tamaño de grano fino y los elementos enriquecidos, las demás se pueden observar en los anexos mencionados. Todas las correlaciones presentadas fueron significativas $p(<0.05)$ y con $n=48$ en SAI, $n=48$ en SAII, $n=50$ en LL1 y $n=48$ en LL2.

En el núcleo SAI (anexo 12.4), el C_{org} , Co y Ni se correlacionaron directamente con las arcillas, con valores de r : 0.53, 0.37 y 0.39, respectivamente. Los limos se correlacionaron directamente con C_{org} (0.41), Cu (0.46) y Ni (0.40) y las arcillas (0.71), e indirectamente con el contenido de Cr (-0.46).

En SAII (anexo 12.5), las arcillas se correlacionaron directamente con C_{org} (0.46), Ag (0.31), As (0.32), Co (0.75), Cr (0.32), Cu (0.78), Ni (0.77), V (0.57), Zn (0.58); mientras que los limos se correlacionaron Ag (0.43), As (0.46), Cd (0.36), Co (0.74), Cr (0.32), Cu (0.76), Ni (0.75), V (0.67) y Zn (0.58).

En la Laguna El Llano hubo menor número de correlaciones significativas, por ejemplo, Co, Ni y Zn coinciden con correlaciones positivas con limos y arcillas para el LL1 (anexo 12.6), mientras en LL2, solo el As se correlacionó directamente con los limos, y Co, Cr, Zn indirectamente con las arcillas (anexo 12.7).

9.5.2. Análisis de componentes principales

En este estudio, el Análisis de Componentes Principales (ACP) se realizó con los elementos que resultaron enriquecidos con respecto a la corteza terrestre.

En Laguna Salada, el ACP en SAI mostró tres factores explican el 60.4% de la varianza total. El factor 1 (representa el 23.8% de la varianza total) agrupa variables que se asocian al tamaño de grano y C_{org} , correlacionando positivamente a limos (0.82), arcillas (0.71) y C_{org} (0.77), mientras que el contenido de arenas de manera negativa (-0.86). El factor 2 (representa 19.8% de la varianza total) y agrupa positivamente a Co (0.90) y Mn (0.85). El factor 3 (16.8% de la varianza total)

solamente estuvo representado por la SM (0.74). Los factores resultantes del ACP en SAI resultaron con varianzas bajas, y en general, los factores estuvieron representados por pocas variables. Sin embargo, es evidente que el contenido de C_{org} es aportado junto con las partículas finas de sedimento, demostrado la afinidad entre los compuestos orgánicos y el sedimento fino, como ya se ha demostrado en otros estudios (Burone et al., 2003; Li y Pang, 2014). En el segundo factor podemos ver la asociación entre el Co y Mn, lo cual podría indicar que la fuente de Co sea litogénica, ya que el Mn es uno de los compuestos más abundantes que representa a los oxihidróxidos de Mn de la corteza terrestre (Tessier et al., 1985; Zaaboub et al., 2015). El tercer factor estuvo representado solamente por las variaciones de SM, que en el caso de SAI, el perfil SM presentó un cambio muy drástico, como se describió anteriormente (Fig. 8.1.1a).

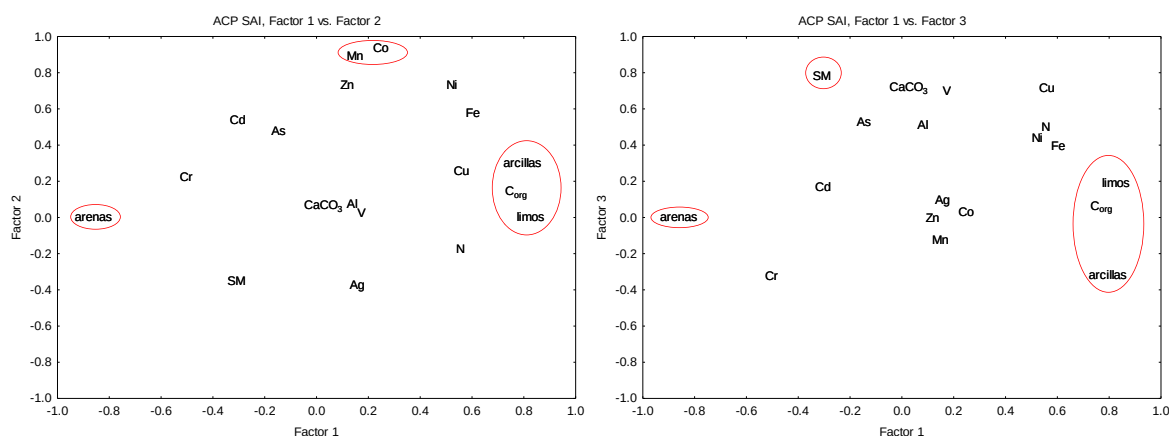


Figura 9.5a. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 60.4% de la varianza total en el núcleo SAI de laguna Salada.

En SAI, tres factores explicaron el 79% de la varianza total (Fig. 9.5b). El factor 1 (explica el 44.3% de la varianza total) correlacionó positivamente a variables que representan procedencia litogénica como limos (0.78), arcillas (0.82), Al (0.90), Co (0.92), Cu (0.90), Fe (0.93), Mn (0.82), Ni (0.95), Zn (0.78), y negativamente a las arenas (-0.80). El factor 2 (24.7% de la varianza total) representa la asociación de elementos con el C_{org} en los sedimentos y correlacionó positivamente al contenido de C_{org} (0.89), N (0.86), Ag (0.85), As (0.82), Cd (0.70) y V (0.72).

Finalmente, el factor 3 explica el 10% de la varianza total y es representado por positivamente por la SM (0.85) y negativamente por el contenido de CaCO_3 (-0.73).

En SAII los factores resultantes del ACP mostraron porcentajes de varianza mayor que los de SAI, lo cual muestra una mejor asociación entre las variables en este sitio. El primer factor mostró que los elementos: Co, Cu, Fe, Mn, Ni y Zn están asociados a las partículas finas del sedimento y además, que su procedencia es litogénica ya que estuvieron correlacionados directamente con Aluminio. Estos elementos pueden estar siendo aportados por la región minera Chiconquiaco, ya que es la fuente litogénica más cercana al sitio, y en la que se extrajeron diversos elementos que pudieron ser arrastrados hasta ese sitio. La relación entre las variables del factor 1 en SAII, es una asociación comúnmente encontrada ya que las partículas como limos y arcillas tienen mayor superficie de contacto que el sedimento grueso y poseen afinidad para atrapar metales (Horowitz, 1985; Yao et al., 2015). El factor 2 mostró que la mayor parte de Ag, As y Cd y V están siendo aportados al sedimento principalmente a través de la materia orgánica. Dado que la materia orgánica que está siendo aportada al sitio es principalmente de origen marino, esta asociación puede indicar que una parte de esos elementos estaría siendo aportada desde la zona costera. Se ha encontrado enriquecimiento de As y Cr en la zona costera de Veracruz (Celis-Hernández et al., 2013).

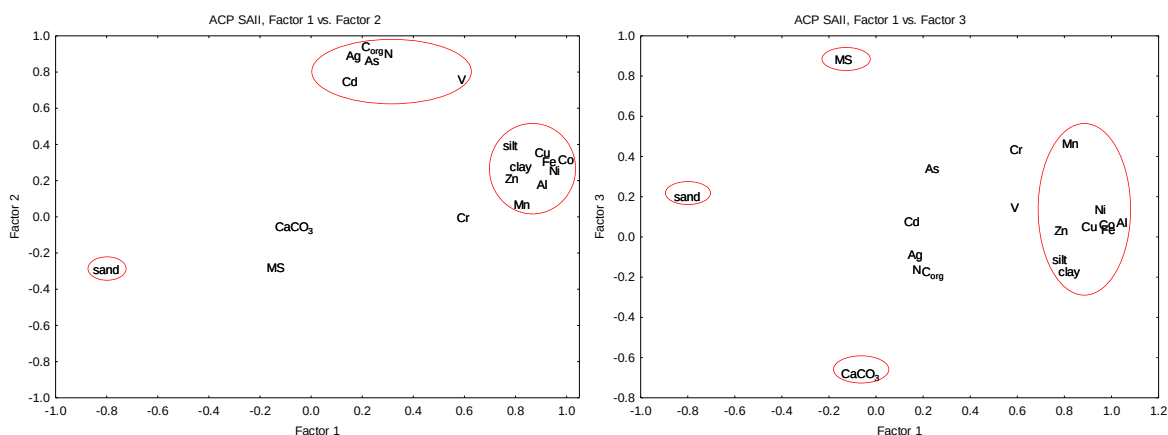


Figura 9.5b. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 79% de la varianza total en el núcleo SAII de laguna Salada.

