

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA ABUNDANCIA DE LOS ELEMENTOS Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn EN LA FRACCIÓN LIMO-ARCILLA (LODO) DE LOS SEDIMENTOS DE FONDO DE LAGUNA GRANDE, EL CAZOTE Y LAGUNA ARENA DEL COMPLEJO LAGUNAR LAGUNA DE TACARIGUA, EDO. MIRANDA.

Presentado por: Br. Javier Eduardo González Rodríguez

Tutores: Dr. Ramón Montero

Dr. Williams Meléndez

Caracas, octubre de 2012

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE LA ABUNDANCIA DE LOS ELEMENTOS Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn EN LA FRACCIÓN LIMO-ARCILLA (LODO) DE LOS SEDIMENTOS DE FONDO DE LAGUNA GRANDE, EL CAZOTE Y LAGUNA ARENA DEL COMPLEJO LAGUNAR LAGUNA DE TACARIGUA, EDO. MIRANDA.

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el **Br. Javier E. González R.**
para optar por el título de
Licenciado en Química.

Caracas, octubre de 2012

ACTA

Los abajo firmantes, designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del Jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: “**ESTUDIO DE LA ABUNDANCIA DE LOS ELEMENTOS Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn EN LA FRACCIÓN LIMO-ARCILLA (LODO) DE LOS SEDIMENTOS DE FONDO DE LAGUNA GRANDE, EL CAZOTE Y LAGUNA ARENA DEL COMPLEJO LAGUNAR LAGUNA DE TACARIGUA, EDO. MIRANDA**” presentado por el Br. Javier E. González R., certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciado en Química.

Prof. Ramón Montero

Tutor

Prof. Williams Meléndez

Tutor

Prof. Carlos Barrios

Jurado

Prof. José V. Gutiérrez

Jurado

Dedicada a mi abuelita Paula Sánchez de González que ya no está físicamente conmigo, pero siempre estará en mi corazón y en mis pensamientos. También una gran dedicatoria a mi papá Rómulo González, quien ha luchado conmigo para poder cumplir con esta gran meta. Este logro se los debo a ustedes! Los amo!

AGRADECIMIENTOS

Primeramente le agradezco infinitamente a mi Dios, porque gracias a él he podido lograr muchas de mis metas propuestas y vencer todos los obstáculos que se me han presentado. Dios eres grande, te amo sobre todas las cosas!.

Le doy las gracias enormemente a quien fue, es y seguirá siendo mi segunda casa y que con ayuda de Dios, ayudó a vencer mis sombras y darme la oportunidad de convertirme en un profesional, mi gran casa de estudios, la Universidad Central de Venezuela (UCV), eternamente en deuda contigo.

Muchísimas gracias a mis padres y familia, especialmente mil gracias a quien siempre estuvo conmigo en todo momento, desde mi nacimiento hasta la actualidad, apoyándome y confiando en mi; jamás me alcanzarán las palabras ni el tiempo para agradecerle a Rómulo González, padre te quiero y amo con todo!, gracias por ser la gran persona que eres, gracias por todo, este logro te lo debo y es por ti!

Le agradezco también a mi grupo del centro de estudiantes y grandes amigos, Kizzy Ramírez, Francisco Ulloa, Kamal Nasser, Yola Fakhri, Vanessa Da Costa y Rubén Martíns, porque primero me dieron la oportunidad de trabajar con ustedes para los estudiantes, y segundo por los grandes momentos vividos de risa, alegrías y buenas vibras. Son lo máximo muchachos! Nunca olviden que son grandes!.

Muchas gracias a mi equipo y amigos de la preparaduría del Laboratorio de Instrumental Analítico, Gloria Escalona, Rafael Pérez, Jesús Valdivieso, Albani González, Jean Carlos Díaz y Claudia Montes, porque pudimos formar un buen grupo de preparadores en pro y ayuda a los estudiantes.

A mis grandes amigos y segunda familia, Daniela Toro, Raiza Barrios, Mayira Pérez, José Pinto, Yamelis Sancler, Mario Caporale, Yerallin Oropeza, Gimmy Medina,

John Santiago, María Rincón, Daniel Ramos y Rocío Rivera. Gracias por siempre preocuparse por mi y siempre estar en la disposición de ayudarme y aconsejarme, cada uno aportó un grano de arena que me ayudó a alcanzar esta meta de tantas que deseo lograr, los quiero muchísimo! y nunca olviden que siempre contarán conmigo en todo momento, para eso somos una familia!. Mis comadres Raiza y Daniela y mi amiga Mayira, no tengo palabras para agradecer todo lo que han hecho por mí, las quiero un mundo!

Muchísimas gracias a Denis Vegas y Rosimar Torrealba, porque en tan poco tiempo se han convertido para mí en grandes amigas, y hemos compartido excelentes momentos y experiencias, gracias por apoyarme y ser quienes son, nunca cambien su buena vibra y personalidad, las quiero mucho mis vidas!.

Debo darles las gracias a mis grandes amigos Gloria Escalona, Kizzy Ramírez, Kamal Nasser, Yola Fakhri y Jóneth Mendoza. A Gloria (mi glo) por ser una excelente persona, compañera, amiga, consejera, en fin, por muchas cosas incontables!. Te adoro con mi ser!. A mi esposa Kizzy, por tu humildad, carisma, y cariño hacia a mí. A Yolita por ser una amiga sincera, responsable y positiva en la vida, las adoro!. A Jóneth, mi bella amiga preocupada, gracias por estar siempre pendiente de mí, por aconsejarme y darme ánimos, por tu sencillez y perseverancia, por ser una excelente persona y amiga, te adoro!. Kamal eres una excelente persona, muchísimas gracias por la amistad amigo mio!, esta meta la logramos con sacrificios pero con una gran satisfacción.

Nunca dejaré de agradecerle a quien es mi jurado de tesis y sobre todo mi amigo, Carlos Barrios, muchísimas gracias por sus palabras de aliento y por ayudarme a ver las cosas de manera positiva. Gracias por siempre estar ahí en los momentos que más lo necesité, gracias por ser la gran persona que es y por ser mi amigo, personas como usted 1 en cada país, le tengo un grandísimo aprecio!. Mi gran admiración por su profesionalismo y disposición en ayudar a los demás. Infinitas gracias!. También debo

hacerle un agradecimiento a mi jurado, el profesor José V. Gutiérrez, por su gran profesionalismo y por invertir el tiempo en evaluar este proyecto de investigación.

Muchísimas gracias a mis tutores, el Dr. Ramón Montero y el Dr. Williams Meléndez, por aceptarme e invertir tiempo en este excelente proyecto, me han enseñado y ayudado a mejorar no sólo como profesional, sino también como ser humano. Gracias por su serenidad, por su gran conocimiento, respeto y humildad, son excelentes personas y profesionales, espero poderme convertir algún día en uno como ustedes.

Gracias al Instituto de Ciencias de la Tierra (ICT) por brindarme los recursos necesarios para poder culminar este Trabajo Especial de Grado, gracias a los profesores Manuel Martínez, Elisa Ochoa, Santiago Marrero, José V. Gutiérrez, Groy Garbán y María E. Rodríguez por los momentos compartidos. Muchísimas gracias al personal del Laboratorio de Absorción Atómica, especialmente a Fernando Ramos y Ángel Rivas, por brindarme su gran conocimiento y ayuda de la manera más cortés, desinteresada y humilde, son grandes profesionales y personas. También debo agradecerles a Luis Vílchez, Fernanda Oduber y Karla Zorrilla por estar a la disposición de ayudarme y aclarar mis dudas.

Muchísimas gracias a las profesoras María del Pino y Nora Malaver, por la atención, interés, información y generosidad brindada hacia mi durante este Trabajo Especial de Grado.

Gracias a todos mis amigos y familia que han recorrido conmigo este gran camino de alegrías, tristezas, obstáculos y satisfacciones personales. Dios los bendiga y los llene de muchos éxitos, felicidad y dicha!.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se determinó la concentración de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn en la fracción limo-arcilla (lodo) de los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua, Edo. Miranda. Para ello, fueron captadas 19 muestras de sedimentos de fondo utilizando una draga tipo petersen, la cual fue lanzada en los puntos 9 (PNLT 10), 10 (PNLT 11), 11 (PNLT 12) y 12 (PNLT 13) de Laguna Grande también en el punto 13 (PNLT 14) de El Cazote y en los puntos 15 (PNLT 17) y 17 (PNLT 18) de Laguna Arena. Cada una de las muestras fue tamizada en húmedo a 60 y 230 mallas, siendo esta última la fracción granulométrica objeto de estudio del presente trabajo. Aunado a ello se realizó una determinación de posibles fases en los sedimentos mediante termogravimetría, trabajando con distintas temperaturas, es decir, 100°C, 450°C, 550°C y 900°C. En general la distribución granulométrica espacial está predominada por la fracción < 63 µm o fracción lodo, exceptuando en el período de agosto de 2011 en donde predomina la fracción > 63 µm. Los elementos Al, Fe, K, Na, Ca, Mg, Zn, Co, Ni, Cr y Cu indican la presencia de oxihidróxidos de Fe, Mn y Al, micas y arcillas o aluminosilicatos en los sedimentos de fondo, además, el Fe, el Mg y el Ni también están asociados a la litología de la zona, el Na a la influencia del mar, el Ca a la presencia de conchas, el Cr y el Zn a actividades antrópicas, mientras que este último junto con Ni, Co y Cu se asocian fuertemente a la materia orgánica. El Mn se encuentra asociado a oxihidróxidos de Mn amorfos y cristalinos como manganita (MnO(OH)). Asimismo, el análisis realizado mediante termogravimetría indicó que la fase predominante en los sedimentos de fondo es la materia orgánica; además, las fases tipo oxihidróxidos amorfos y carbonatos representan una porción significativa, mientras que las de fases como oxihidróxidos cristalinos y arcillas son bajas en comparación con las otras fases. Asimismo, los factores de enriquecimiento (FE) e índice de geoacumulación (I_{GEO}) indicaron que las

concentraciones de los elementos traza Zn, Ni, Cr, Cu y Co no son significativas como para representar un riesgo de contaminación en la zona de estudio, estos pudieron ser transportados a través de los afluentes y el río Guapo que se conectan con el complejo lagunar y zona de estudio. Sin embargo, en el futuro pueden representar una amenaza letal para el sistema.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	
3.1. Sedimentos.....	7
3.2. Clasificación de los sedimentos según el tamaño de granos.....	10
3.3. Meteorización.....	12
3.3.1. Meteorización mecánica.....	13
3.3.2. Meteorización química.....	14
3.3.2.1. Hidrólisis.....	14
3.3.2.2. Hidratación.....	15
3.3.2.3. Solución.....	16
3.3.2.4. Oxidación.....	16
3.3.2.5. Reducción.....	16
3.3.2.6. Carbonatación.....	17
3.4. Lagos y lagunas.....	19
3.5. Metales pesados.....	20
3.6. Metales alcalinos y alcalinotérreos.....	23
3.6.1. Sodio (Na).....	23
3.6.2. Potasio (K).....	24
3.6.3. Calcio (Ca).....	25
3.6.4. Magnesio (Mg).....	26

3.7. Transporte de los metales traza en los sedimentos.....	26
3.8. Mecanismos fisicoquímicos.....	26
3.8.1. Adsorción.....	27
3.8.2. Floculación.....	27
3.8.3. Lixiviación.....	28
3.8.4. Intercambio iónico.....	28
3.8.5. Precipitación.....	28
3.8.6. Coprecipitación.....	29
3.8.7. Acomplejamiento- quelación.....	29
3.9. Fuentes de sedimentos atribuidas a la actividad humana o antrópica.....	30
3.10. Criterios para establecer la contaminación por elementos trazas y elementos mayoritarios.....	31
3.10.1. Comparación con valores base.....	31
3.10.2. Factor de enriquecimiento (FE).....	32
3.10.3. Índice de geocontaminación o geoacumulación (I_{GEO}).....	33
4. ANTECEDENTES.....	35
5. ZONA DE ESTUDIO	
5.1. Descripción general de la zona de estudio.....	45
5.2. Clima.....	47
5.3. Geomorfología.....	47
5.4 Hidrología.....	49
5.5. Flora.....	50
5.6. Fauna.....	51
5.7. Geología.....	51
5.8. Litología.....	52

6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 Etapa de oficina o pre-campo.....	54
6.2 Etapa campo.....	54
6.3. Etapa de laboratorio.....	57
6.3.1. Tratamiento físico.....	57
6.3.2. Determinación de fases minerales por termogravimetría.....	58
6.3.3. Tratamiento químico.....	59
6.3.3.1. Extracción secuencial con ácido clorhídrico (HCl) 1M y ácido nítrico (HNO ₃) concentrado.....	59
6.3.3.2. Extracción total con ácido fluorhídrico (HF) concentrado y agua regia.....	60
6.3.3.3. Análisis químico. Determinación de Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn.....	61
6.3.3.4. Tratamiento estadístico.....	63

7. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....64

7.1. Parámetros fisicoquímicos y profundidad de la columna de agua.....	64
7.2. Descripción física de las muestras de sedimento de fondo de la zona de estudio.....	75
7.3. Concentración de los elementos bajo estudio.....	81
7.3.1. Coeficiente de variación.....	81
7.3.2. Límite de detección.....	81
7.3.3. Distribución espacial.....	82
7.3.3.1. Aluminio (Al).....	83
7.3.3.2. Hierro (Fe).....	87
7.3.3.3. Manganeso (Mn).....	91
7.3.3.4. Calcio (Ca).....	96
7.3.3.5. Magnesio (Mg).....	100

7.3.3.6. Potasio (K).....	106
7.3.3.7. Sodio (Na).....	112
7.3.3.8. Cinc (Zn).....	119
7.3.3.9. Níquel (Ni).....	127
7.3.3.10. Cobalto (Co).....	136
7.3.3.11. Cobre (Cu).....	142
7.3.3.12. Cromo (Cr).....	148
7.3.4. Comparación de las concentraciones de Co, Cr, Cu, Ni y Zn con los valores base en sedimentos.....	151
7.3.5. Determinación de los indicadores ambientales índices de contaminación FE e (I_{GEO}) en las muestras de sedimento de la zona de estudio.....	155
7.3.6. Análisis termogravimétrico.....	159
8. CONCLUSIONES.....	164
9. RECOMENDACIONES.....	166
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167
11. APÉNDICE.....	174

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores base empleados en análisis de sedimentos para los elementos en estudio.....	32
Tabla 2. Categorías en base al factor de enriquecimiento.....	33
Tabla 3. Índice de geoacumulación y grado de contaminación asociado.....	34
Tabla 4. Características generales de las lagunas internas de interés del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua.....	47
Tabla 5. Valores base empleados en análisis de sedimentos para los elementos en estudio.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de sedimentación.....	9
Figura 2. Modelo de transporte de los sedimentos.....	9
Figura 3. Clasificación de los sedimentos atendiendo el tamaño de granos según Wentworth.....	11
Figura 4. Ciclo de metales de un lago. Se destacan los procesos asociados al comportamiento de oxihidróxidos de Fe y Mn.....	22
Figura 5. Mapa de la Laguna de Tacarigua, mostrando las lagunas a ser muestreadas.....	46
Figura 6. Mapa de la Laguna de Tacarigua mostrando los puntos a muestrear en el período Marzo 2010.....	55
Figura 7. Mapa de la Laguna de Tacarigua mostrando los puntos a muestrear en el período Marzo 2011.....	56
Figura 8. Mapa de la Laguna de Tacarigua mostrando los puntos a muestrear en el período Agosto 2011.....	56
Figura 9. Metodología seguida para el tratamiento físico de las muestras.....	58
Figura 10. Metodología seguida para el análisis termogravimétrico de la fracción lodo en las muestras de sedimento.....	59
Figura 11. Metodología seguida para el análisis químico de las muestras de sedimentos.....	62

Figura 12. Mapa de distribución del pH en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.....	66
Figura 13. Mapa de distribución del pH en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.....	66
Figura 14. Mapa de distribución del pH en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.....	67
Figura 15. Mapa de distribución de conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.....	68
Figura 16. Mapa de distribución de conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.....	68
Figura 17. Mapa de distribución de conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.....	69
Figura 18. Mapa de distribución de salinidad en ‰ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.....	70
Figura 19. Mapa de distribución de salinidad en ‰ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.....	70
Figura 20. Mapa de distribución de salinidad en ‰ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.....	71
Figura 21. Mapa de distribución de temperatura en $^{\circ}\text{C}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.....	72
Figura 22. Mapa de distribución de temperatura en $^{\circ}\text{C}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.....	72

Figura 23. Mapa de distribución de temperatura en °C en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.....	73
Figura 24. Mapa de distribución de profundidad en cm en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.....	74
Figura 25. Mapa de distribución de profundidad en cm en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.....	74
Figura 26. Mapa de distribución de profundidad en cm en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.....	75
Figura 27. Porcentajes en peso de la fracción >63 µm y la fracción <63 µm o lodo en los sedimentos de fondo de la zona de estudio en los períodos de marzo de 2010.....	78
Figura 28. Porcentajes en peso de la fracción >63 µm y la fracción <63 µm o lodo en los sedimentos de fondo de la zona de estudio en los períodos de marzo de 2011.....	79
Figura 29. Porcentajes en peso de la fracción >63 µm y la fracción <63 µm o lodo en los sedimentos de fondo de la zona de estudio en los períodos de agosto de 2011.....	80
Figura 30. Mapa modelo de ubicación de los puntos de muestreo para todos los períodos.....	82
Figura 31. Distribución espacial y temporal total de Al en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	84

Figura 32. Distribución espacial de Al en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	86
Figura 33. Distribución espacial y temporal total de Fe en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	89
Figura 34. Distribución espacial de Fe en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	90
Figura 35. Correlación de Fe/Al en el extracto HF _(c) y agua regia para todos los períodos muestreados.....	91
Figura 36. Distribución espacial y temporal total de Mn en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	92
Figura 37. Correlación de Fe/Mn en el extracto de HNO _{3(c)} para el período de marzo de 2010.....	93
Figura 38. Distribución espacial de Mn en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	95
Figura 39. Distribución espacial y temporal total de Ca en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	98
Figura 40. Distribución espacial de Ca en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	99
Figura 41. Correlación de Mn/Ca en el extracto de HCl 1M para agosto de 2011.....	100

Figura 42. Distribución espacial y temporal total de Mg en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	101
Figura 43. Correlaciones de Mg/Ca y Mg/Mn en el extracto de HCl 1M para el período marzo de 2011.....	102
Figura 44. Distribución espacial de Mg en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	104
Figura 45. Correlaciones de Mg/Mn y Al/Mg en el extracto de HNO _{3(c)} para el período de marzo de 2010 y marzo de 2011 respectivamente.....	105
Figura 46. Correlaciones de Al/Mg y Fe/Mg en el extracto de HF _(c) y agua regia para el período de marzo de 2011 y de agosto de 2011 respectivamente.....	105
Figura 47. Distribución espacial y temporal total de K en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	108
Figura 48. Distribución espacial de K en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	109
Figura 49. Correlaciones de K/Ca y Fe/K en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010 y el período de marzo de 2010.....	110
Figura 50. Correlación K/Al en el extracto de HNO _{3(c)} para todos los períodos de muestreo.....	110
Figura 51. Correlación de K/Mg en el extracto de HNO _{3(c)} para el período de agosto de 2011.....	111

Figura 52. Correlación de K/Al en el extracto HF _(c) para todos los períodos de muestreo.....	111
Figura 53. Correlación, K/Mg en el extracto de HF _(c) y agua regia para el período de marzo de 2011.....	112
Figura 54. Distribución espacial y temporal total de Na en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	114
Figura 55. Distribución espacial de Na en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	116
Figura 56. Correlación de K/Na y Fe/Na en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2011.....	117
Figura 57. Correlación de K/Na en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011.....	117
Figura 58. Correlaciones de K/Na y Mg/Na en el extracto de HNO _{3(c)} para el período de agosto de 2011.....	118
Figura 59. Correlación de Fe/Na en el extracto de HF _(c) y agua regia para el período de agosto de 2011.....	118
Figura 60. Distribución espacial y temporal total de Zn en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	120
Figura 61. Distribución espacial de Zn en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	123

Figura 62. Correlación de Zn/Ca en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.....	124
Figura 63. Correlación de Zn/Al en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.....	124
Figura 64. Correlación Zn/Mn en el extracto de HCl 1M para los períodos de marzo y agosto de 2011.....	125
Figura 65. Correlación Zn/Al en el extracto de HNO _{3(c)} para todos los períodos de muestreo.....	125
Figura 66. Correlación de Zn/Mn en el extracto de HNO _{3(c)} para el período de marzo de 2010.....	126
Figura 67. Correlación de Zn/Mg en el extracto de HNO _{3(c)} para los todos los períodos de muestreo.....	126
Figura 68. Distribución espacial y temporal total de Ni en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	128
Figura 69. Distribución espacial de Ni en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	131
Figura 70. Correlaciones de Ni/K y Ni/Al en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2011.....	132
Figura 71. Correlación de Co/Ni en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011.....	132

Figura 72. Correlación de Ni/Fe en el extracto de HCl 1M para todos los períodos muestreados.....	133
Figura 73. Correlación de Ni/Al en el extracto $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de marzo de 2011.....	133
Figura 74. Correlaciones de Ni/K en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.....	134
Figura 75. Correlación de Zn/Ni en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.....	135
Figura 76. Correlación de Ni/Al en el extracto $\text{HF}_{(c)}$ para todos los períodos muestreados.....	135
Figura 77. Correlaciones de Ni/Fe en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ para todos los períodos muestreados.....	136
Figura 78. Distribución espacial y temporal total de Co en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	137
Figura 79. Distribución espacial de Co en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	139
Figura 80. Correlación de Co/Ni en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011.....	140
Figura 81. Correlación de Ni/Co y Zn/Co en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de marzo de 2010.....	140
Figura 82. Correlación de Co/Fe en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.....	141

Figura 83. Correlaciones de Co/Mn y Co/Mg en el extracto de HNO _{3(c)} para el período de marzo de 2010.....	141
Figura 84. Distribución espacial y temporal total de Co en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	144
Figura 85. Distribución espacial de Co en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	145
Figura 86. Correlación Cu/Fe en el extracto de HCl 1M para todos los períodos de muestreo.....	146
Figura 87. Correlación de Cu/Co en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.....	146
Figura 88. Correlación de Cu/Fe en el extracto de HNO _{3(c)} para todos los períodos de muestreo.....	147
Figura 89. Correlación de Co/Cu en el extracto de HNO _{3(c)} para los períodos de marzo y agosto de 2011.....	147
Figura 90. Distribución espacial y temporal total de Cr en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.....	149
Figura 91. Distribución espacial de Cr en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.....	150
Figura 92. Comparación de los valores de concentración de Co en µg/g con el valor base reportado.....	153

Figura 93. Comparación de los valores de concentración de Cr en $\mu\text{g/g}$ con el valor base reportado.....	153
Figura 94. Comparación de los valores de concentración de Cu en $\mu\text{g/g}$ con el valor base reportado.....	154
Figura 95. Comparación de los valores de concentración de Ni en $\mu\text{g/g}$ con el valor base reportado.....	154
Figura 96. Comparación de los valores de concentración de Zn en $\mu\text{g/g}$ con el valor base reportado.....	155
Figura 97. Factores de enriquecimiento (FE) de los elementos trazas para todos los períodos de muestreo.....	158
Figura 98. Índice de geoacumulación (I_{GEO}) de los elementos trazas para todos los períodos de muestreo.....	159
Figura 99. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para todos los períodos.....	161
Figura 100. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para marzo de 2010.....	162
Figura 101. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para marzo de 2011.....	162

Figura 102. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para agosto de 2011.....163

3. INTRODUCCIÓN

En la superficie de la Tierra, los sedimentos junto con las rocas sedimentarias ocupan un 75% en área, con respecto al 25% de las rocas ígneas y metamórficas, lo cual indica la gran importancia de los sedimentos y rocas sedimentarias. Por otra parte, las cuencas sedimentarias están constituidas, por sedimentos y rocas de este tipo, lo cual las relaciona directamente con los ambientes sedimentarios y con la dinámica de meteorización, erosión y transporte de los materiales ^[1].

Durante el proceso de meteorización, las rocas en la superficie son desintegradas y descompuestas, al erosionar se elimina parte del material por acción de un agente dinámico como el agua o el viento y finalmente dicho material erosionado es transportado desde zonas elevadas hasta zonas con menor elevación ^[2]. Este material es lo que se conoce como sedimento, que con el tiempo se litifica para formar una roca sedimentaria ^[1].

Los sistemas costeros son también llamados ambientes sedimentarios costeros, ya que contienen gran cantidad de sedimentos depositados, esto como consecuencia del proceso de meteorización. Los sistemas costeros son áreas intermareales y submareales ubicadas por encima de la plataforma continental, a una profundidad de 200 m, y una franja adyacente tierra adentro hasta un máximo de 100 km, a partir de la costa ^[3]. También se pueden definir como una unidad funcional que comprende todos los organismos de un lugar determinado que interactúan entre sí y con su entorno. Con este enfoque, se dividió el mundo en 49 grandes sistemas marinos, entre los que figura el Mar Caribe ^[4].

La zona costera caribeña contiene muchos ecosistemas productivos, biológicamente complejos. Entre los más importantes se incluyen los arrecifes de coral, pastizales, manglares, lagunas costeras, playas y comunidades de los fondos fangosos. Los manglares juegan un papel esencial en la retención de los flujos de agua dulce y

sedimentos, porque crean condiciones para que las aguas se mantengan limpias en la zona costera, lo que facilita el crecimiento de pastizales y corales ^[4].

Los pastizales disminuyen la velocidad de la corriente y permiten que el sedimento se deposite, ejerciendo también un papel en la limpieza del agua. Por su parte, los arrecifes constituyen una barrera efectiva que disipa gran parte de la energía del oleaje, crean zonas de calma y permiten la acumulación de sedimentos finos, los cuales ofrecen un sustrato ideal para el crecimiento de pastizales y manglares. Debido a los procesos de erosión, los corales constituyen una fuente de sedimentos carbonaticos que contribuyen a la estabilización de los pastizales ^[4].