Para el caso de la Laguna El Llano, ambos núcleos presentaron factores que tienen porcentajes de varianza bajos, es decir, no hubo muchas asociaciones significativas entre las variables. El núcleo LL1 presentó 3 factores que explican el 57.5% de la varianza total (Fig. 9.5c). El factor 1 (representa el 29.2% de la varianza total) agrupa variables que se asocian al aporte litogénico, correlacionando positivamente a Co (0.95), Cr (0.80), Ni (0.90), Zn (0.93), Fe (0.94) y Mn (0.71). El factor 2 (17.1% de la varianza) representa el tamaño de grano ya que correlaciona positivamente a limos (0.90) y arcillas (0.93) y negativamente a las arenas (-0.92). El factor 3 (11.2% de la varianza) está representado por el material orgánico, y correlaciona el contenido de C_{org} (0.67) y N (0.74). El primer factor muestra como los elementos como Co, Cu, Ni y Zn están siendo aportados al sedimento via litogénica a través de su asociación con los oxihidróxidos de Fe y Mn, debido a la afinidad que tienen esos compuestos de adsorber metales (Tribovillard et al., 2006). El segundo factor solamente nos representa las variaciones de tamaño de grano, mientras que el tercero el aporte de material orgánica.

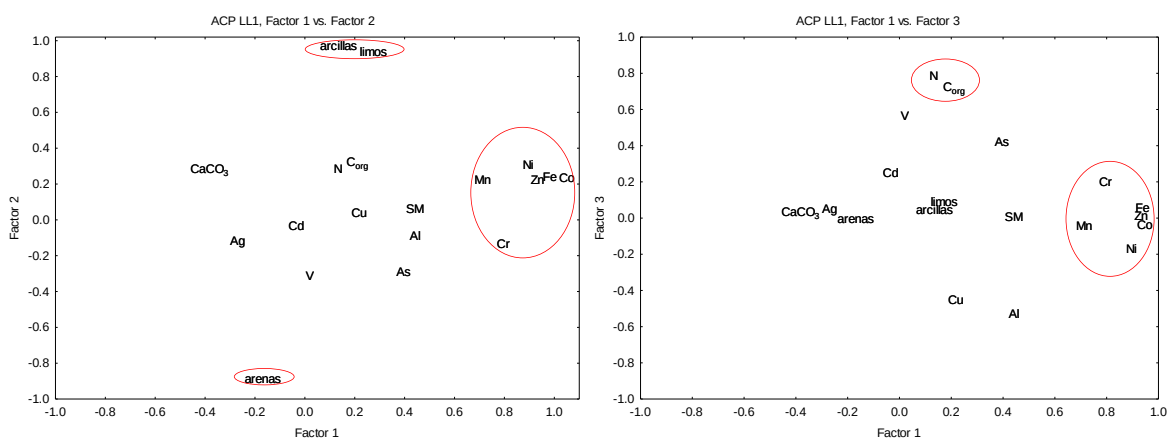


Figura 9.5c. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 57.5% de la varianza total en el núcleo LL1 de laguna El Llano.

El núcleo LL2 presentó 3 factores que explican el 55% de la varianza total (Fig. 9.5d). El factor 1 (representa el 20% de la varianza total) representa las variaciones de tamaño de grano correlacionando positivamente a limos (0.86) y arcillas (0.86), y negativamente a las arenas (-0.95). El factor 2 (representa el 18%

de la varianza total) correlaciona positivamente al Cr (0.76), Co (0.85) y Fe (0.83), los cuales podrían representar aporte litogénico. El factor 3 (17% de la varianza) representa el aporte de material orgánico al sedimento, ya que correlaciona directamente a C_{org} (0.75), N (0.78) y Ag (0.69).

Los resultados del ACP de LL2 fueron similares al LL1 pero en distinto orden. El primer explica las variaciones de tamaño de grano, mientras que el segundo agrupó a Cr y Co con Fe, probablemente, al igual que en el núcleo LL1, estén siendo introducidos por vía litogénica. El tercer factor indica que el aporte de Ag en el sitio es a través de su asociación con los componentes orgánicos del sedimento.

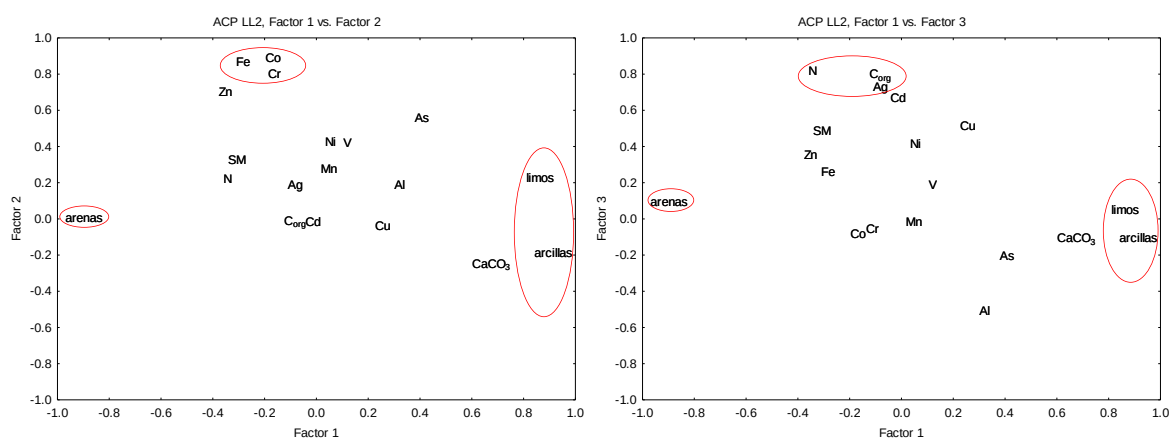


Figura 9.5d. Análisis de componentes principales (ACP) representado por 3 factores que explican el 55% de la varianza total en el núcleo LL2 de laguna El Llano.

Una de las posibles explicaciones en las variaciones de tamaño de grano en los resultados del ACP de los cuatro núcleos puede ser las condiciones hidrodinámicas de cada laguna, ya que SAI y LL2 se encuentran ubicados junto a los canales de salida de cada laguna, mientras que SAI y LL1 se localizaron tierra adentro. La energía hidrodinámica en los núcleos cercanos al canal permitirá la sedimentación de granos gruesos en vez de partículas finas (limos y arcillas).

10. CONCLUSIONES

10.1.- La caracterización de los cuatro núcleos sedimentarios permitió observar procesos de transición de condiciones costeras (con mayor influencia terrígena) en las secciones profundas hacia condiciones (con mayor influencia marina) en las capas recientes.

10.2.- En laguna Salada, las tasas de acreción media para todo el periodo fechado fueron 3.5 ± 0.6 y 2.6 ± 0.2 mm año⁻¹ para SAI y SAII, respectivamente; mientras que para El Llano fueron 1.4 ± 0.2 y 3.1 ± 1.1 mm año⁻¹. Para LL1 y LL2, respectivamente.

10.3.- Este estudio completa registros de cambios de nivel del mar superiores a 100 años para ambas lagunas, los cuales fueron comparables la tasa media de aumento del nivel del mar (3.2 mm año⁻¹) reportada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

10.4.- En laguna Salada se observaron enriquecimientos significativos de Ag y As y en la laguna El Llano Ag y Cr, calculados con respecto a los valores de la corteza y valores de fondo locales. Estos enriquecimientos se relacionaron con la región minera Chiconquiaco y con la litología de la zona costera. No hubo evidencia de enriquecimiento de elementos traza provenientes de la CNLV.

11. BIBLIOGRAFIA

- Abraham, G.M.S., R.J. Parker. 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring Assessment*, 136: 227-238.
- Álvarez-Arellano, A.D., J. Gaitán-Morán. 1994. En: De la Lanza-Espino, G., C. Cáceres-Martínez (Eds.), *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*, UNAM-UABCS. México, 13-74p.
- Appleby, P.G., F. Oldfield. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 5: 1-8.
- Appleby, P.G., F. Oldfield. 1992. Application of lead-210 to sedimentation studies, p. 731-778. En: Ivanovich, M., R.S. Harmon (Eds.), *Uranium series disequilibrium, Application to Earth. Marine and Environmental Science*. Oxford University. Oxford, 910p.
- Appleby, P.G., 1998. Dating recent sediments by Pb-210: problems and solutions. *Proceedings of the Seminar on Helsinki*, 2-3 April, 1997. STUK-A 145, 7-24.
- Appleby, P.G. 2001. *Basin Analysis, Coring and Chronological Techniques. Chronostratigraphic techniques in recent sediments*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 1: 2-32p.
- Baskaran, M., 2011. Po-210 and Pb-210 as atmospheric tracers and global atmospheric Pb-210 fallout: a Review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102: 500–513.
- Bellucci, L.G., M. Frignani, J.K. Cochran, E. Albertazzi, L. Zaggia, G. Cecconi, H. Hopkins. 2007. ^{210}Pb and ^{137}Cs as chronometers for salt marsh accretion in the Venice Lagoon – links to flooding frequency and climate change. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97: 85-102.
- Berger, A.R. 1996. The geoindicator concept and its application: an introduction. En *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1-14.
- Berner, R.A. 1971. *Principles of Chemical Sedimentology*. McGraw-Hill, Ohio, 240p.
- BGS, 2014. British Geological Survey. Climate change: Sea level and coastal changes. Natural environment research council.