Una de las zonas costeras en las que ocurre la depositación de los sedimentos son las lagunas, éstos son uno de los tantos reservorios de agua que se pueden encontrar en nuestro planeta Tierra. La laguna es un espacio acuático normalmente cerrado y con agua quieta o estancada ^[5]. Los sedimentos que allí se depositan pueden contener determinadas concentraciones de metales, debido a su gran capacidad de adsorción y al tamaño de los granos que lo conforman, ya que estos representan una gran importancia en cuanto al área superficial de los sedimentos.

Los sedimentos poseen diferentes fracciones granulométricas, las cuales son clasificadas en cuatro tipos según el tamaño de sus granos; a saber: gravas, arenas, limos y arcillas, siendo estas dos últimas (fracción lodo), las que poseen una mayor capacidad de adsorción de metales, debido a su gran área superficial. Asimismo, en algunos estudios como el de De Freitas (2008) y Rivas (2008) son realizados análisis de distribución granulométrica, a fin de cuantificar el porcentaje de los granos ^[7,21]. Para ello, se procede a la separación y clasificación de las distintas fracciones dependiendo del tamaño de sus clastos, esto utilizando la técnica de tamizado.

Por otra parte, el transporte y movilidad de metales pesados en sedimentos dependen no solamente de su concentración, sino también de la especiación y solubilidad de sus compuestos. La retención de metales en sedimentos está

determinada por ciertos procesos dominantes, uno de ellos consiste en que el metal se adsorbe en la matriz del sedimento como ión fácilmente intercambiable; también cuando el metal se adsorbe con una alta afinidad a sitios específicos en la matriz del sedimento. Finalmente y no menos importante, se presenta la adsorción en la que el metal está fuertemente enlazado a la fase sólida del sedimento. Este tipo de reacción incluye la formación de complejos internos y externos, precipitación superficial e incorporación de iones del metal en la estructura mineral del sedimento ^[6]. Además cabe destacar que los sedimentos son de origen natural, pero estos posteriormente pueden ser afectados por los factores antrópicos; esta acción humana puede conllevar a la retención de metales en la matriz del sedimento.

Las actividades antrópicas son factores muy importantes en cuanto al aporte de metales a los cuerpos de agua, sean estos ríos, lagos o estuarios. Cuando la actividad humana comienza a ser importante, los componentes del cuerpo de agua pueden variar considerablemente, produciéndose problemas de contaminación. Los afluentes contaminantes, asociados a las actividades humanas se clasifican en domésticos, agropecuarios, drenaje de minas e industriales, entre otros. Existe una cantidad importante de productos derivados de las actividades humanas que, una vez presentes en los reservorios de agua, producen alteraciones ecológicas importantes ^[7].

En el caso del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua, se presenta un importante desarrollo turístico, pesquero y agrícola. A partir de los años 80 se generó un amplio desarrollo de edificaciones turísticas y recreacionales con lo que se construyeron numerosos hoteles y complejos recreacionales en los alrededores del mismo. Esto podría explicar el por qué la mayoría de los problemas en dicho complejo lagunar se relacionan con la intensa actividad humana en sus alrededores ^[8].

Por otra parte, debido a las características geomorfológicas de su entorno, la Laguna de Tacarigua tiene como destino desaparecer en un tiempo geológico

relativamente corto, producto de la acumulación de sedimentos provenientes de la cordillera de la costa. Este proceso natural se ha visto acelerado con el incremento del aporte sedimentario producto de la erosión y deforestación de los bosques en las cabeceras de sus afluentes. En 1963 se construyó el canal Madre Casañas que hizo desembocar al río Guapo en la laguna, por lo cual el aporte sedimentario se incrementó. En la actualidad se presenta una elevada tasa de sedimentos en dicho complejo lagunar aportada por los ríos y el mar ^[9].

Aunado a ello, las actividades antrópicas desarrolladas en la cuenca del río Guapo, que involucran el uso de fertilizantes, pesticidas y herbicidas en las áreas destinadas a fines agropecuarios, un aumento en los desechos orgánicos generados por el ganado bovino y porcino, la creación de empresas dedicadas a la matanza de cerdos, a la industria maderera y a las aguas residuales generadas por las industrias y por las poblaciones asentadas en dicha cuenca, cuyo destino final podría alcanzar a la Laguna de Tacarigua.

Este proceso podría ocurrir ya sea mediante la lixiviación de los suelos sometidos a tales actividades o por el aporte de sedimentos provenientes de las áreas afectadas, cuyo destino final podría ser el sistema Lagunar Laguna de Tacarigua.

Por lo antes señalado, en el presente trabajo de investigación se propone estudiar la abundancia de los metales Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, Na, Pb y Zn en la fracción limo-arcilla (lodo) de los sedimentos de fondo de las lagunas: Laguna Grande, Laguna Arena y El Cazote, pertenecientes al Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua. Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto “*Escenarios potenciales de afectación del cambio climático sobre el componente biótico y abiótico del ecosistema lagunar Parque Nacional Laguna de Tacarigua (PNLT). Estrategias que contribuyan al desarrollo sostenible del sistema lagunar, en beneficio de la comunidad*”

de Tacarigua de la Laguna”, financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

4. OBJETIVOS:

2.1. General:

Determinar la concentración y distribución de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Mn, Ni, Pb y Zn en la fracción limo-arcilla (lodo) de los sedimentos de fondo de Laguna Grande, Laguna Arena y El Cazote, del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua, estado Miranda, y su impacto ambiental en dicho ecosistema.

2.2. Específicos:

- Determinar el porcentaje de la fracción limo-arcilla (lodo) en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, Laguna Arena y El Cazote de la zona en estudio.
- Determinar la concentración de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Na, Mn, Ni, Pb y Zn en los períodos de lluvia y sequía, en la fracción limo-arcilla (lodo) de los sedimentos de fondo de la zona en estudio.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación se realizará una revisión bibliográfica referente a algunos aspectos teóricos que son necesarios para comprender el comportamiento de los metales pesados en los sedimentos de fondo del complejo lagunar a estudiar. Por otra parte, se describen las características de la zona de estudio, clima, geomorfología, hidrología, flora, fauna y geología. Además son citadas algunas investigaciones nacionales e internacionales que guardan relación con el presente trabajo de investigación.

3.1. Sedimentos

El término sedimento es usado generalmente para describir el material depositado en el fondo de sistemas acuáticos, que consisten en una mezcla de minerales, fragmentos de rocas, precipitados y materiales orgánicos de origen natural, que son transportados por agentes como corrientes de agua y viento, para finalmente ser depositados en áreas conocidas como cuencas ^[10]. En la figura 1 se ve reflejado el proceso de sedimentación en áreas o zonas conocidas como cuencas o depósitos sedimentarios.

La meteorización y erosión de las rocas preexistentes (ígneas, metamórficas y sedimentarias) originan los fragmentos, granos y partículas que constituyen el sedimento, el cual es transportado y continuamente modificado hasta los lugares de depósito final, denominados ambientes sedimentarios. En la figura 2 se muestra el modelo de transporte de los sedimentos en un cuerpo de agua, en donde se destacan la saltación, tracción, rodado de partículas, entre otros. Los sedimentos también pueden formarse a partir de soluciones ricas en ciertos minerales, que una vez sobresaturadas, precipitan originando minerales como la calcita ^[1].

Los sedimentos están constituidos por compuestos orgánicos e inorgánicos, provenientes de fuentes internas o externas al cuerpo de agua. La materia orgánica de los sedimentos está compuesta de microorganismos (fitoplancton, zooplancton y bacterias), restos de macrófitas, organismos de gran tamaño y derivados de la descomposición de la materia orgánica. Por su parte, la materia inorgánica está compuesta por elementos provenientes de la erosión de las rocas causada por las corrientes de agua y el viento, el cual arrastra y levanta partículas, mientras que la lluvia o granizo impacta el terreno movilizándolo partículas de roca y suelo, que son transportadas hacia los sistemas acuáticos. Minerales tales como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SiO_2 y CaCO_3 pueden ser transportados a ríos o lagos, o también pueden formarse dentro del sistema acuático a partir de compuestos y productos solubles ^[10].

Otros procesos como reacciones químicas que ocurren en el medio acuoso, aportan compuestos que se depositan en el fondo o permanecen en suspensión, mientras que los organismos muertos (conchas, esqueletos) del sistema acuático, aportan carbonato de calcio y sílice (sedimentos biogénicos y materia orgánica), y la actividad volcánica aporta material particulado, el cual es liberado a la atmósfera y posteriormente puede ingresar por depositación a cuerpos de aguas naturales como ríos y lagos ^[10].

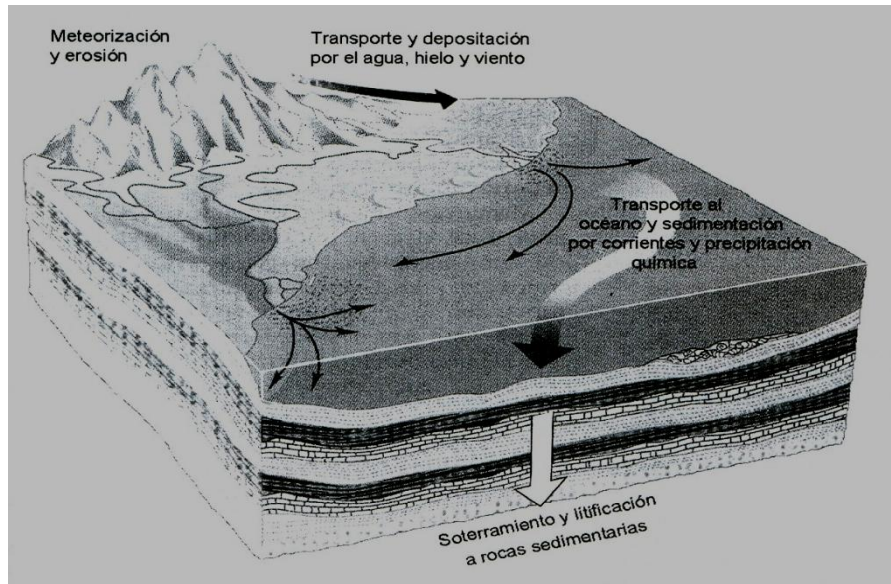


Figura 1 ^[11]. Proceso de sedimentación.

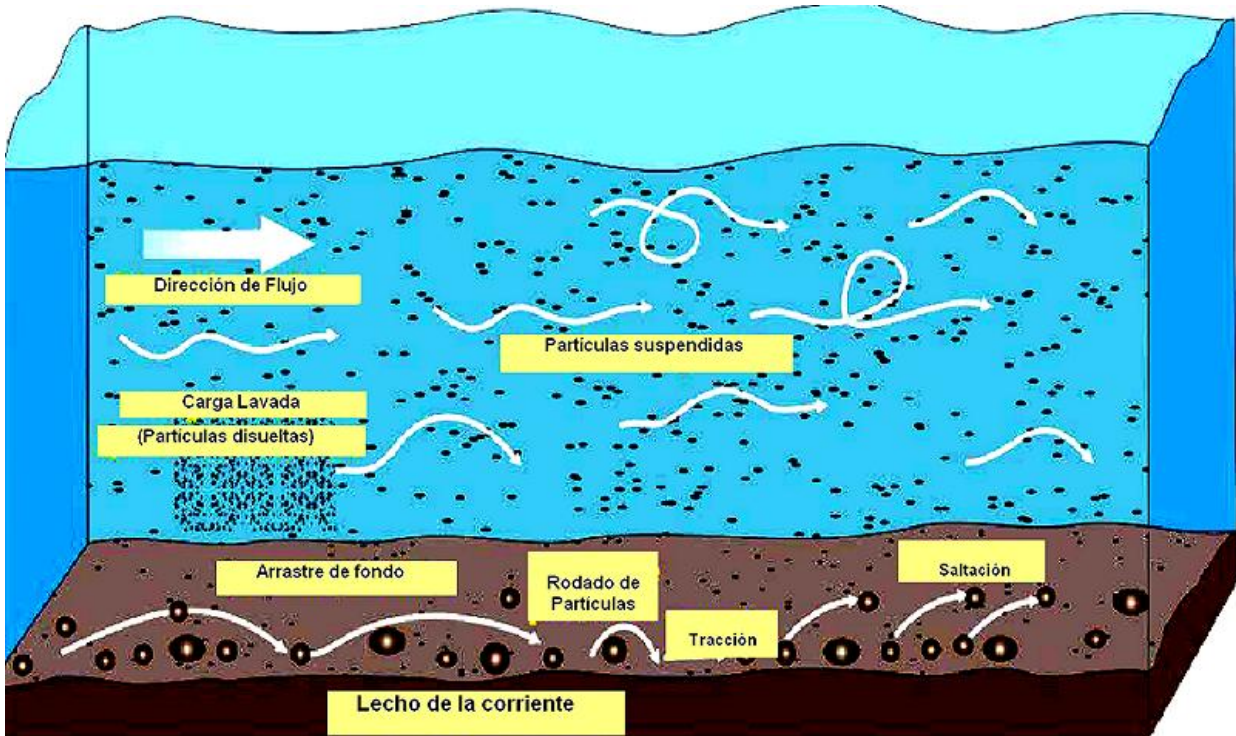


Figura 2 ^[22]. Modelo de transporte de los sedimentos.

3.2. Clasificación de los sedimentos según el tamaño de granos

Los sedimentos son clasificados atendiendo a su tamaño de granos, una importante característica de los mismos, ya que de esto depende la capacidad de absorción de metales, es decir, el metal puede adsorberse con una alta afinidad a sitios específicos en la matriz del sedimento ^[6].

Atendiendo al tamaño de grano, los sedimentos pueden ser clasificados como grava, arena, limo y arcilla, reflejando en ello las condiciones de sedimentación. La grava es de diámetro de grano mayor a 2 mm o su equivalente solidificado como roca sedimentaria el conglomerado, el cual requiere corrientes fuertes como las referidas a los ríos que fluyen con alta velocidad para su transporte; La arena es de diámetro de grano entre 2 y 0,063 mm o su equivalente solidificado arenisca, estos sedimentos pueden ser transportados por vientos fuertes formando dunas o por corrientes moderadas como las asociadas a ríos o en lugares cercanos de la costa. El lodo concebido como la mezcla de los sedimentos limo-arcilla es de diámetro de grano menor 0,063 mm o su equivalente litificado las limolitas o las lutitas, indican áreas de sedimentación de aguas tranquilas ^[12,13]. La figura 3 presenta la escala granulométrica de clasificación de los sedimentos según Wentworth:

U.S. Standard Malla del Tamiz		Milímetros	Escala de Wentworth		
GRAVA		4096	Bloques (Cantos)	Gravas Conglomerados	
		1024			Cantos (Guijarros)
		256	Guijarros		
		64			Gránulos
		16			
	5	4			
	6	3.36			
	7	2.83			
	8	2.38			
	10	2.00	Arena muy gruesa		Areniscas
12	1.68				
14	1.41				
16	1.19				
18	1.00				
20	0.84				
25	0.71	Arena gruesa			
30	0.59				
35	0.50	Arena Media			
40	0.42				
45	0.35				
50	0.30				
60	0.25	Arena fina			
70	0.210				
80	0.177				
100	0.149				
120	0.125	Arena muy fina			
140	0.105				
170	0.088				
200	0.074				
230	0.0625	Limo Grueso	Limolitas		
270	0.053				
325	0.044				
	0.037				
LODO	LIMO		0.031	Limo medio	
			0.0156		Limo fino
			0.0078		
			0.0039		Limo muy fino
ARCILLA			0.0020	Arcilla	
			0.00098		
			0.00049		
			0.00024		
	0.00012	Lutitas			
	0.00006				

Figura 3 ^[11]. Clasificación de los sedimentos atendiendo el tamaño de granos según Wentworth.

3.3. Meteorización

Es el proceso que afecta a rocas y minerales, produciendo la disgregación de minerales existentes y síntesis de nuevos minerales; en otras palabras, la meteorización es el conjunto de procesos de disgregación y alteración que sufren las rocas y minerales cuando estos quedan expuestos a la atmósfera ^[54]. La meteorización se produce a consecuencia de que los minerales se vuelven inestables en las condiciones fisicoquímicas, presión y temperatura, del ambiente superficial ^[14].

Otra forma de definir la meteorización puede ser la siguiente: es la suma de procesos derivados de la exposición a los agentes atmosféricos como la presión y la temperatura, en o cerca de la superficie de la Tierra; por medio de los cuales las rocas son químicamente alteradas o físicamente disgregadas en fragmentos, con o muy poco transporte ^[11].

Los agentes atmosféricos actúan sobre las rocas y sedimentos en función de las condiciones climáticas, ejerciendo un movimiento del material expuesto, cuyo resultado es la erosión de los materiales y de la superficie terrestre en general. Previo a estos procesos está la meteorización, ya que la misma implica la acción permanente de la atmósfera (H₂O, O₂, etc.) sobre los materiales, con un primer estado de alteración de suelos, sedimentos y rocas *in situ* ^[1].

Cuando se produce la meteorización, generalmente ocurren dos procesos: mecánico y químico. El mecánico o también llamado físico conduce a la transformación física de los minerales o disgregación, y el químico conduce a cambios en la composición o en la estructura y se denomina transformación ^[14].

3.3.1. Meteorización mecánica

La meteorización física o desintegración produce una disminución en el tamaño de las rocas y los minerales sin afectar su composición. Los factores más importantes que la producen son los cambios de temperatura, las presiones que derivan del congelamiento del agua retenida en poros y fisuras, o de la expansión de minerales arcillosos presentes en fisuras, al hidratarse o por acción mecánica debida a la energía cinética que adquiere cuando cae en forma de gotas de lluvia, y por el correr de los ríos; también se produce desintegración por efecto de plantas y animales ^[14].

Por una parte, el impacto directo de las gotas de lluvia sobre las rocas produce el desprendimiento de partículas; por otro lado, el agua de escorrentía, cuando posee sólidos en suspensión, adquiere una alta capacidad de disgregación debida al choque entre las partículas y las rocas que conforman el cauce. El viento también es un agente transportador importante cuando moviliza partículas de arena, puede imprimirle energía cinética suficiente como para producir la fracturación de los granos transportados cuando chocan con obstáculos, así como el desprendimiento de partículas de éstos, conllevando a la disminución de su tamaño y a la modelación de su forma ^[14].

Las plantas también tienen un efecto disgregador, es así como musgos y líquenes crecen en algunas rocas produciendo una leve capa superficial de material disgregado. Plantas superiores, como árboles con sus raíces creciendo sobre material rocoso fisurado, pueden tener también efecto de disgregación. Sin embargo, este proceso es menos importante cuando se compara con el producido por el agua, viento y los cambios de temperatura ^[14].

3.3.2. Meteorización química

La meteorización química consiste en procesos que descomponen los componentes de las rocas y las estructuras internas de los minerales. Estos procesos convierten los constituyentes en minerales nuevos o los liberan al ambiente circundante. Durante la transformación, la roca original o el sedimento se descompone en sustancias que son estables en el ambiente superficial y se mantendrá esencialmente inalterados mientras permanezcan en un ambiente similar al que se formó ^[1].

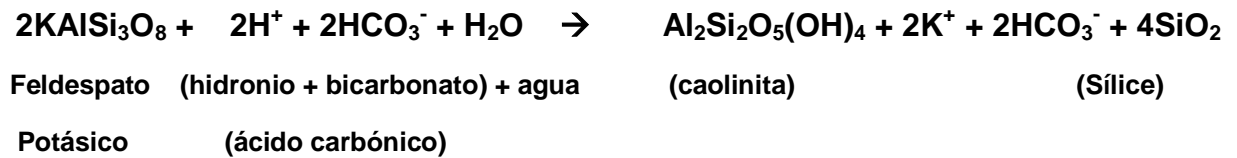
El agua es el agente de meteorización química más importante, ya que es un buen disolvente, cantidades pequeñas de materiales disueltos dan como resultado un aumento de la actividad química para las soluciones de meteorización ^[1]. Los materiales solubles pasan a la solución del sedimento y nuevos minerales son sintetizados.

Las reacciones más importantes que ocurren en la descomposición o meteorización química son la hidrólisis, hidratación, solución, oxidación, reducción y carbonatación.

3.3.2.1. Hidrólisis

Esta es una de las reacciones más importantes en la meteorización de los minerales, especialmente feldspatos y micas ^[14]. Es una reacción espontánea con H₂O de meteorización química que continúa hasta que se obtiene un nuevo equilibrio termodinámico ^[15]. El grupo mineral más común, el de los aluminosilicatos, se descompone principalmente mediante el proceso de hidrólisis. Es una reacción química entre los iones hidronio (H⁺) y los iones hidroxilo (OH⁻) del agua con los iones de un mineral. Los iones hidronio reemplazan realmente a los iones positivos de los minerales. Esta sustitución cambia la composición de los minerales, liberando

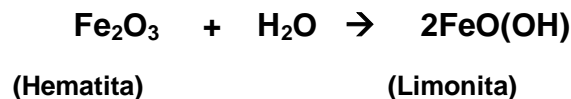
sustancias solubles. Todos los feldespatos son silicatos de estructura tridimensional (tectosilicatos), pero cuando son alterados producen compuestos en solución y minerales arcillosos como la caolinita, que son los conocidos filosilicatos ^[1]. La meteorización del feldespato puede ser descrita a través de la siguiente reacción:



En esta reacción, los iones hidronio atacan a los iones de la estructura de la ortoclasa (feldespato de potasio), algunos iones liberados se incorporan a un mineral arcilloso en desarrollo, mientras otros se van en solución. Del lado derecho de la reacción está la sílice excedente, la cual no encaja en la estructura del mineral arcilloso ^[1].

3.3.2.2. Hidratación

Consiste en la absorción de moléculas de agua dentro de la estructura interna de un mineral. Este fenómeno provoca una expansión que alcanza un 60% en las arcillas. La admisión de agua acelera los procesos de disolución, oxidación, reducción e hidrólisis ^[1]. Un buen ejemplo de este proceso es la transformación de la hematita (Fe_2O_3) responsable del color rojo de los suelos, hacia goethita (limonita) de color amarillo ^[14]:



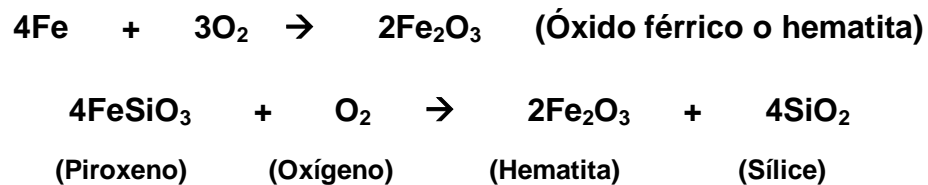
Sin embargo, si se produce una deshidratación, entonces la goethita puede volver a hematita produciendo un cambio de coloración del amarillo al rojo.

3.3.2.3. Solución

Ciertos minerales son más solubles que otros según su radio iónico y su valencia; en otras palabras, su solubilidad depende de su geometría y su carga. Conjuntamente con el proceso de hidrólisis se producen efectos de solución. ^[14,54]

3.3.2.4. Oxidación

La oxidación se refiere a las reacciones con el oxígeno para formar óxidos o si interviene el agua, hidróxidos. De este modo, el hierro se oxida cuando se combina con el oxígeno para formar la hematita (óxido de hierro) ^[14]. Asimismo, minerales que contienen hierro y azufre pueden presentar estos efectos de oxidación ^[14].



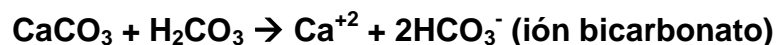
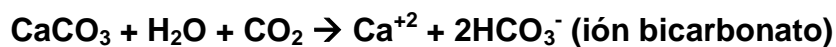
3.3.2.5. Reducción

Esta es una reacción opuesta a la oxidación y se acelera bajo condiciones de saturación de agua o bajo potencial de oxidación (Eh) y baja concentración de bases; causa la formación de sedimentos orgánicos y otros con acumulación de sulfuros. La reducción consiste en la liberación de oxígeno de un mineral, pasando a formar parte del ambiente circundante; mientras que deja la estructura del mineral, la oxidación comienza a disminuir y el número de elementos reducidos aumenta ^[1,54].

3.3.2.6. Carbonatación

Este proceso ocurre cuando la disolución de minerales e iones aumenta considerablemente por la presencia de CO_2 , formando ácido carbónico (H_2CO_3) con el agua de lluvia percolante ^[1]. En otras palabras, el CO_2 en contacto con el agua se hidroliza y tiende a producir H_2CO_3 , que fácilmente se combina con el Ca formando CaCO_3 ; por su parte, este carbonato en presencia de un exceso de ácido carbónico, forma bicarbonato, mucho más soluble que el carbonato ^[14].

La atmósfera está compuesta alrededor del 0,03% es dióxido de carbono, pero en su mayor medida de nitrógeno y oxígeno, lo que hace que la lluvia sea ligeramente ácida ^[1]. La formación de carbonato es uno de los mecanismos más frecuentes por medio de los cuales la concentración de Ca en solución disminuye, permitiendo, por lo tanto, que se descompongan nuevas cantidades de minerales calcáreos. Todas estas reacciones pueden formar un ciclo complejo que controla la formación de carbonato y la descomposición de los minerales calcáreos ^[14]. La calcita ante una solución ácida como el agua fresca de lluvias se disuelve de acuerdo a las reacciones a que seguidamente se indican ^[1]:



La meteorización en resumen, modifica las rocas “in situ”; mientras que, la erosión continúa modificando las rocas y fragmentos derivados de proceso; seguidamente, los fragmentos generados son transportados ya sea por el viento, el agua o la gravedad, en forma suspendida o en solución. Estos son posteriormente depositados en áreas donde ocurre el depósito final de los sedimentos ^[1].

En el mismo orden de ideas, se puede señalar que un ambiente sedimentario es una unidad geomorfológica característica en la cual los procesos físicos, químicos y biológicos actúan sobre la depositación y erosión para determinar algunas características particulares sobre el depósito sedimentario generado ^[11]. En este sentido, los ecosistemas costeros se denominan también ambientes sedimentarios, ya que en ellos yace una gran cantidad de sedimentos depositados.