<http://www.bgs.ac.uk/discoveringGeology/climateChange/general/coastal.html?src=topNav>

- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley, A. Unnikrishnan. 2007. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. En: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (Eds.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 989p.
- Brasier, M.D. 1995. Fossil indicators of nutrient levels. 1:Eutrophication and climate change. Geological Society, London (Special Publications), 83: 113-132.
- Bojakowska, I., J. Krasuska. 2014. Copper and other trace elements in sediments of lakes near Konin (Poland). J. Elem. s. 31-40.
- Boström, K. 1973. The origin and fate of ferromagnesian active ridge sediments. Stockholm Contributions in Geology, 27: 149–243.
- Boutton, T.W. 1991. Stable carbon isotope ratios of natural materials: II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments. En: Coleman, D.C., B. Fry (Eds.), Carbon Isotopes Techniques. Academic Press, Inc., San Diego, 173– 185p.
- Bricker-Urso, S., J.K. Cochran, C. Hunt. 1989. Accretion rates and sediment accumulation in Rhode Island salt marshes. Estuaries, 12: 300-317.
- Bruland, K.W., K. Bertine, M. Koide, E.D. Goldberg. 1974. History of metal pollution in Southern California coastal zone. Environment Science Technology, 8: 425-432.
- Burone, L., P. Muñiz, A.M.S. Pires-Vanin, M. Rodrigues. 2003. Spatial distribution of organic matter in the surface sediment of Ubatuba Bay (Southeastern-Brazil)
- Callaway, J.C., E.L. Borgnis, R.E. Turner, C.S. Milan. 2012. Carbon sequestration and sediment accretion in San Francisco Bay Tidal Wetlands. Estuaries and Coasts, 35: 1163-1181.

- Calvert, S.E., T.F. Pedersen. 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implication for the geological record. *Marine Geology*, 113: 67-68.
- Carnero-Bravo, V., J.A. Sanchez-Cabeza, A.C. Ruiz Fernández, M. Merino-Ibarra, C. Hillaire-Marcel, J.A. Corcho-Alvarado, S. Röllin, M. Díaz-Asencio, J.G. Cardoso-Mohedano, J. Zavala-Hidalgo. 2016. Sedimentary records of recent sea level rise and acceleration in the Yucatan Peninsula. *Science of the Total Environment*, 573: 1063-1069.
- CCSP, 2009. U.S. Climate Change Service Program. Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region. <http://www.climate-science.gov/Library/sap/sap4-1/final-report/default.htm>
- Celis-Hernández, O., L. Rosales-Hoz, A. Carranza-Edwards. 2013. Heavy metals enrichment in surface sediments from the SW Gulf of Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185: 8891-8907.
- CFE, 1987. Comisión Federal de Electricidad. Diagnóstico de las condiciones ecológicas actuales del complejo lagunar que comprende las lagunas El Llano, Farallón, Salada, Verde y La Mancha por parte de la Comisión Federal de Electricidad. México.
- CFE, 1989. Comisión Federal de Electricidad. Bases para la solicitud del uso exclusivo de la Laguna Salada por parte de la Comisión Federal de Electricidad. México.
- Chester, R., T. Jickells. 2012. Nutrients, oxygen, organic carbon and the carbon cycle in sea water. En: *Marine Geochemistry*. 3ra. Edición. Wiley-Blackwell, Londres, 163-207p.
- Church, J.A., N.J. White. 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32:585-602.
- CONABIO, 2012. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/documentos/Mlistado.html>.
- CONAGUA, 2012. Comisión Nacional de Agua. Regiones Hidrológicas. Atlas Digital del Agua en México. SEMARNAT, 142p.

- CONANP, 2011. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Estudio Previo Justificativo para la modificación de la declaratoria del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. SEMARNAT, México, 87p.
- Coquery, M., P.M. Welbourn. 1995. The relationship between metal concentration and organic matter in sediments and metal concentration in the aquatic macrophyte *Eriocaulon septangulare*. *Water Research*, 29(9): 2094-2101.
- Costa C.S.B., O.O. Iribarne, J.M. Farina. 2009. Human impacts and threats to the conservation of South American salt marshes. En: Silliman, B.R., E.D. Grosholz, M.D. Bertness (Eds.), *Human Impacts on Salt Marshes: A Global Perspective*. University of California Press, California, 337–360p.
- Crossland, C.J., D. Baird, J.P. Ducrotoy, H. Lindeboom, R.W. Buddemeier, W.C. Dennison, B.A. Maxwell, S.V. Smith, D.P. Swaney. 2005. The Coastal Zone – a Domain of Global Interactions. En: Crossland, C.J., H.H. Kremer, H.J. Lindeboom, J.I. Marshall-Crossland, M.D.A. Le Tissier (Eds). *Coastal Fluxes in the Anthropocene*, Global Change Series. Springer, 1-37.
- Cundy, A.B., I.W. Croudace. 1995. Sedimentary and geochemical variations in a salt marsh/mud flat environment from the mesotidal Hamble estuary, Southern England. *Marine Chemistry*, 51: 115-132.
- Dalmacija, B., M. Prica, I. Ivancev-Tumbas, A. Van der Kooij, S. Roncevic, D. Kremer, I. Bikit, I. Teodorovic. 2006. Pollution of the Begej Canal sediment-metals, radioactivity and toxicity assessment. *Environment International*, 32: 606-615.
- Delaune, R.D., W.H. Patrick Jr, C.J. Smith. 1996. Marsh aggradation on sediment distribution along rapidly submerging Louisiana Gulf coast. *Environmental Geology and Water Sciences*, 20: 57-64.
- Díaz-Asencio, M., C.M. Alonso-Hernández, Y. Bolanos-Álvarez, M. Gómez-Batista, V. Pinto, R. Morabito, J.I. Hernández-Albernas. 2009. One century sedimentary record of Hg and Pb pollution in the Sagua estuary (Cuba) derived from ^{210}Pb and ^{137}Cs chronology. *Marine Pollution Bulletin*, 59: 108–115.
- Díaz-Asencio, M., J.A. Corcho-Alvarado, C.M. Alonso-Hernández, A. Quejido-Cabezas, A.C. Ruiz-Fernández, M. Sánchez-Sánchez, M.B. Gómez-Mancebo.

2011. Reconstruction of metal pollution and recent sedimentation processes in Havana Bay (Cuba): A tool for coastal ecosystem management. *Journal of Hazardous Materials*, 196: 402–411.
- Edgington, D.N., J.A. Robbins. 1975. Determination of the Activity of Lead-210 in Sediments and Soils. Vol. 3, Chapter 3. EPA (Environmental Protection Agency). <http://www.epa.gov/glnpo/lmmb/methods/lead-210.pdf>
- Emadodin, I. 2011. Soil and sediment chronology as a tool to study long-term natural and human induced land degradation: an overview. *International Journal of Soil Science*, 6: 12-18.
- Flores-Verdugo, F.J., C. Agraz-Hernández, D. Benitez-Pardo. 2007. Ecosistemas acuáticos costeros: Importancia, retos y prioridades para su conservación. En: Sánchez, O., M. Herzig, E. Peters-Recagno, R. Márquez-Huitzil, L. Zambrano (Eds.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México, 147–166.
- Flynn, W.W. 1968. The determination of low levels of polonium-201 in environmental materials. *Analytica Chimica Acta*, 43: 221-227.
- Fontugne, M.R., J.M. Jouanneau. 1987. Modulation of the particulate organic carbon flux to the ocean by a macrotidal estuary—evidence from measurements of carbon isotopes in organic matter from the Gironde system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 24: 377–387.
- Frignani, M., L.G. Bellucci, L. Langone, H. Muntau. 1997. Metal fluxes to the sediments of the northern Venice Lagoon. *Marine Chemistry*, 58: 275-292.
- Gao, L., J.M. Zhou, Yang, H., Chen, J. 2005. Phosphorus fractions in sediments profiles and their potential contributions to eutrophication in Dianchi Lake. *Environmental Geology*, 48(7): 835-844.
- GCRIO, 1990. US Global Change Research Information Office. Global Change Definition. <http://www.gcrio.org/index.php>
- GCRP, 2009. U.S. Global Change Research Program. Global Climate Change Impacts in the United States. <http://www.globalchange.gov/usimpacts>