Los ecosistemas costeros no sólo abarcan una amplia gama de tipos de hábitats y una enorme riqueza de especies, sino que además albergan nutrientes, filtran contaminantes provenientes de los sistemas continentales de agua dulce y ayudan a proteger la línea costera de la erosión y las tormentas. Al final de la línea costera está el océano, que cumple un papel fundamental en la regulación de la hidrología y el clima ^[3].

El ecosistema costero característico es el manglar, uno de los más ricos del planeta en producción de energía, del que dependen buena parte de los arrecifes coralinos, y junto con un sistema estuarino, está caracterizado por ser un cuerpo de agua en la zona costera donde existe una comunicación restringida con el mar abierto que permite la evolución de las etapas larvales de incontables especies marinas y de agua dulce, que desarrollan allí los primeros estadios de su ciclo vital ^[4,16]. Las aves residentes y migratorias, como garzas, águilas pescadoras, gavilanes caracoleros asociadas a los manglares, encuentran en ellos una oferta formidable de recursos alimenticios ^[16]. En la actualidad se considera como uno de los ecosistemas costeros relevantes (dependiendo del clima) en el Mar Caribe, debido a su extensión regional ^[4]. Dentro del manglar puede existir un sistema de lagunas costeras que constituyen zonas de crianza para los camarones comerciales y donde se desarrollan, de forma natural, especies de peces de importancia comercial como lisas, mojarras y robalos, entre otras ^[4].

3.4. Lagos y lagunas

Los lagos y lagunas son sistemas abiertos y dinámicos, que ocupan generalmente depresiones naturales, por lo que están localizados en el centro de cuencas de drenaje relativamente simétricas, con entradas de agua desde varios puntos. Las lagunas presentan características similares a los lagos, se diferencian básicamente en que las dimensiones de éstas son menores. Las entradas y salidas de un lago son determinantes en su composición. Dentro de los principales factores que afectan la composición química y biológica de las lagunas con relación a su cantidad y calidad, se encuentran: el clima, la geomorfología, el sustrato geológico, la vegetación terrestre, las actividades humanas y la contaminación atmosférica ^[10].

Las zonas costeras y los océanos del mundo están siendo afectados por un vasto abanico de contaminantes. Éstos se pueden clasificar de manera amplia como químicos tóxicos, que incluyen especies como químicos orgánicos, metales pesados y desperdicios radiactivos, entre otros; nutrientes principalmente originados por el uso de fertilizantes agrícolas y provenientes de lodos cloacales, sedimentos y desperdicios sólidos. La contaminación bacteriana es un caso especial que por lo general se asocia a la contaminación por nutrientes, mientras que la contaminación por hidrocarburos a través de derrames y filtración, incluye elementos provenientes de sustancias tóxicas, nutrientes y sedimentos. La mayor parte de la contaminación de las zonas costeras proviene del continente. En algunas regiones como América del Norte y Europa, la contaminación por metales pesados y químicos tóxicos ha disminuido en décadas recientes paralelamente con la disminución en el uso de estos compuestos, aunque de todas maneras estos agentes contaminantes continúan siendo un problema en todo el mundo. La contaminación por nutrientes, especialmente NO_3^- y PO_4^{3-} , ha aumentado en el tiempo de forma dramática. El uso cada vez mayor de fertilizantes, el aumento en el volumen de las aguas residuales de origen doméstico e industrial, son todos factores que contribuyen a este aumento ^[3].

3.5. Metales pesados

Los elementos químicos, que generalmente son tóxicos para los seres vivos cuando están en niveles no aceptables se les denomina metales pesados, como por ejemplo: Ni, Cu, Pb, Hg, etc. Estos metales difieren de los compuestos orgánicos tóxicos como los pesticidas en que son totalmente no degradables, con lo que se acumulan en los sistemas ambientales, de ahí su toxicidad. Los últimos sumideros de los metales pesados son los suelos y los sedimentos ^[17]. Por otro lado, dichos metales se presentan en el sedimento en diversas formas químicas y mineralógicas, donde pueden tener mucha movilidad, toxicidad biológica y comportamiento químico ^[18].

Todos los metales pesados que están presentes en las aguas superficiales se encuentran en fases coloides, particuladas o disueltas; cabe señalar que las concentraciones de metales en fases disueltas son generalmente bajas del orden de 10^{-9} M. Los coloides formados por especies metálicas se pueden encontrar en forma de: 1) hidróxidos, óxidos, silicatos o sulfuros; y 2) fijados a la arcilla, sílice o a la materia orgánica ^[10].

Los sedimentos y sólidos suspendidos, como resultado de alteraciones fisicoquímicas tales como condiciones reductoras, mecánicas asociadas al dragado, construcción de puentes y canalizaciones de procesos biológicos como la oxidación de materia orgánica, pueden liberar a la columna de agua, por desorción, componentes que en algunos casos pueden ser tóxicos tales como Cd y Hg, entre otros. Algunos de ellos ejercen demanda de oxígeno para su estabilización, otros más tóxicos afectan a la biota, alterando la ecología del medio circundante al deteriorar la calidad química de la columna de agua, generando riesgos para la salud humana y para el aprovechamiento integral del recurso ^[10].

La existencia de sedimentos contaminados, constituye en algunos casos una amenaza potencial y un aporte efectivo de contaminación a la columna de agua. A su vez, las diferentes capas de sedimentos formadas en una determinada profundidad, son el testimonio de las condiciones de equilibrio alcanzadas frente a una determinada situación de descarga contaminante, derivada por ejemplo, del efluente de una planta industrial de la zona ^[10].

Las concentraciones de los diferentes elementos contaminantes vertidos al cuerpo de agua quedan registradas históricamente en el sedimento en el cual se almacenan. Los cambios en los niveles de equilibrio, vinculados a un mejor o peor tratamiento de los efluentes o a la desaparición de la planta industrial, se ven reflejados en las capas de acumulación de sedimentos formadas durante los períodos de operación respectivos. La interfaz sedimento-agua, es la zona a través de la cual hay transferencia de masa desde y hacia los sedimentos. Durante este proceso pueden influir condiciones físicas, químicas y biológicas propias de dicha interfase ^[10].

Las formas solubles de los metales pesados, son generalmente iones o quelatos organometálicos no ionizados o acomplexados. La solubilidad de los metales traza en las aguas superficiales es predominantemente controlada por el pH del agua, el tipo y la concentración de los ligantes en los cuales el metal podría fijarse, el estado de oxidación de los componentes y las condiciones reductoras del sistema ^[10]. En la figura 4 se puede observar el ciclo de metales en un cuerpo de aguas, donde se destacan los procesos asociados al comportamiento de oxihidróxidos de Fe y Mn.

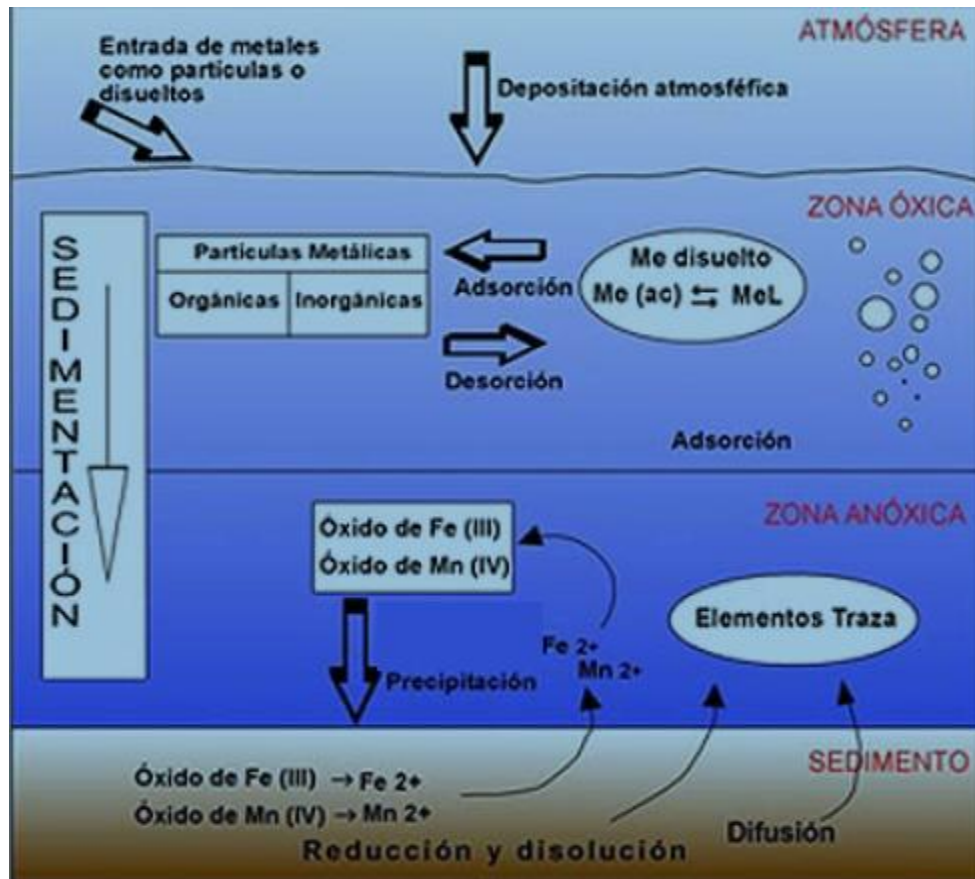


Figura 4 ^[10]. Ciclo de metales de un lago. Se destacan los procesos asociados al comportamiento de oxihidróxidos de Fe y Mn.

Por otra parte, los minerales primarios se descomponen durante la meteorización, los metales alcalinos y alcalinotérreos tienden a permanecer en la solución, y algunos de los micronutrientes metálicos pasan a formar parte de los minerales secundarios o minerales arcillosos ^[19].

3.6. Metales alcalinos y alcalinotérreos

Para este trabajo en particular, se realizará un estudio de los metales alcalinos y alcalinotérreos Na, K, Ca y Mg en este sentido, se hará una explicación detallada de las principales fuentes de estos metales, así como otros factores de importancia para el mismo.

3.6.1. Sodio (Na)

Es el más abundante entre los elementos alcalinos, es común en la corteza terrestre, y es el ion metálico más abundante en agua de mar. Muchos minerales silicatados contienen este mineral en su estructura, tales como feldespatos y plagioclasas, $(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$.

El ion Na^+ es relativamente abundante en agua dulce, y domina en los océanos, ya que tiene un mayor tiempo de residencia (10^8 años) en comparación con cualquier otro elemento. En última instancia es eliminado por la formación de depósitos de evaporitas, principalmente de halita ("sal de roca" o "sal común"; NaCl), pero también de carbonatos, sulfatos, boratos, y otros compuestos.

El cloruro de sodio (NaCl) se utiliza en grandes cantidades comparado con otras sustancias en la química inorgánica industrial. Es la principal fuente de cloro, además el sodio pasa a sosa cáustica (NaOH), de importancia industrial.

El Na elemental es fabricado por la electrólisis del NaCl fundido. Es un potente agente reductor, que se utiliza para la síntesis de compuestos y otros metales tales como titanio (Ti), zirconio (Zr) y tetraetilo de plomo. El sodio es esencial e indispensable para la vida. Está presente como ion Na^+ [20].

3.6.2. Potasio (K)

Es un elemento abundante y ampliamente distribuido en la corteza terrestre, en la vida y en las aguas naturales. La mayor de este elemento se encuentra en minerales de silicato tales como feldspatos alcalinos, (Na, K) $AlSi_3O_8$, y muchos minerales de arcilla que son componentes comunes de la corteza continental.

El ion K^+ es soluble se disuelve en la intemperie, y es abundante tanto en agua dulce como en agua de mar. Aunado a ello, la abundancia de la corteza de K es casi la misma que la del Na, otro elemento alcalino, sin embargo, la concentración del ion K^+ es menor que la del ion Na^+ , por un factor de alrededor de 2 en ríos, y 40 en el agua de mar.

El K al igual que Na, forma minerales evaporíticos como silvita (KCl), silvinita (mezcla de KCl y NaCl), carnalita ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) y salitre (KNO_3).

Grandes cantidades de sales de potasio se extraen debido al uso de fertilizantes. Dicho elemento se obtiene por reducción de cloruro de potasio (KCl) con Na metálico, el cual se utiliza en pequeñas cantidades, principalmente para la fabricación de superóxido de potasio, KO_2 [20].

3.6.3. Calcio (Ca)

Es un elemento dominante en el medio ambiente natural. El calcio es esencial para la vida; es un metal litófilo, estando presente en todos los compuestos naturales como especie iónica Ca^{+2} . La mayoría de Ca en la Tierra está presente en silicatos, por lo general en combinación con otros elementos como el Na, Mg y Al. Entre los minerales primarios que contienen calcio se encuentran los feldespatos, los piroxenos, la calcita, la dolomita, el yeso, el apatito y la fluorita. Junto con el Na^+ , el Ca^{+2} es el ión que se libera más fácilmente durante la hidrólisis de silicatos, a diferencia de Na, sin embargo, el Ca forma sales insolubles con muchos aniones importantes, como el carbonato (CO_3^{2-}), el sulfato (SO_4^{2-}), fosfato (PO_4^{3-}) y el fluoruro (F⁻). Por lo tanto, las sales de Ca que contienen estos iones, están contenidas en los minerales que son muy comunes en las rocas sedimentarias. Asimismo, el apatito y la fluorita son las principales fuentes de fósforo y flúor, respectivamente. Por lo general se producen grandes depósitos de Ca como carbonatos; en ese sentido, el CaCO_3 es el componente principal de caliza y la dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ de la dolomía ^[20]. Por otra parte, en el océano, ocurre la siguiente reacción:



El calcio presente conduce a la señalada reacción, conllevando a la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3). El equilibrio entre las rocas de carbonato de calcio y sus formas solubles es importante tanto en aguas dulces como en el océano. La presencia de CaCO_3 también tiene su influencia en el pH de las aguas naturales. Se mantiene un pH alcalino en el suelo y sedimentos sólo cuando se presenta una ausencia de ácidos orgánicos o de agua de lluvia ácida ^[20].

3.6.4. Magnesio (Mg)

El magnesio está presente en la corteza terrestre formando silicatos como el olivino $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ y el piroxeno $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$. La alteración de estos últimos, pueden formar los minerales de serpentina. El Mg es también uno de los componentes principales de las rocas sedimentarias, encontrándose principalmente formando la fase mineral dolomita, $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ ^[20].

3.7. Transporte de los metales traza en los sedimentos

Algunas investigaciones de metales traza en agua, material suspendido y en sedimentos de fondo, han sido llevadas a cabo en los últimos años, motivado principalmente al carácter tóxico que pueden llegar a tener cuando están presentes en la columna de agua^[7,21]. Procesos fisicoquímicos como la adsorción de iones por los sólidos y las reacciones de intercambio entre los sólidos y las aguas circundantes juegan un papel importante en la acumulación de metales traza y otros elementos que pudieran causar un impacto ambiental negativo, cuando las condiciones hidrodinámicas y salinidad son adecuadas, con lo cual se generan procesos de sedimentación y floculación que dan inicio a un aumento progresivo de la concentración de metales en el sedimento^[21].

3.8. Mecanismos fisicoquímicos

Los sedimentos tienen un rol importante en el mantenimiento de la calidad del agua en los sistemas naturales, debido a su capacidad para absorber componentes disueltos, inmovilizando en ocasiones en forma casi permanente a metales pesados, herbicidas y plaguicidas, entre otros. Respecto al sedimento, éste puede estar en movimiento, caso de ríos, arroyos y canales o relativamente quieto como en cuerpos lacustres, en función de la situación y comportamiento de la columna de agua circundante y del respectivo régimen hidrológico. Los procesos fisicoquímicos son

primordiales en cuanto a la movilidad de las especies se refiere. Están presentes en todos los sistemas naturales, inclusive en los ríos, siendo utilizados en los procesos de auto purificación ^[10].

Entre los mecanismos fisicoquímicos que intervienen en los sistemas naturales se encuentran la adsorción, floculación, lixiviación, intercambio iónico, precipitación, coprecipitación y acomplejamiento-quelación.

3.8.1. Adsorción

Es un proceso en el cual un soluto contenido en una fase líquida se transfiere hacia una fase sólida por retención en su superficie ^[23]. Este proceso significa un exceso de concentración en la superficie de la fase sólida, y es probable que se efectúe en toda la superficie de la misma, esta última es conocida como adsorbente y la sustancia adsorbida se conoce como adsorbato ^[24].

Los principales factores que controlan la distribución de un elemento determinado (sorbato) entre la fase sólida y la líquida son la composición química y mineralógica del material sólido; el tamaño, área superficial y carga residual de las partículas del sólido; pH, Eh y composición química de la solución; la concentración y solubilidad de la especie de interés; así como de otras especies químicas presentes en solución ^[24].

3.8.2. Floculación

Este proceso consiste en la aglomeración de partículas pequeñas para formar partículas de mayor tamaño, a través de medios mecánicos, químicos y biológicos. La floculación precede a la coagulación, pero es en la floculación donde las partículas conservan su individualidad, debido a que pueden desplazarse solas ^[25].

3.8.3. Lixiviación

Es un proceso de extracción de sustancias que forman parte de un sólido por medio de una segunda fase, generalmente líquida. Es pues un proceso de separación que se diferencia de la disolución porque una parte sustancial del sólido no desaparece después del mismo ^[26].

3.8.4. Intercambio iónico

Es un proceso de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia ^[27].

3.8.5. Precipitación

Se refiere a la formación de sólidos mediante el proceso de nucleación en una solución por un incremento en la concentración de las especies; es decir, por sobresaturación de la solución. Este proceso está determinado por la naturaleza de las especies presentes y las características fisicoquímicas del medio donde tiene lugar ^[36]. Se llama precipitado al sólido que se ha originado. Se puede considerar el proceso de precipitación como un fenómeno por el cual se cambia el tamaño de las partículas; se pasa de tamaño de partícula inferior a 10^{-7} cm (dispersión molecular) a tamaños superiores a 10^{-4} cm (suspensiones) ^[28].

3.8.6. Coprecipitación

Es un proceso de impurificación de los precipitados. En la misma el precipitado y la impureza se separan de la solución conjuntamente. La coprecipitación incluye sólo la impurificación de los precipitados por sustancias que normalmente son solubles ^[29]. Un elemento traza que debería estar en solución, coprecipita junto con oxi-hidróxidos de hierro o carbonatos ^[36]. El producto de solubilidad no juega un papel tan importante ya que el precipitado formarse mediante adsorción u oclusión, donde la impureza soluble es encerrada o englobada en el interior de la estructura del sólido ^[30,31].

3.8.7. Acomplejamiento- quelación

Los quelatos son complejos organometálicos, en los que un catión metálico se encuentra unido a varios ligandos ^[32]. Por otra parte, una reacción de formación de complejos es aquella en la que una o varias moléculas de un disolvente son reemplazadas por otras especies químicas, estas especies unidas al ión central se les denominan ligandos ^[28]. Es así como, la materia orgánica puede controlar la movilidad de muchas especies químicas en el ambiente de meteorización y sedimentación, mediante la formación de complejos organometálicos ^[33].

Todos estos procesos fisicoquímicos se encuentran íntimamente ligados a los sedimentos, ya que dichos procesos se encuentran en todos los sistemas naturales en donde estos sólidos pueden ser transportados por ríos y arroyos o encontrarse depositados en la columna de agua. Por otra parte, las actividades antrópicas son factores muy importantes en cuanto al aporte de metales a los cuerpos de agua, sean estos ríos, lagos o estuarios. Cuando la actividad humana comienza a ser importante, los componentes del cuerpo de agua pueden variar considerablemente, generándose problemas de contaminación. Los afluentes contaminantes, asociados a las actividades humanas se clasifican en domésticos, agropecuarios, drenaje de minas e industriales,

entre otros. Existe una cantidad importante de productos derivados de las actividades humanas que, una vez presentes en los reservorios de agua, producen alteraciones ecológicas importantes ^[7].

3.9. Fuentes de sedimentos atribuidas a la actividad humana o antrópica

Existen actividades antrópicas como la explotación minera, que genera grandes cantidades de partículas y polvo por la ruptura de rocas y suelos, los cuales una vez transportados a cuerpos de agua no sólo aumentan la carga del material sólido, sino que también, las especies contaminantes presentes en el sistema. Por su parte, obras de ingeniería como la construcción de caminos, vías férreas, presas, y plantas industriales, también generan grandes volúmenes de materiales, los cuales son movilizados por las modificaciones de las pendientes del terreno generadas por la misma actividad. Los drenajes y sistemas de alcantarillado e industriales, conducen materiales a ríos y lagos. También la actividad agrícola incide en la composición química de los sedimentos, aportando materiales de tipo orgánico e inorgánico ^[10].

Estas actividades antrópicas influyen en la concentración de metales pesados que pueden estar presentes en los sedimentos depositados en el complejo lagunar, en donde se espera que las diferentes fracciones granulométricas no presenten niveles homogéneos de concentración de dichos metales. En trabajos realizados anteriormente ^[7,21], se ha encontrado que la fracción limo-arcilla (lodo), presenta una buena capacidad de adsorción de metales pesados, alcalinos y alcalinotérreos debido a su gran área superficial. Por lo antes señalado, y para este trabajo de investigación, es importante realizar una determinación de fracción limo-arcilla (lodo) de los sedimentos de fondo de la zona de estudio.

3.10. Criterios para establecer la contaminación por elementos trazas y elementos mayoritarios

El análisis de sedimentos para fines ambientales puede ser realizado mediante diversos criterios. En el mismo orden de ideas, dichos criterios e pueden ayudar a determinar el grado de contaminación en una zona, estos son: la comparación de los valores de concentración con los niveles considerados base, determinación de índices de geoacumulación (I_{GEO}) y el factores de enriquecimiento (FE) y posibles correlaciones entre la concentración de los elementos presente en el sedimento.

3.10.1. Comparación con valores base

El primer factor que se debe tomar en cuenta para determinar el grado de contaminación en sedimentos, es el valor base. Este que es la concentración de un elemento determinado que tiene un sedimento sin influencia antrópica, sino únicamente por aporte de origen natural, quien condiciona la interpretación geoquímica de un sistema poco o no intervenido. Los valores base más adecuados son aquellos determinados dentro de la misma zona de estudio. Alternativamente se emplean valores promedio determinados para diferentes tipos de sedimentos a para diferentes rocas de la corteza terrestre ^[38,51], estos presentados en la tabla 1, en donde se consideran los elementos que serán estudiados en este trabajo especial de grado.

Tabla 1. Valores base empleados en análisis de sedimentos para los elementos en estudio.

Elemento	Concentración en sedimentos en $\mu\text{g/g}$ ^[38, 56]	*Concentración en rocas en $\mu\text{g/g}$ ^[51]
Al	-----	77440
Ca	-----	29450
Cd	0,3	0,102
Co	19	11,6
Cr	90	35
Cu	45	14,3
Fe	-----	30890
K	-----	28650
Mg	-----	13510
Mn	-----	527
Na	-----	25670
Ni	68	18,6
Pb	20	17
Zn	95	52

*Datos de la corteza terrestre

3.10.2. Factor de enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento se basa en la estandarización de la concentración de un elemento de prueba contra uno de referencia, identificándose las concentraciones anormales del elemento. Se define como:

$$FE = \frac{\left(\frac{Cn}{Cm}\right)_{muestra}}{\left(\frac{Cn}{Cm}\right)_{referencia}}$$

Donde C_n es la concentración del elemento a estudiar y C_m la concentración el elemento empleado como referencia. Como elemento de referencia han sido empleados los elementos Fe, Al y el Ti ^[38]. Se han establecido cinco grados de contaminación del sedimento reconocidos en base al valor del factor de enriquecimiento, los cuales se presentan en la tabla 2

Tabla 2 ^[38]. Categorías en base al factor de enriquecimiento.

Clases de FE	Grado de contaminación
<2	Deficiencia de enriquecimiento
2-5	Enriquecimiento moderado
5-20	Enriquecimiento significativo
20-40	Enriquecimiento muy alto
>40	Enriquecimiento extremadamente alto

Por otro lado, el índice de geoacumulación (I_{GEO}) es otro indicador ambiental que puede determinar el grado de contaminación en una zona determinada.

3.10.3. Índice de geocontaminación o geoacumulación (I_{GEO})

El índice de geocontaminación o geoacumulación está definido como:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5B_n} \right)$$

Donde C_n es la concentración determinada del metal n en la fracción de sedimento, B_n es el valor de concentración base de ese elemento, mientras que la constante 1,5 es un factor de corrección de las fluctuaciones naturales de una

determinada sustancia en el medio ambiente y pequeñas influencias antrópicas. Distingue seis clases de geoacumulación^[38], estos mostrados en la tabla 3.

De los índices de contaminación, el FE y el I_{GEO} son los más empleados en el análisis ambiental.

Tabla 3^[38]. Índice de geoacumulación y grado de contaminación asociado.

Valor de I_{geo}	Clases de I_{geo}	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

12. ANTECEDENTES

A continuación en esta sección se presentan algunos de los trabajos nacionales e internacionales realizados que tienen relación con el estudio de metales pesados, alcalinos y alcalinotérreos tanto en sólidos suspendidos como en sedimentos.

En este sentido, se presentan primeramente los estudios realizados en Venezuela:

Isava (1995) realizó una caracterización de la comunidad bacteriana asociada a la interfase agua-sedimento, para obtener un número significativo de grupos funcionales indicadores de la calidad ambiental del ecosistema del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua. Este autor realizó el análisis de los diferentes tipos de sedimentos y de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, salinidad, oxígeno disuelto, transparencia, profundidad, y temperatura, los cuales inciden sobre la distribución de los microorganismos y en el ciclaje de nutrientes ^[35].

Con el objeto de conocer la disponibilidad de algunos nutrientes esenciales para el crecimiento bacteriano, se determinaron las concentraciones de nitrógeno total, fósforo disponible y materia orgánica. El estudio se realizó entre los meses de marzo de 1994 y abril de 1995, con un total de 11 salidas, agrupadas en cuatro periodos estacionales asignados de acuerdo a criterios establecidos durante este tiempo para el Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en particular, estos son; máxima sequía (cierre de la boca); entrada de lluvias, máximo pico de lluvias (apertura de la boca) y salida de lluvias ^[35].