- Gehrels, W.R., J.R. Kirby, A. Prokoph, R.M. Newnham, E.P. Achterberg, H. Evans, S. Black, D.B. Scott. 2005. Onset of recent rapid sea-level rise in the western Atlantic Ocean. *Quaternary Science Reviews*, 24: 2083-2100.
- Gehrels, W.R., B.W. Hayward, R.M. Newnham, K.E. Southall. 2008. A 20th century acceleration of sea-level rise in New Zealand. *Geophysical Research Letters*, 35: 1-5.
- Glasby, G.P., P. Szefer, P. 1998. Marine pollution in Gdansk Bay, Puck Bay and the Vistula Lagoon, Poland: an overview. *The Science of the Total Environment*, 212: 49-57.
- Goldberg, E.D., 1963. Geochronology with ^{210}Pb in radioactive dating. In: *Radioactivity Dating*. IAEA, Vienna.
- Gu, Y.G., Z.H. Wang, S.H. Lu, S.J. Jiang, D.H. Mu, Y.H. Shu. 2012. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify source of anthropogenic impacts on metallic elements in sediments from the mid Guangdong coasts, China. *Environmental Pollution*, 163: 248-255.
- Gurrea, M. 2000. Análisis de componentes principales. Proyecto e-Math Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD).
- Hornberger, M., S.N. Luoma, A. van Geen, C. Fuller, R. Anima. 1999. Historical trends of metals in the sediments of San Francisco Bay, California. *Marine Chemistry*, 64: 39-55.
- Horowitz, A.J. 1985. Physical factors affecting sediment-trace metal concentrations. En: *A primer on trace metal-sediment chemistry*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2277, 61p.
- INEGI, 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mapa digital de México. Geología. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAyLjE0NTY1LHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>. 07/02/2016
- Ip, C.C.M., X.D. Li, G. Zhang, O.W.H. Wai, Y.S. Li. 2007. Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding area, South China. *Environmental Pollution*, 147(2) : 311-323.

- Ip, C.C.M., X.D. Li, G. Zhang, J.G. Farmer, O.W.H. Wai, Y.S. Li. 2004. Over one hundred years of trace metal fluxes in the sediments of the Pearl River Estuary, South China. *Environmental Pollution*, 132: 157-172.
- IPCC, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change. Third assesement report: Climate Change. Impacts, adaptation and vulnerability. Economic costs of sea-level rise. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=298>
- IPCC, 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change. Quinto Informe de Síntesis sobre el Cambio Climático 2013. OMM (Organización Meteorológica Mundial) y PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf. 01-04-2014.
- Ivanovich, M., A.G. Latham, T.L. Ku. 1992. En: Ivanovich, M., R.S. Harmon (Eds.), Uranium-Series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine, and Enviromental Sciences. Clarendon Press, Oxford, 910p.
- Jia, Y, J. Zheng, Z. Yue, X. Liu, H. Shan. 2014. Tidal flat erosion of the Huanghe River Delta due to local changes in hydrodynamic conditions. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(7): 116-124.
- Kaplan, R.M., D.P. Saccuzzo. 2006. Pruebas Psicológicas. Principios, aplicaciones y temas, Capítulo 3. Thomson, México D.F., 768p.
- Krishnaswami, S., D. Lal-Martin, J.M. Meybeck. 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11: 407-414.
- Kumar, S.P., J.K. Patterson-Edward. 2009. Assessment of metal concentration in the sediment cores of Manakudy estuary, south west coast of India. *Indian Journal of Marine Sciences*, 38(2): 235-248.
- Kuramoto, T., M. Minagawa. 2001. Stable carbon and nitrogen isotopic characterization of organic matter in a mangrove ecosystem on the Southwestern Coast of Thailand. *Journal of Oceanography*, 57: 421–431.
- Lankford, R.R. 1977. Coastal lagoons of Mexico, their origin and classification. En: *Estuarine Processes II: Circulation, Sediment and Transfer of Material in Estuary*. Academic Press Inc., New York, 182-215p.

- Lee, S.V., A.B. Cundy. 2001. Heavy metal contamination and mixing processes in sediments from the Humber Estuary, Eastern England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53: 619-636.
- Li, Gl., X.M. Pang. 2014. Difference in organic carbon contents and distributions in particle-size fractions between soil and sediment on the Southern Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 11: 717-726.
- Lieser, K.H., 2001. *Nuclear and Radiochemistry: Fundamentals and Applications*. Revised Ed., Wiley & Verlag, VHC, Berlin, 474p.
- Liu J., Z. Chen, M. Chen, W. Yan, R. Xiang, X. Tang. 2010. Magnetic susceptibility variations and provenance of surface sediments in the South China Sea. *Sedimentary Geology*, 230: 77-85.
- Liu, H., D.J. Jacob, I. Bey, R.M. Yantosca. 2001. Constraints from ^{210}Pb and ^7Be on wet deposition and transport in the global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields. *Journal of Geophysical Research*, 116(11): 12109-12128.
- Llanos-Arias, J., J. Cervantes-Pérez. 1995. *Vientos máximos en el estado de Veracruz*. Comisión Nacional del Agua. Veracruz, México.
- Loring, D.H., 1990. Lithium – A new approach for the granulometric normalization of trace metal data. *Marine Chemistry*, 29: 155-168.
- Loring, D.H., R.T. Rantala. 1992. *Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter*. Reference methods for marine pollution studies, 63. UNEP (United Nations Environment Programme), 74p.
- Luoma, S.N., 1990. Processes affecting metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments. En: Furness, R.W., P.S. Rainbow (Eds.), *Heavy metals in the marine environment*. CRS Press Inc. Florida, 51-66.
- Lynch, J.C., J.R. Meriwether, B.A. McKee, F. Vera-Herrera, R.R. Twilley. 1989. Recent accretion in mangrove ecosystems based on ^{137}Cs and ^{210}Pb . *Estuaries*, 12(4): 284-299.
- Martínez, M.L., G. Mendoza-González, R. Silva-Casarín, E. Mendoza-Baldwin. 2014. Land use changes and sea level rise may induce a “coastal squeeze” on the coasts of Veracruz, Mexico. *Global Environmental Change*, 29: 180-188.

- McCaffrey, R., J. Thomson. 1980. A record of the accumulation of sediment and trace metals in a Connecticut salt marsh. *Advances in Geophysics*, 22: 165-236.
- Maksymowska D., P. Richard, H. Piekarek-Jankowska, P. Riera. 2000. Chemical and isotopic composition of the organic matter sources in the Gulf of Gdansk (Southern Baltic Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51: 585-598.
- Mariano, M.R. 1986. Hábitos alimenticios de *Callinectes similis* (Williams, 1966) en la Laguna del Llano, Mpio. de Actopan, Ver. México. Tesis profesional. Universidad Veracruzana. Xalapa, México, 66p.
- Meyers, P.A. 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114: 289–302.
- Meyers, P.A., E. Lallier-Vergès. 1999. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *Journal of Paleolimnology*, 21: 345-372.
- Monteiro, F.F., R.C. Cordeiro, R.E. Santelli, W. Machado, H. Evangelista, L.S. Villar, L.C.A. Viana, E.D. Bidone. 2011. Sedimentary geochemical record of historical anthropogenic activities affecting Guanabara Bay (Brazil) environmental quality. *Environmental Earth Science*, DOI 10.1007/s12665-011-1143-4.
- Morales-Lozano, M.A., 2011. Sistema de Agua de Servicio (TSW) en la CNLV. Veracruz: Universidad Veracruzana, 83-98.
- Moreno-Casasola, P., J.L. Rojas-Galaviz, D. Zárate-Lomelí, M.A. Ortiz-Pérez, A.L. Lara-Domínguez, T. Saavedra-Vázquez. 2002. Diagnóstico de los manglares de Veracruz: distribución, vínculo con los recursos pesqueros y su problemática. *Instituto de Ecología A.C., Xalapa. Madera y Bosques*, 8: 61-88p.
- Moreno-Casasola, P., G. Vázquez. 2006. Las comunidades de las dunas. En: Moreno-Casasola, P. (Ed.), *Entornos Veracruzanos: la costa de La Mancha*. Instituto de Ecología A. C., Xalapa. 285-310p.
- Moreno-Casasola, P., A.C. Travieso-Bello. 2006. Las playas y las dunas. En: Moreno-Casasola, P. (Ed.), *Entornos Veracruzanos: la costa de La Mancha*. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz. 205-220.

- Mortlock, R.A., P.N. Froelich. 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Res. Part A*, 36:1415-1426.
- NOAA, 2000. National Oceanic and Atmospheric Administration. Tide and Current Glossary. <https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/glossary2.pdf>.
- Ohlendorf, C., M. Sturm. 2008. A modified method for biogenic silica determination. *Journal of Paleolimnology*, 39: 137-142.
- Oldfield, F., P.G. Appleby. 1984. Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments. En: Haworth, E.Y., J.W.G. Lund (Eds.), *Lake Sediments and Environmental History*. Leicester University Press, UK. 93-124.
- Oliver, J.E. 2005. *Encyclopedia of world climatology*. Springer, Netherlands, 854p.
- Ortlieb, L., 1991. Quaternary vertical movements along the coasts of Baja California and Sonora. En: Dauphin, J.P., B.T. Simoneit (Eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the California*. American Association of Petroleum Geologists 47, 447-480.
- Oxford dictionaries, 2016. Language matters. Accretion definition. <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/accretion>.
- Preiss, N., M.A. Mélières, M. Pourchet. 1996. A compilation of data on lead ^{210}Pb concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *Journal of Geophysical Research*, 101: 28847–28862.
- Reible, D.D., 2014. Sediment and contaminant processes. En: *Processes, assessment and remediation of contaminated sediments*. Springer, New York, 14-16.
- Robbins, J.A. 1978. Geochemical and geophysical application of radioactive lead isotopes. En: J.O. Nriagu (Ed.), *Biogeochemistry of lead in the environment*. Elsevier Scientific, Amsterdam. 332-367.
- Rosales-Hoz, M.T.L. 1980. *Manual de laboratorio de oceanografía química*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. México, 178p.
- Rodríguez-Castañeda, A.P. 1994. *Evaluación de metales en sedimentos, agua y biota de las lagunas Salada, El Llano y La Mancha, Veracruz*, UNAM. México, 99p.

- Rosales-Hoz, L., A.B. Cundy, J.L. Bahena-Manjarrez. 2003. Heavy metals in sediment cores from a tropical estuary affected by anthropogenic discharges: Coatzacoalcos estuary, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58: 117–126.
- Ruiz-Fernández, A.C., J.A. Sanchez-Cabeza. 2009. Diagénesis y ^{210}Pb . En: Sanchez-Cabeza, J.A., M. Diaz-Asencio, A.C. Ruiz-Fernández (Eds.), *Radiocronología de los sedimentos costeros utilizando ^{210}Pb : modelos, validación y aplicaciones*. IAEA (International Atomic Energy Agency), Proyecto RLA-7012. 58-63p.
- Ruiz-Fernández, A.C., F. Páez-Osuna, M.L. Machain-Castillo, E. Arellano-Torres. 2004. ^{210}Pb geochronology and trace metal fluxes (Cd, Cu and Pb) in the Gulf of Tehuantepec, South Pacific of Mexico. *Journal of Environmental Radioactivity*, 76: 161-175.
- Ruiz-Fernández, A.C., F. Páez-Osuna, J. Urrutia-Fucugauchi, M. Preda. 2005. ^{210}Pb geochronology of sediment accumulation rates in Mexico City Metropolitan Zone as recorded at Espejo de los Lirios lake sediments. *Catena*, 61: 31-48.
- Ruiz-Fernández, A.C., M. Frignani, C. Hillaire-Marcel, B. Ghaleb, M.D. Arvizu, J.R. Raygoza-Viera, F. Páez-Osuna. 2009. Trace metals (Cd, Cu, Hg and Pb) accumulation recorded in the intertidal mudflat sediments of three coastal lagoons in the Gulf of California, Mexico. *Estuaries and Coasts*, 32: 551-564.
- Ruiz-Fernández, A.C., J.A. Sanchez-Cabeza, C. Alonso-Hernández, V. Martínez-Herrera, L.H. Pérez-Bernal, M. Preda, C. Hillaire-Marcel, J. Gastaud, A.J. Quejido-Cabezas. 2012. Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico). *Continental Shelf Research*, 37: 57–65.
- Ruiz-Fernández, A.C., J.A. Sanchez-Cabeza, J.L. Serrato de la Peña, L.H. Pérez-Bernal, A. Cearreta, F. Flores-Verdugo, M.L. Machain-Castillo, E. Chamizo, R. García-Tenorio, I. Queralt, R. Dunbar, D. Mucciarone, M. Díaz-Asencio. 2016. Accretion rates in coastal wetlands of the southeastern Gulf of California and their relationship with sea-level rise. *The Holocene*, 1–12.

- Salomons, W, U. Förstner. 1984. Metal in the hydrocycle. 1st Edition, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany. 349p.
- Sanchez-Cabeza, J.A., A.C. Ruiz-Fernández. 2012. ²¹⁰Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 82: 183–200.
- Sanchez-Cabeza, J.A., M. Díaz-Asencio, A.C. Ruiz-Fernández. 2012. Radiocronología de sedimentos costeros utilizando ²¹⁰Pb: Modelos, validación y aplicaciones. OIEA, Viena. STI/PUB/1538 ISBN 978–92–0–325210–2. 105p.
- Sanders, C.J., J.M. Smoak, A.S. Naidu, D.R. Araripe, L.M. Sanders, S.R. Patchineelam. 2010. Mangrove forest sedimentation and its reference to sea level rise, Cananeia, Brazil. *Environ. Earth Science*, 60: 1291-1301.
- Schwartz, M., 2005. Sea-level changes during the last millennium. En: *Encyclopedia of coastal science*. Springer. Netherlands. 1211p.
- SE, 2010. Secretaría de Economía. Panorama Minero del Estado de Veracruz. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/VERACRUZ.pdf>.
- SEMAR, 2012. Nivel medio del mar para Veracruz entre 1999 y 2012. http://oceanografia.semar.gob.mx/telems/CROQUIS%20GOLFO/8%204.VERACRUZ_niveles_infor.pdf.
- SGM, 2014. Servicio Geológico Mexicano. Panorama minero del estado de Veracruz. Secretaría de Economía, México. <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/VERACRUZ.pdf>
- Shahabuddin, M., M. Dilder-Hossain, S.M. Hossain, M. Monzurul-Hoque, M. Mamun-Mollah, M.A. Halim. 2010. Soil contamination in Nuclear Reactor Surrounding areas in Savar, Bangladesh using instrumental neutron activation analysis method. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(3): 282-295.
- Shiff, K.C., S.B. Weisberg. 1999. Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments. *Marine Environment Research*, 48: 161-176.

- Shoji, S., M. Nanzyo, R. Dahlgren. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. En: Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization. Elsevier, Netherlands. 101-136p.
- Shukla-Bhagwan, S. 2002. Sedimentation rate through environmental radioactivity (models and applications). Environmental research and publications Inc., Ontario, 192p.
- Simms, A.R., J.B. Anderson, R. DeWitt, K. Lambeck, A. Purcell. 2013. Quantifying rates of coastal subsidence since the last interglacial and the role of sediment loading. *Global and Planetary Change*, 111: 296-308.
- Smoak, J.M., J.L. Breithaupt, T.J. Smith III, C.J. Sanders. 2013. Sediment accretion and organic carbon burial relative to sea-level rise and storm events in two mangrove forests in Everglades National Park. *Catena*, 104: 58-66.
- SMS, 2010. http://www.sms.si.edu/IRLSPEC/Tidal_Flats.htm.
- Sorgente, D., M. Frignani, L. Langone, M. Ravaioli. 1999. Chronology of Marine Sediments, Interpretation of activity-depth profiles of ^{210}Pb and other radioactive tracers, Part I. Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto per la Geologia Marina, Bologna. 32p.
- Sosa, G.N.A., R.F. Ruiz. 1991. Zonación y variación estacional (sucesión) de la epifauna de las raíces del mangle de la laguna El Llano, Ver., México. Tesis profesional. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. 98 p.
- Spencer, K., A.B. Cundy, I.W. Croudace. 2003. Heavy metal distribution and early-diagenesis in salt marsh sediments from the Medway Estuary, Kent, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 53-54.
- Spiegel-Murray, R. 1991. Estadística. Segunda Edición. Capítulo 14. McGraw-Hill, Madrid, 556p.
- Steinnes, E., A.J. Friedland. 2006. Metal contamination of natural surface soils from long-range atmospheric transport: existing and missing knowledge. *Environmental Reviews*, 14(3), 169-186.
- Sweeney, R., I.R. Kaplan. 1980. Natural abundances of ^{15}N as a source indicator for near-shore marine sedimentary and dissolved nitrogen. *Marine Chemistry*, 9(2): 81-94.