Los resultados obtenidos por Isava (1995) señalan que existe una marcada influencia de los parámetros fisicoquímicos sobre la distribución y frecuencia de los microorganismos asociados a la interfase agua-sedimento. De los parámetros fisicoquímicos estudiados, determinó que la salinidad y el oxígeno disuelto fueron los

más determinantes en la calidad ambiental del complejo lagunar. Por otro lado, indica que el tipo de sedimento predominante es arcilloso-limoso hacia la zona central de la laguna, lo cual está directamente relacionado con la acumulación de materia orgánica aportada por el bosque de manglar y afluentes, mientras que en los sectores cercanos a la barra litoral y la zona oriental de la laguna, predominan los sedimentos arenosos. La disponibilidad de N, P y MO en los sedimentos depende de la actividad microbiológica, tipo de sedimento y ciclaje de estos elementos dentro del ecosistema. Los resultados generados a partir de esta investigación, permitieron señalar sobre las condiciones en las que se encuentra este ecosistema, mostrando una aceleración marcada en el proceso de evolución característico de las lagunas costeras ^[35].

De Freitas (2008) determinó la distribución de la concentración de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, P, Pb y Zn en los sedimentos de fondo del Golfete de Cuare. Para ello, este autor recolectó 24 núcleos de sedimentos de 20 cm, los cuales fueron divididos en intervalos de 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm; cada uno de los cuales fueron tamizados en húmedo en tamices de 250, 125 y 62,5 μm , siendo esta última la fracción granulométrica objeto de estudio del presente trabajo. Dicha fracción granulométrica fue sometida a un tratamiento de extracción secuencial con HCl 1M y HNO₃ concentrado, para posteriormente determinar los elementos antes mencionados, mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado ^[7].

Por otra parte, la concentración de Hg en los sedimentos del Golfete fue determinada a través de una extracción con agua regia, mediante la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica con generación de vapor frío ^[7].

Los resultados obtenidos por De Freitas (2008) indicaron que la presencia de arcillas, carbonatos y oxihidróxidos de Fe y Mn de baja cristalinidad determinan la presencia de Al, Ca, Fe y Mn en los sedimentos. Las concentraciones de P están

asociadas a PO_4^{3-} y MO; mientras que los elementos Ni, Zn Cu, Cd y Co presentaron afinidad con carbonatos y oxihidróxidos amorfos presentes en los sedimentos [7].

Las mayores concentraciones de Zn se asociaron a la boca del Golfete, el Co hacia la zona norte y las de Ni y Cu en los sedimentos de fondo del Golfete. El Pb y el Hg se encontraron en los primeros 5 cm de los núcleos de sedimento, la presencia de dichos elementos en el sistema está asociada posiblemente a fuentes antrópicas [7].

Por otra parte, **Rivas (2008)** estableció la distribución y abundancia de Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Hg y P en los sólidos suspendidos del río El Tocuyo y el caño El Estero, así como en los sedimentos de fondo asociados a la llanura de inundación de ambos sistemas fluviales. Los resultados obtenidos por este autor indican que para los sedimentos superficiales, la mayoría de los elementos presentaron sus más altos valores de concentración en el primer intervalo de profundidad (0-5cm). Estas concentraciones fueron un reflejo de la composición de los sedimentos transportados por el río El Tocuyo y el caño El Estero. Asimismo, la presencia de algunos elementos mayoritarios como Al, Ca, Fe, Mg, P y traza como Sr, Ba, Mn, Co y Ni están controladas por factores como la meteorización de la litología circundante, procesos fisicoquímicos como precipitación y evaporación, influencia del medio marino, topografía y relieve. Sin embargo, otro factor no menos importante como la actividad antrópica puede estar controlando la presencia de Cu, Pb, Cr, Zn y Hg [21].

Luego, **Moreno (2009)** determinó la concentración de Al, Ca, Fe, Mg, Co, Cr, Cu, Ni, Mn, Sr, Pb, Zn y Hg, en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la sección este del Golfete de Cuare y su zona próxima costera. Para ello, este autor captó 17 muestras de núcleos de 20 cm de largo, las cuales fueron seguidamente sometidas a una extracción ácida secuencial con HCl 1M y posteriormente con HNO_3 concentrado. El análisis de estos núcleos fue realizado utilizando la técnica de Espectroscopia de Emisión Atómica con Fuente de Plasma Inductivamente Acoplado (EEA-ICP). Por su parte el Hg en los sedimentos determinó por medio de un equipo

analizador de mercurio total (TMA~80). Así mismo realizó el análisis de Difracción de Rayos X (DRX) para establecer las fases minerales presentes en las muestras de sedimentos con el propósito de conocer su asociación con las concentraciones de los elementos.

Los resultados obtenidos indicaron que la fracción lodo es la dominante en la zona de estudio dentro del Golfete de Cuare con un promedio de 95%; mientras que, en la zona próxima costera predominan arenas muy fina en aproximadamente un 55%. La concentración de Al, Fe, Mn, Cu, Zn y Pb dentro del golfete, fue mayor en relación a la zona próxima costera, pero el Co presentó un comportamiento contrario. Por otro lado, el Mg, Ni, Cr y Hg mostró una mayor homogeneidad en sus concentraciones en el sistema bajo estudio; finalmente el Ca y el Sr aumentan hacia la boca del golfete. A su vez, verticalmente el autor nota una distribución homogénea de los metales estudiados en el golfete; mientras que en la zona próxima costera pudo observar un aumento de la concentración de estos en función de la profundidad. Moreno (2009) también indica que el Al está asociado a fases de hidróxidos de aluminio amorfas o aluminosilicatos pobremente cristalinos; además, los elementos Fe y Mn están incorporados a oxihidróxidos amorfos y cristalinos; mientras que, el Ca y el Sr a carbonatos. Los metales Co, Cu, Zn, Ni y Pb están como elementos sorbidos sobre las arcillas, y/u oxihidróxidos de Fe, también asociados a estos últimos por coprecipitación. El análisis de Difracción de Rayos X pudo constatar la presencia de fases minerales como goethita, calcita, cuarzo y arcillas en los sedimentos de fondo de la zona bajo estudio [36].

Marcano (2010) realizó un estudio referente a la distribución espacial del fósforo en los sedimentos superficiales del Lago de Valencia. Para este trabajo fueron recolectadas 41 muestras de sedimentos superficiales de dicho lago. Estas muestras fueron fraccionadas por tamaño de grano; a saber: grava, arena, limo y arcilla, cada una de las distintas fracciones granulométricas obtenidas fueron sometidas a calentamiento

por 2 horas a diferentes temperaturas de 105°C, 450°C, 550°C y 750°C, finalmente fueron extraídas con HCl 1M ^[37].

Los resultados obtenidos indicaron que la pérdida a 450°C está distribuida hacia el centro del lago, mientras que la pérdida a 550°C está en la periferia del lago, en zonas de menor profundidad; por su parte, a 750°C la pérdida presentó porcentajes > 10% en ciertas estaciones, con porcentajes intermedios entre 4 y 10% hacia el centro del lago y los menores valores <4% hacia la periferia. Esto sugiere que la depositación de carbonatos ocurre preferentemente en estaciones específicas ^[37].

Los menores valores de residuo insoluble fueron identificados en aquellas estaciones que presentaron los mayores valores de pérdida a 750 °C, mientras que los máximos valores estuvieron distribuidos hacia la parte sur del lago, indicando una mayor fuente de sedimentos siliciclásticos ^[37].

Finalmente, Marcano (2010) logró diferenciar que la fijación del P en los sedimentos ocurre por medio de dos procesos, uno asociado a la materia orgánica y a los oxihidróxidos de Fe y Al, el cual tiene una fuerte influencia en la mayor parte del sistema; y otro asociado a los carbonatos, que domina en estaciones específicas. La correlación encontrada entre las concentraciones de P y la pérdida a 450°C sugiere que la materia orgánica tiene un aporte significativo de P orgánico ^[37].

González (2010) presentó los resultados correspondientes al estudio de los sedimentos de fondo del Lago de Valencia, Venezuela, con el objetivo de evaluar su estado ambiental, de acuerdo a su concentración de metales. En el estudio se consideraron los sedimentos recolectados entre junio-octubre de 2009, de manera bimensual en cinco estaciones seleccionadas atendiendo a las principales influencias industriales, urbanas, domésticas y agrícolas que se desarrollan en los alrededores del lago ^[38].

Los sedimentos fueron analizados para determinar la composición total de los elementos Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, V, Fe, Ti, Mn, Ca, Mg, Al, Si y Hg, así como carbono orgánico e inorgánico, y su fraccionamiento químico. Los sedimentos de fondo del lago se encuentran enriquecidos manteniendo la secuencia de Pb>Zn>Cu>Cr y se clasifican de no contaminados a moderadamente contaminados. Adicionalmente, la concentración de C_{org} es elevada lo que sugiere una fuerte intervención antrópica ^[38].

Los análisis realizados por González (2010) indicaron que la composición química de los sedimentos, presentan pequeñas variaciones temporales que ocurren en la época de lluvias, específicamente para las especies C_{inorg}, Ca, Mg, Mn, Al y Ni, para las que, a excepción del Al y Ni, su variación fue atribuida a su precipitación en forma de carbonatos, que ocurre en todo el lago durante la época de lluvias. La composición de los sedimentos presentó variaciones espaciales en las concentraciones de C_{org}, Cu, Zn, Pb y Hg, excepto para el Hg, la concentración de los elementos aumenta con la del C_{org} en las estaciones más profundas debido a sus condiciones anóxicas y reductoras en ciertas zonas específicas y es incrementada por el aporte antrópico doméstico-industrial introducido mediante los ríos Caño Central y Los Guayos y doméstico-industrial-agrícola por los ríos Guey y Tipitapa. Para el resto de los elementos, los resultados indican que su concentración en los sedimentos es resultante del aporte litogeoquímico de la zona y su variación en el espacio y en el tiempo es pequeña ^[38].

Por su parte, los resultados del fraccionamiento químico indican que el riesgo ambiental que presentan los sedimentos también varía espacialmente: los sedimentos del norte del lago no presentan riesgo alguno; el sur y este del lago se parecen en el riesgo medio de sus sedimentos en Zn, Ni, Co, y el oeste presenta riesgo alto en Cr y bajo en Co. En el centro del lago, los sedimentos tienen una composición mixta, presentando un riesgo medio de Co y Zn. Adicionalmente, los sedimentos de las estaciones presentan un riesgo bajo de Cd, Pb y Cu ^[38].

En el mismo orden de ideas, son discutidos algunos estudios realizados a nivel internacional.

González y Henríquez (2002) estudiaron la distribución espacial de metales pesados contenidos en sedimentos superficiales de la Laguna Carén, cuerpo de agua ubicado a 20 Km al poniente del centro de Santiago de Chile, cuyas aguas se usan para actividades recreativas. Estos autores realizaron un muestreo de sedimentos en 25 puntos, cuyas muestras fueron sometidas a digestión ácida total. La determinación de metales las realizaron utilizando espectrometría de absorción atómica (EEA) para Cu, Fe, Mn y Zn y espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP) para Cd, Co, Cr, Mo y Ni ^[10].

Los resultados obtenidos por González y Henríquez (2002) les permitieron relacionar información espacial de la Laguna de Carén con los valores de las concentraciones de los metales. Dichos resultados mostraron patrones de distribución espacial similares entre el Fe y Cu; mientras que, el Mn tuvo una concentración homogénea en la laguna; asimismo, el Co y el Ni se detectaron por debajo del límite de detección. Igualmente resaltan que los valores de concentración obtenidos para los elementos determinados guarda el siguiente orden: Fe >> Cu > Mn > Cr > Mo > Zn > Cd ^[10].

Urrutia et al. (2002) determinaron los niveles basales de metales traza en sedimentos en tres lagos andinos de Chile; a saber: Lagos Chungará, Laja y Castor. Estos autores también identificaron el incremento de los metales Hg, Pb, Cd, Cu, Cr y Zn en la columna de sedimento de los lagos antes mencionados. El análisis fue realizado por espectrometría de absorción atómica (EAA), con técnicas de generación de hidruros para Hg, llama (EAA-Llama) para Cu, Cr y Zn y horno de grafito (EAA-HG) para Pb y Cd ^[39].

En el lago Chungará, el Hg y Cd presentaron las mayores concentraciones, variando entre 0,038 y 0,12 $\mu\text{g/g}$ y 0,048 y 0,210 $\mu\text{g/g}$, respectivamente. Por su parte, en el lago Laja las mayores concentraciones correspondieron a Pb y Cu, fluctuando entre 6,7 y 14 $\mu\text{g/g}$ y 30 y 55 $\mu\text{g/g}$, respectivamente. Mientras que, en el lago Castor solamente el Zn mostró altas concentraciones, alcanzando valores de 700 mg/g ^[39].