- Su, C.C., C.A. Huh. 2003. Factors controlling atmospheric fluxes of ^7Be and ^{210}Pb in northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 30: doi:10.1029/2003GL018221.
- Sun, Q., G. Chu, J. Liu, D. Gao. 2006. A 150-y record of heavy metals in the varved sediments of lake Bolterskardet, Svalbard. *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 38(3): 436-445.
- Sutherland, R.A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39: 611-627.
- Tessier, A., F. Rapin, R. Carignan. 1985. Trace elements in oxic lake sediments: possible adsorption onto iron oxyhydroxides. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 49: 183-194.
- Tessier, A., D. Fortin, N. Belzile, R.R. Devitre, G.G. Leppard. 1996. Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter: Narrowing the gap between field and laboratory measurements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(3): 387-404.
- Thornton, S.F., J. McManus. 1994. Application of organic carbon and nitrogen isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: Evidence from Tay estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38: 219–233.
- Thinova, L., M. Frontasyeva, K. Vergel, E. Bayushkina. 2014. Assessment of contamination with trace elements and man-made radionuclides around Temelin Nuclear Power Plant in Czech Republic. *Radiation Physics and Chemistry*, 104: 432-435.
- Tribovillard, N., T.J. Algeo, T. Lyons, A. Riboulleau. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology*, 232: 12-32.
- Tue, N.T., T.D. Quy, H. Hamaoka, L.V. Dung, M.T. Nhuan, K. Omori. 2012. Depth profiles of $\delta^{13}\text{C}$ and trace element concentrations in mangrove ecosystem of Tien Hai Natural Reserve, Vietnam. In: Kawaguchi, M., K. Misaki, H. Sato, T. Yokokawa, T. Itai, T. M. Nguyen, J. Ono, S. Tanabe (Eds.), *Interdisciplinary*

- Studies on Environmental Chemistry—Environmental Pollution and Ecotoxicology. TERRAPUB. 463–470.
- USEPA, 2013. United States Environmental Protection Agency. Clean Energy. Nuclear Energy. <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-and-you/affect/nuclear.html>.
- Voica, C., A. Dehelean, A. Iordache, I. Geana. 2012. Method validation for determination of metals in soils by ICP-MS. Romanian reports in physics, 64(1): 221-231.
- Wedepohl, K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232.
- Wigley, T.M.L., S.C.B. Raper. 1987. Thermal expansion of sea water associated with global warming. *Nature*, 330: 127-131.
- Woodroffe, C.D. 2003. *Coasts: Form, Processes and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, 623p.
- Yao, Q., X. Wang, H. Jian, H. Chen, Z. Yu. 2015. Characterization of the particle size fraction associated with heavy metals in suspended sediments of the Yellow River. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6): 6725-6744.
- Yongming, H., D. Peixuan, C. Junji, E.S. Posmentier, 2006. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, 355: 176-186.
- Zaaboub, N., W. Oueslati, M.A. Helali, S. Abdeljaouad, F.J. Huertas, A. Lopez-Galindo. 2014. Trace elements in different marine sediment fractions of the Gulf of Tunis (Central Mediterranean Sea), *Chemical Speciation & Bioavailability*, 26:1, 1-12.
- Zavala-Hidalgo, J., R. De Buen Kalman, R. Romero-Centeno, F. Hernández Maguey. 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. En: Botello, A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, J.L. Rojas-Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 249-268p.

- Zervas, C. 2009. Sea level variations of the United States 1854-2006. NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), Technical report CO OPS 053, 194p.
- Zevenhoven, R. P. Kilpinen, 2001. Trace elements, alkali metals. En: Control of pollutants in flue gases and fuel gases. The Nordic Energy Research Programme and Norway Helsinki University of Technology. Espoo, Finland. 8-1-8-27.
- Zhang, Q., C. Burman, H. Amols. 2014. Transient and secular radioactive equilibrium revisited. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.3038.pdf>
- Zwolsman, J.J.G., G.T.M. Van Eck. 1993. Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 27: 287. doi:10.1007/BF02334792.

12. ANEXOS

Anexo 12.1. Porcentajes de humedad de los núcleos sedimentarios de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

Profundidad (cm)	% Humedad			
	SAI	SAII	LL1	LL2
Tapete sup.		38.22		
1	28.48	21.72	18.73	16.45
2	23.50	21.77	18.47	18.11
3	23.96	22.08	17.60	17.40
4	24.00	23.84	17.20	16.52
5	24.18	25.25	17.75	16.43
6	24.89	25.59	18.04	16.54
7	24.44	25.21	18.77	17.08
8	25.25	25.39	19.51	18.47
9	26.03	27.86	18.61	18.72
10	27.56	32.65	18.66	18.49
11	28.62	34.28	18.16	18.75
12	28.64	33.33	17.84	19.01
13	29.32	39.18	18.23	19.43
14	31.03	39.57	18.12	19.36
15	33.86	39.68	18.18	19.56
16	33.12	41.07	18.25	20.03
17	33.78	43.34	18.06	19.97
18	32.93	44.46	18.32	20.68
19	33.48	44.95	18.68	20.61
20	34.32	47.27	19.04	21.65
21	35.71	46.65	18.88	20.58
22	35.47	47.36	19.29	21.03
23	33.25	50.06	19.36	21.43
24	30.45	50.77	19.28	21.05
25	31.07	50.82	19.29	20.98
26	30.83	42.88	19.84	21.39
27	31.40	40.52	19.82	21.84
28	31.00	39.68	19.68	22.18
29	32.78	38.26	20.10	22.04
30	31.35	37.15	19.73	22.36
31	28.58	36.52	20.11	22.44
32	29.17	32.86	19.84	22.72
33	29.94	31.22	20.26	22.91
34	29.82	31.84	20.94	22.52
35	29.16	30.41	20.39	22.55

36	29.60	30.56	20.45	22.57
37	30.10	29.73	20.41	22.58
38	29.58	29.72	20.22	22.32
39	29.25	30.31	20.07	22.52
40	29.03	30.69	20.92	22.71
41	29.39	30.17	21.09	22.47
42	29.67	30.85	20.73	22.53
43	30.61	31.59	20.65	22.72
44	30.32	34.12	20.95	22.63
45	30.35	34.37	20.44	22.46
46	30.12	37.30	20.89	22.28
47	30.28	36.98	19.97	21.80
48	30.43	36.21	20.47	22.65
49			19.91	
50			19.26	

Anexo 12.2. Porcentajes de porosidad de los núcleos sedimentarios de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

Profundidad (cm)	% Porosidad			
	SAI	SAII	LL1	LL2
Tapete sup.		60.73		
1	49.88	40.95	36.56	32.99
2	43.44	41.03	36.16	35.61
3	44.06	41.46	34.82	34.50
4	44.12	43.90	34.18	33.09
5	44.36	45.78	35.05	32.96
6	45.31	46.23	35.49	33.13
7	44.70	45.73	36.62	34.00
8	45.78	45.97	37.74	36.16
9	46.80	49.12	36.38	36.53
10	48.75	54.79	36.45	36.19
11	50.05	56.59	35.67	36.59
12	50.09	55.55	35.19	36.98
13	50.91	61.69	35.79	37.62
14	52.94	62.08	35.63	37.51
15	56.14	62.18	35.71	37.81
16	55.32	63.54	35.82	38.51
17	56.05	65.66	35.53	38.41
18	55.10	66.68	35.93	39.46
19	55.72	67.12	36.48	39.36

20	56.64	69.15	37.02	40.86
21	58.13	68.61	36.79	39.31
22	57.88	69.22	37.41	39.96
23	55.46	71.47	37.51	40.54
24	52.26	72.06	37.39	40.00
25	52.98	72.10	37.41	39.90
26	52.70	65.23	38.23	40.48
27	53.37	63.01	38.19	41.12
28	52.90	62.19	37.99	41.60
29	54.93	60.77	38.61	41.41
30	53.31	59.64	38.06	41.86
31	50.01	58.99	38.62	41.97
32	50.72	55.03	38.22	42.37
33	51.65	53.16	38.84	42.62
34	51.51	53.87	39.84	42.08
35	50.71	52.21	39.04	42.12
36	51.24	52.39	39.12	42.15
37	51.84	51.40	39.07	42.17
38	51.22	51.39	38.78	41.80
39	50.82	52.09	38.56	42.08
40	50.56	52.54	39.81	42.35
41	50.99	51.93	40.06	42.02
42	51.33	52.73	39.54	42.09
43	52.45	53.58	39.41	42.36
44	52.10	56.42	39.85	42.23
45	52.14	56.69	39.11	42.00
46	51.87	59.80	39.77	41.74
47	52.06	59.47	38.42	41.07
48	52.24	58.66	39.15	42.27
49			38.33	
50			37.36	

Anexo 12.3. Valores de masa acumulada (g cm^{-2}) de los núcleos sedimentarios de Laguna Salada (SAI y SAII) y El Llano (LL1 y LL2).

Profundidad (cm)	Masa acumulada (g cm^{-2})			
	SAI	SAII	LL1	LL2
Tapete sup.		0.21		
1	0.54	0.98	0.56	0.48
2	1.61	1.93	1.75	1.48
3	2.60	2.95	2.97	2.56
4	3.64	4.06	3.96	3.73
5	4.60	4.93	4.93	4.96
6	5.49	5.76	6.17	6.19
7	6.56	6.55	7.45	7.42
8	7.64	7.48	8.49	8.57
9	8.65	8.54	9.48	9.80
10	9.55	9.37	10.54	11.06
11	10.46	10.05	11.58	12.25
12	11.34	10.83	12.69	13.41
13	12.20	11.52	13.81	14.47
14	13.10	12.18	14.97	15.59
15	13.96	12.95	16.08	16.81
16	14.74	13.60	17.15	17.94
17	15.48	14.18	18.31	19.02
18	16.22	14.77	19.40	20.30
19	16.98	15.38	20.55	21.48
20	17.73	15.91	21.67	22.44
21	18.49	16.45	22.75	23.50
22	19.30	16.97	23.98	24.66
23	20.15	17.42	25.04	25.85
24	21.02	17.96	26.00	26.96
25	21.80	18.52	27.12	27.92
26	22.62	19.09	28.28	28.93
27	23.52	19.71	29.35	30.02
28	24.40	20.36	30.44	31.10
29	25.31	21.08	31.50	32.17
30	26.20	21.79	32.58	33.23
31	27.13	22.56	33.69	34.30
32	28.02	23.37	34.81	35.33
33	28.89	24.20	35.91	36.31
34	29.76	24.99	37.00	37.32
35	30.68	25.79	38.11	38.32
36	31.56	26.67	39.19	39.39
37	32.49	27.45	40.17	40.47

38	33.49	28.37	41.10	41.52
39	34.38	29.29	42.16	42.66
40	35.24	30.09	43.28	43.68
41	36.04	31.00	44.33	44.66
42	36.95	31.81	45.41	45.73
43	37.88	32.54	46.47	46.80
44	38.75	33.23	47.49	47.88
45	39.70	34.00	48.45	48.91
46	40.54	34.73	49.36	49.93
47	41.36	35.28	50.28	51.00
48	42.46	35.90	51.35	52.01
49			52.50	
50			53.90	

Anexo 12.4. Matriz de correlación de Pearson ($p < 0.05$) para las variables del núcleo SAI.

	arenas	limos	arcillas	SM	C _{org}	N	d ¹³ C	d ¹⁵ N	C:N	CaCO ₃	P	bSi	Al	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	V	Zn
arenas	1.00																					
limos	-0.99	1.00																				
arcillas	-0.82	0.72	1.00																			
SM	0.14	0.01	-0.60	1.00																		
C _{org}	-0.46	0.41	0.53	-0.38	1.00																	
N	-0.35	0.40	0.12	0.26	0.76	1.00																
d ¹³ C	-0.02	0.04	-0.07	0.30	-0.30	-0.01	1.00															
d ¹⁵ N	-0.38	0.43	0.13	0.27	0.67	0.88	-0.01	1.00														
C:N	-0.29	0.16	0.68	-0.89	0.56	-0.11	-0.45	-0.08	1.00													
CaCO ₃	-0.11	0.18	-0.12	0.38	-0.00	0.17	-0.03	0.22	-0.19	1.00												
P	-0.02	-0.07	0.30	-0.52	0.53	0.20	-0.26	0.11	0.56	-0.23	1.00											
bSi	0.11	-0.09	-0.18	0.22	-0.19	-0.07	-0.05	-0.04	-0.21	0.10	-0.10	1.00										
Al	-0.11	0.17	-0.12	0.35	0.00	0.18	0.10	0.18	-0.23	0.39	-0.22	-0.07	1.00									
Ag	-0.06	0.09	-0.05	0.09	0.01	0.12	-0.19	0.09	-0.11	-0.10	0.10	0.14	-0.41	1.00								
As	0.03	-0.02	-0.07	0.21	0.05	0.20	0.13	0.10	-0.13	0.19	-0.00	0.17	-0.13	0.05	1.00							
Cd	-0.03	0.04	0.00	0.09	-0.25	-0.20	0.22	-0.27	-0.11	0.07	-0.08	-0.00	-0.02	-0.39	0.46	1.00						
Co	-0.19	0.12	0.37	-0.40	0.29	-0.00	-0.20	0.00	0.51	-0.06	0.31	-0.05	-0.08	-0.22	0.38	0.28	1.00					
Cr	0.40	-0.46	-0.10	-0.25	-0.22	-0.34	-0.01	-0.46	0.04	-0.20	0.03	0.11	-0.28	-0.14	0.17	0.25	-0.04	1.00				
Cu	-0.43	0.46	0.22	0.22	0.45	0.54	-0.09	0.52	0.07	0.39	0.07	-0.04	0.44	0.07	0.23	-0.10	0.31	-0.52	1.00			
Ni	-0.42	0.40	0.39	-0.15	0.45	0.28	-0.27	0.29	0.41	0.26	0.24	-0.05	0.24	-0.08	0.34	0.10	0.80	-0.32	0.76	1.00		
V	-0.17	0.22	-0.03	0.32	0.12	0.32	-0.16	0.29	-0.16	0.33	0.07	0.14	-0.09	0.45	0.53	0.02	0.08	-0.15	0.52	0.40	1.00	
Zn	-0.12	0.07	0.27	-0.31	0.12	-0.13	0.02	-0.12	0.35	0.05	0.07	0.07	0.18	-0.24	0.14	0.25	0.51	0.05	0.27	0.46	-0.16	1.00

Anexo 12.5. Matriz de correlación de Pearson ($p < 0.05$) para las variables del núcleo SAIL.

	arenas	limos	arcillas	SM	C _{org}	N	d ¹³ C	d ¹⁵ N	C:N	CaCO ₃	P	bSi	Al	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	V	Zn
arenas	1.00																					
limos	-1.00	1.00																				
arcillas	-0.95	0.91	1.00																			
SM	0.28	-0.26	-0.31	1.00																		
C _{org}	-0.49	0.49	0.46	-0.51	1.00																	
N	-0.45	0.44	0.44	-0.46	0.97	1.00																
d ¹³ C	-0.04	0.04	0.04	0.66	-0.55	-0.52	1.00															
d ¹⁵ N	-0.44	0.41	0.52	-0.32	0.72	0.76	-0.38	1.00														
C:N	-0.28	0.30	0.20	-0.46	0.31	0.09	-0.34	0.04	1.00													
CaCO ₃	0.05	-0.04	-0.06	-0.43	0.01	-0.04	-0.30	0.01	0.35	1.00												
P	-0.08	0.09	0.05	0.75	-0.23	-0.21	0.72	-0.19	-0.29	-0.49	1.00											
bSi	-0.11	0.11	0.11	-0.52	0.43	0.35	-0.54	0.25	0.37	0.13	-0.41	1.00										
Al	-0.64	0.62	0.67	-0.20	0.35	0.28	0.04	0.44	0.43	-0.13	0.07	0.28	1.00									
Ag	-0.41	0.43	0.31	-0.40	0.75	0.68	-0.56	0.42	0.35	0.11	-0.24	0.48	0.27	1.00								
As	-0.43	0.46	0.32	-0.03	0.68	0.64	-0.19	0.36	0.11	-0.25	0.19	0.26	0.33	0.73	1.00							
Cd	-0.33	0.36	0.22	-0.22	0.58	0.50	-0.28	0.30	0.30	-0.07	0.06	0.33	0.24	0.57	0.52	1.00						
Co	-0.76	0.74	0.75	-0.23	0.45	0.39	-0.03	0.46	0.42	-0.09	0.13	0.25	0.91	0.41	0.44	0.35	1.00					
Cr	-0.33	0.32	0.32	0.26	0.08	0.00	0.18	0.17	0.34	-0.09	0.24	-0.06	0.53	0.11	0.21	0.04	0.53	1.00				
Cu	-0.77	0.76	0.78	-0.23	0.52	0.45	0.06	0.50	0.43	-0.13	0.20	0.26	0.90	0.35	0.47	0.37	0.93	0.46	1.00			
Ni	-0.77	0.75	0.77	-0.13	0.41	0.33	0.13	0.44	0.42	-0.15	0.25	0.17	0.92	0.31	0.43	0.32	0.96	0.57	0.97	1.00		
V	-0.66	0.67	0.57	-0.20	0.72	0.65	-0.19	0.49	0.35	-0.08	0.14	0.36	0.61	0.75	0.78	0.56	0.76	0.40	0.76	0.72	1.00	
Zn	-0.59	0.58	0.58	-0.20	0.33	0.25	0.09	0.25	0.41	-0.06	0.11	0.16	0.77	0.27	0.35	0.31	0.77	0.48	0.74	0.77	0.60	1.00

Anexo 12.6. Matriz de correlación de Pearson ($p < 0.05$) para las variables del núcleo LL1.

	arenas	limos	arcillas	SM	C _{org}	N	d ¹³ C	d ¹⁵ N	C:N	CaCO ₃	P	bSi	Al	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	V	Zn
arenas	1.00																					
limos	-0.99	1.00																				
arcillas	-0.94	0.90	1.00																			
SM	-0.05	0.06	0.01	1.00																		
C _{org}	-0.14	0.13	0.19	0.13	1.00																	
N	-0.16	0.16	0.15	0.17	0.87	1.00																
d ¹³ C	0.18	-0.19	-0.14	-0.11	-0.59	-0.49	1.00															
d ¹⁵ N	-0.10	0.08	0.16	0.15	0.65	0.76	-0.31	1.00														
C:N	0.06	-0.09	0.04	-0.06	-0.05	-0.46	-0.13	-0.38	1.00													
CaCO ₃	-0.04	0.01	0.13	-0.19	0.04	-0.02	0.16	0.05	0.08	1.00												
P	-0.14	0.09	0.31	-0.14	0.14	-0.03	0.12	0.05	0.24	0.50	1.00											
bSi	-0.27	0.23	0.39	-0.33	0.21	0.09	-0.03	0.25	0.17	0.25	0.32	1.00										
Al	0.08	-0.09	-0.03	0.23	-0.17	-0.21	0.15	-0.20	-0.00	-0.22	-0.05	-0.08	1.00									
Ag	0.10	-0.09	-0.12	-0.26	-0.15	-0.13	0.13	-0.19	-0.10	0.12	-0.09	-0.14	-0.02	1.00								
As	0.04	-0.01	-0.13	-0.04	-0.03	0.10	-0.15	0.12	-0.20	-0.39	-0.39	-0.20	0.04	0.10	1.00							
Cd	0.06	-0.07	-0.03	-0.02	0.13	0.14	0.04	0.21	-0.08	0.09	-0.01	0.04	0.07	-0.03	0.07	1.00						
Co	-0.32	0.32	0.30	0.31	0.19	0.09	-0.18	0.03	0.17	-0.25	0.03	0.06	0.39	-0.24	0.28	-0.11	1.00					
Cr	-0.03	0.05	-0.02	0.36	0.12	0.04	-0.02	-0.05	0.23	-0.24	-0.16	-0.14	0.17	-0.15	0.33	0.06	0.67	1.00				
Cu	-0.01	0.01	-0.01	0.02	-0.12	-0.18	-0.05	-0.23	0.14	0.02	-0.12	0.02	0.31	-0.08	-0.03	-0.05	0.22	0.07	1.00			
Ni	-0.36	0.35	0.35	0.37	0.17	0.06	-0.15	-0.04	0.16	-0.19	0.10	0.08	0.53	-0.22	0.13	-0.03	0.94	0.65	0.25	1.00		
V	0.13	-0.11	-0.18	-0.22	-0.06	-0.01	0.15	0.01	-0.02	0.05	-0.18	-0.08	-0.34	0.19	0.56	0.03	-0.07	0.30	-0.19	-0.24	1.00	
Zn	-0.30	0.30	0.28	0.43	0.23	0.14	-0.14	0.05	0.17	-0.25	-0.01	-0.03	0.36	-0.25	0.23	-0.05	0.92	0.71	0.20	0.87	-0.08	1.00

Anexo 12.7. Matriz de correlación de Pearson ($p < 0.05$) para las variables del núcleo LL2.

	arenas	limos	arcillas	SM	C _{org}	N	d ¹³ C	d ¹⁵ N	C:N	CaCO ₃	P	bSi	Al	Ag	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	V	Zn
arenas	1.00																					
limos	-0.95	1.00																				
arcillas	-0.88	0.70	1.00																			
SM	0.29	-0.16	-0.44	1.00																		
C _{org}	0.12	-0.08	-0.15	0.10	1.00																	
N	0.31	-0.19	-0.44	0.40	0.78	1.00																
d ¹³ C	0.08	-0.07	-0.07	-0.12	0.13	-0.07	1.00															
d ¹⁵ N	0.37	-0.25	-0.49	0.17	0.50	0.78	0.01	1.00														
C:N	-0.47	0.29	0.65	-0.43	0.13	-0.39	-0.02	-0.60	1.00													
CaCO ₃	-0.54	0.37	0.70	-0.20	-0.19	-0.53	0.02	-0.66	0.66	1.00												
P	-0.53	0.34	0.74	-0.44	-0.23	-0.48	-0.01	-0.44	0.59	0.69	1.00											
bSi	0.03	-0.04	-0.01	0.17	0.06	0.06	-0.13	0.04	0.01	-0.04	-0.24	1.00										
Al	-0.39	0.36	0.37	-0.50	-0.19	-0.32	0.17	-0.05	0.10	0.02	0.21	-0.06	1.00									
Ag	0.13	-0.06	-0.21	0.55	0.17	0.45	-0.19	0.21	-0.24	-0.15	-0.22	0.04	-0.65	1.00								
As	-0.30	0.30	0.24	-0.10	-0.13	-0.20	0.07	-0.29	0.21	0.24	0.10	-0.12	0.24	-0.12	1.00							
Cd	0.06	-0.03	-0.10	-0.01	0.92	0.64	0.26	0.35	0.23	-0.14	-0.17	0.02	-0.11	0.01	-0.01	1.00						
Co	0.13	-0.00	-0.31	0.20	-0.02	0.17	0.10	0.27	-0.35	-0.39	-0.26	-0.13	0.28	-0.05	0.36	0.00	1.00					
Cr	0.12	0.02	-0.30	0.09	-0.01	0.16	-0.05	0.19	-0.31	-0.29	-0.33	-0.39	0.03	0.08	0.39	-0.01	0.56	1.00				
Cu	-0.16	0.11	0.20	-0.02	0.14	0.15	0.18	0.10	0.13	-0.01	0.19	0.01	-0.01	0.38	-0.21	0.09	-0.06	-0.32	1.00			
Ni	0.02	0.04	-0.12	0.34	-0.01	0.11	-0.03	0.00	-0.15	-0.08	-0.16	0.02	-0.25	0.45	-0.06	-0.09	0.19	0.20	0.36	1.00		
V	0.02	0.02	-0.07	0.32	-0.03	0.06	-0.06	-0.23	0.02	0.12	-0.14	0.07	-0.38	0.26	0.59	0.03	0.13	0.28	-0.18	0.29	1.00	
Zn	0.27	-0.12	-0.46	0.32	0.25	0.47	0.13	0.52	-0.49	-0.52	-0.37	-0.07	0.03	0.26	-0.08	0.18	0.58	0.44	0.17	0.32	-0.10	1.00

13. GLOSARIO

Acreción sedimentaria: De acuerdo al diccionario de Oxford (2016), la acreción se define como el incremento vertical debido a la acumulación de capas de sedimento (compuesto de material orgánico e inorgánico) en un ecosistema.

Cambio global reciente: Cambios observados en el medio ambiente a escala planetaria durante los últimos 100 años que son resultado de diversas actividades humanas (GCRIO, 1990).

Cambio relativo del nivel del mar: El nivel del mar (o nivel medio del mar) es considerado como la altura promedio de la superficie oceánica entre la marea alta y baja. Tomando en cuenta que la superficie terrestre también se mueve verticalmente a través del tiempo, los cambios en el nivel del suelo son descritos como relativos hacia un punto en la superficie terrestre (NOAA, 2000; BGS, 2014).

Elemento traza: Elemento que se encuentra en una concentración promedio menor de 0.1% (Zevenhoven y Kilpinen, 2001).

Equilibrio secular: Cuando el tiempo de vida media del radioisótopo padre es mucho mayor comparada con la del radioisótopo hijo y sus actividades se igualan (Zhang et al., 2014)

Geoindicador: Medida de magnitud, frecuencia, rango y tendencias de los procesos naturales que tuvieron lugar en los últimos 100 años en la superficie terrestre (Berger, 1996).

Manglar: Los manglares comprenden a los bosques o matorrales de la zona de mareas de regiones costeras tropicales y subtropicales, que tienen la capacidad de crecer en suelos sujetos a la inundación periódica, y que presentan adaptaciones para tolerar el agua salada y cierto grado de viviparidad (es decir, que no dan un “fruto o semilla” propiamente dicho, sino un embrión con un grado de desarrollo relativamente avanzado, denominado “propágulo”). Los manglares son comunidades de halófitas facultativas que pueden crecer a diferentes salinidades, que van desde 0‰ (dulceacuícolas) hasta a hipersalinas (> 40 < 90‰), pero alcanzan su máximo desarrollo en condiciones salobres (~15‰; Flores-Verdugo, et al., 2007).

Marea: Cambio periódico (longitudinal) entre la elevación y disminución de la superficie de un cuerpo de agua como resultado de las interacciones gravitacionales entre el sol, la luna y la tierra (NOAA, 2000).

Marismas tropicales: Llanuras de inundación estrechas y semi-cerradas (por vegetación) que se localizan detrás de los bordes de las marismas y que son inundadas por mareas. En estos sitios, la zona intermareal está protegida de la acción del oleaje, lo cual permite la acumulación de material durante las mareas medias y altas. Las marismas tropicales pueden o no presentar vegetación halófila como matorrales de manglar y/o otras halofitas (por ejemplo *Salicornia* spp. y *Batis maritima*). El sinónimo en inglés correspondería a *tropical salt marshes* (Flores-Verdugo et al., 2007; Costa et al., 2009).

Nivel medio del mar: Media aritmética de mareas periódicas (NOAA, 2000).

Tasa de Acumulación Másica (TAM): Cantidad (g) de sedimento acumulada en un área específica (cm²) en un tiempo definido (año), su unidad es g cm² año⁻¹.

Tasa de Acumulación Sedimentaria (TAS): Longitud vertical (cm) de sedimento acumulado en un determinado tiempo (año), su unidad es cm año⁻¹.