Los resultados obtenidos por Urrutia *et al.* (2002) muestran que sólo el lago Chungará presentó un enriquecimiento superficial de Hg, Pb y Cd, con concentraciones dos veces más altas que los estratos profundos; asimismo, en el lago Laja se observó una tendencia a la disminución en la concentración de los metales analizados, exceptuando el Zn que registró un aumento en los centímetros superficiales. Mientras que, el lago Castor, presentó un aumento en la concentración de Pb y Cd hacia la superficie, el resto de los metales no mostró una tendencia clara. Finalmente, apuntan que el aumento en los metales pesados detectados en los niveles superficiales de los sedimentos del lago Chungará, es atribuido tanto a contaminación local como regional, siendo similares a enriquecimientos registrados en lagos de altura del hemisferio norte ^[39].

Por otra parte, **Turki (2007)** realizó un estudio sobre la especiación de los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn en sedimentos de fondo de la Laguna de Al Shabab, Jeddah, Arabia Saudita. Para ello, este autor utilizó una técnica de cuatro pasos de extracción secuencial, con el propósito de determinar la asociación química de dichos metales con las principales fases sedimentarias; a saber: intercambiables y carbonatos, óxidos de manganeso y hierro, sulfuros, materia orgánica y residuos minerales; asimismo, también determinó el contenido de metales totales ^[40].

Los resultados obtenidos por Turki (2007) en su estudio indicaron que los sedimentos de fondo de la laguna contienen altas concentraciones de los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn. Las características de partición de los sedimentos de la

laguna, también muestran que los porcentajes de los metales asociados a las fracciones no residuales, son notablemente mayores que la fracción residual, para todos los metales estudiados, indicando el grado de contaminación de los sedimentos [40].

Una cantidad considerable de Pb y Zn en una proporción de 4,6 y 15,4 y 2,5 y 14,5%, respectivamente se encuentra en la fracción unida a intercambiables y carbonatos, lo que plantea riesgo bajo o medio de contaminación para el ambiente acuático. Las fracciones de Cu no revelaron alto riesgo contaminante para los organismos acuáticos del medio ambiente [40].

Adoo et al. (2011) estudiaron la calidad del agua y los niveles de algunos metales traza en agua y sedimentos de la Laguna de Kpeshie, ubicada en Accra, Ghana. En las muestras de agua y sedimentos de la laguna se analizaron diversos parámetros fisicoquímicos que incluyeron el pH, la temperatura, la conductividad, los sólidos disueltos totales (SDT), salinidad, oxígeno disuelto, alcalinidad total y nutrientes. Los resultados mostraron que el pH está entre 7,50 y 7,93 unidades, la temperatura entre 28,4 y 29,6 °C, la conductividad osciló 19370 a 2850 S/cm, los sólidos disueltos totales de 9.750 a 14.180 mg/L, la salinidad va desde 11,43 a 17,14 o/o, el oxígeno disuelto entre 1,57 y 4,31 mg/Lt y la alcalinidad total estuvo entre 800 y 2000mg/L, indicando que en la laguna se encontraban en un estado intermedio entre las aguas dulces y salinas; sin embargo, los nutrientes contenidos en el agua se encontraban dentro de los límites reglamentarios de las aguas naturales [41].

Los niveles de metales pesados en los sedimentos, especialmente el Ni oscila entre 71,8 y 1568µg/g, el Pb entre 0,5 y 27,10µg/g y el Cr varía desde 190 a 26328µg/g; valores que representan un peligro potencial para la salud de los seres humanos y la vida acuática del ecosistema de la laguna [41].

El estado de contaminación de los metales pesados en los sedimentos fue confirmado mediante el factor de enriquecimiento (FE) y el índice de geoacumulación (IGEO). Los resultados obtenidos mediante FE y IGEO, mostraron el hecho de que los sedimentos se encontraban altamente enriquecidos con Ni, Cr y Pb. Asimismo, los autores encontraron que prácticamente los sedimentos no estaban contaminados con Zn y que la fuente de contaminación era natural ^[41].

13. ZONA DE ESTUDIO

A continuación son presentados algunos rasgos resaltantes de la zona de estudio, tales como: descripción general, clima, geomorfología, hidrología, flora, fauna, y geología.

5.1. Descripción general de la zona de estudio

El Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua se ubica en Venezuela, exactamente en el estado Miranda, en la región centro norte, entre los 10°11'30" y 10°20'20" de latitud norte y entre los 65°41'10" y 65°57'20" de longitud oeste ^[42]. Esta laguna poco profunda con aproximadamente 1,2 metros, contiene un estuario de laguna costera con una superficie aproximada de 72 Km² ^[43].

El Complejo Lagunar, se basa en una llanura costera formada por depósitos sedimentarios marinos fluviales, junto con una amplia plataforma continental, que tiene una longitud de 28 Km y 5 Km de ancho, su eje longitudinal está orientado en una dirección sudeste-noroeste (285°). En su extremo oeste, hay un estrecho paso de las mareas que conecta este estuario hacia el mar abierto. Cinco bahías o zonas, libremente comunicadas por los canales, se pueden delimitar. Asimismo, existe un importante afluente fluvial, el río Guapo, con descargas de forma continua a través del Canal Madre Casañas de varios arroyos intermitentes, estacionales a lo largo de la costa sur ^[43].

En la figura 5 se presentan las distintas lagunas que constituyen el Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua; en ella son mostradas las lagunas donde serán captadas las muestras de sedimentos de fondo, objeto de este estudio.

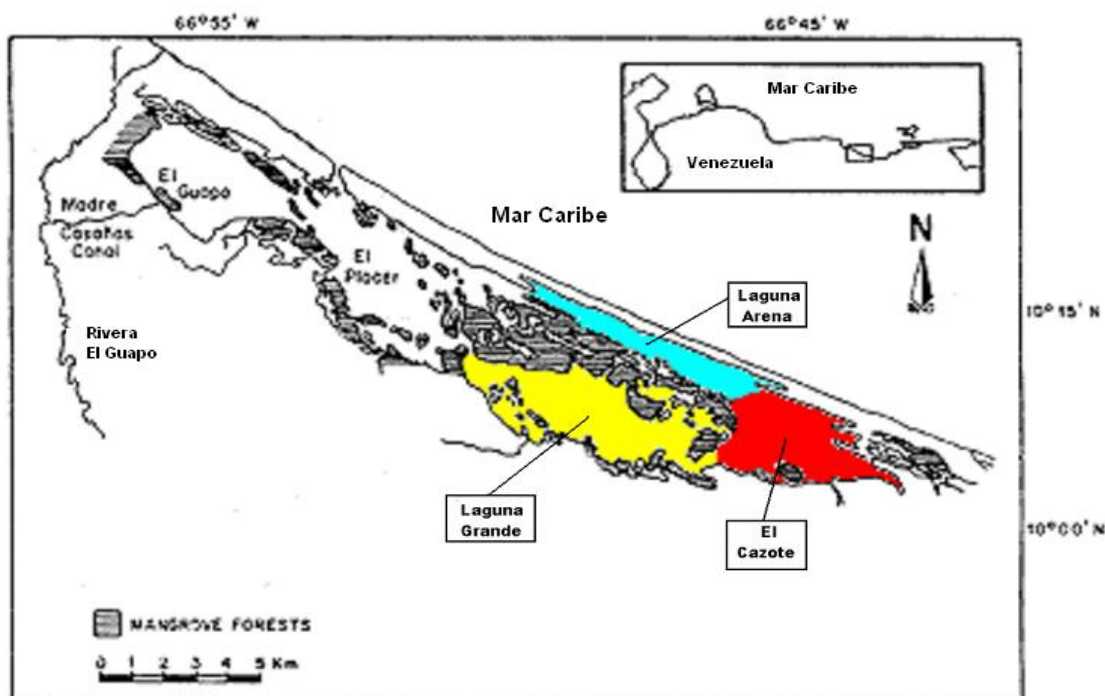


Figura 5 ^[43]. Mapa de la Laguna de Tacarigua, mostrando las lagunas a ser muestreadas.

Asimismo, la tabla 2 muestra las principales características de las lagunas que pertenecen al Complejo Lagunar que serán estudiadas. Nótese que la superficie varía desde 8,6 hasta 16,7 km²; la profundidad va desde 1,1 a 2,4 m; el volumen de agua desde 9,2 hasta 23,4x10m³ y la transparencia desde 33 hasta 100 cm.

Tabla 4 ^[43]. Características generales de las lagunas internas de interés del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua.

Zona	Superficie (Km ²)	Profundidad máxima (m)	Volumen de agua (x10 ⁷ m ³)	Transparencia (cm)
Laguna Grande	16,7	2,4	23,4-31,1	38-100
El Cazote	11,1	1,5	8,1-13,9	30-66
Laguna Arena	8,6	1,1	6,5-9,2	33-79

5.2. Clima

El clima en el área de la laguna es cálido y húmedo presentando una temperatura media anual entre 24,8 y 27,5 °C con un promedio de 26 °C. La precipitación media anual alcanza los 1.000 mm, con una estación lluviosa que se produce en el periodo comprendido entre los meses de junio a diciembre, tiempo en el cual se produce el 85 % de la precipitación anual. La máxima pluviosidad se ha registrado para el mes noviembre con 169,5 mm y la mínima se señala para el mes marzo con 14,3 mm. Por la ubicación y orientación de su zona costera (285°), el Complejo Lagunar y el área del parque se encuentra fuertemente influenciados por los vientos alisios del noreste, los cuales circulan desde los trópicos hasta el ecuador ^[42].

5.3. Geomorfología

Dado su estrecho canal de entrada y la circulación inducida por el viento en la mayor parte de la del Complejo Lagunar, podría definirse ésta como una laguna estrangulada, las cuales en general, se caracterizan por un canal de entrada único y estrecho, de largos tiempos de residencia y acción forzada del viento. La depositación de arenas se debe a las olas y las corrientes litorales, éstas provienen de la sierra cercana y también de algunas zonas del oriente de Venezuela ^[43].

La carga sedimentaria que entra a la laguna se estima entre 150 m³/año. Se estima que cada año 3x10⁶ m³ de sedimentos son transportados por las corrientes litorales hacia la entrada de la laguna. Actualmente este cuerpo de agua pasa un proceso rápido de llenado debido a la afluencia de sedimentos del río Guapo y varios arroyos estacionales. Este proceso es más visible en la desembocadura del Canal Madre Casañas, un delta que ha estado creciendo rápidamente, a razón de 0,25 km²/año. Asimismo, los registros históricos indican que la profundidad ha disminuido en varios sitios de la laguna, a principios de este siglo se midieron profundidades de 7 m en el recinto El Guapo, mientras que en la actualidad su profundidad máxima no supera los 2 m. La velocidad de sedimentación se ha incrementado durante los últimos años, probablemente debido a la multiplicación de las deforestaciones en la cuenca del río Guapo ^[43].

En los sedimentos que desembocan en la laguna, dominan los materiales calcáreos aluviales y marinos. Los sedimentos superficiales tienen un origen detrítico, aunque hay neoformaciones de pirita y evaporitas ^[43].

En su conjunto, el lodo y fracciones de arcilla predominan en la mayoría de los sedimentos, aunque en varias zonas la fracción de gravas es considerable, que comprende diversos componentes: conchas y restos orgánicos, y arena de origen marino. Se ha encontrado que la proporción de arena en el sedimento depende principalmente de la distancia hasta el banco de arena lagunar, lo que resulta en un gradiente de tamaño de grano ^[43].

El intervalo de pH de los suelos en el Complejo Lagunar es de 3,3 a 6,7, con la predominancia de arcillas que representan un promedio de 85,0%. En las llanuras aluviales, donde los manglares crecen, los suelos ácidos, con texturas arenosas, o con altas concentraciones de materia orgánica son los que predominan. Igualmente, suelos permanentemente inundados se encuentran en los islotes ^[43].

El material en suspensión en el agua varía espacialmente de una manera casual, probablemente como consecuencia de la interacción entre las variaciones estacionales de la carga sedimentaria del río Guapo y la intrusión de aguas marinas. Por ejemplo, en 1978, el material en suspensión fue elevado en El Cazote en 480 mg/L, Laguna Grande en 350 mg/L y El Placer en 328 mg /L; mientras que los valores más bajos se obtuvieron en El Guapo, probablemente debido a la floculación que se llevaría a cabo cuando las aguas dulces del río se mezclan con las aguas salobres de la laguna. Sin embargo, se reportaron valores más bajos de la transparencia en El Guapo con valores que están entre 21,5-58,0 cm, como reflejo de la alta carga sedimentaria del río; mientras que la mayor transparencia se midió en la Laguna Grande y El Placer, donde la visibilidad llegó a 1,0 m^[43].

5.4 Hidrología

La dirección predominante de las corrientes superficiales marinas de la costa venezolana es de este a oeste. En general, la velocidad de estas corrientes es baja, oscilando entre 0,1 y 0,7 nudos o 5-36 cm/seg. En el litoral central de Venezuela, donde se encuentra el Complejo Lagunar, la variación media de las mareas es de aproximadamente 20 cm, con una amplitud máxima de 30 cm^[43].

Los patrones hidrológicos en el Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua, siguen un curso anual de características moduladas por la descarga variable de los afluentes. Los patrones de circulación son una consecuencia de la interacción de los vientos alisios procedentes del este-noroeste y el cumplimiento permanente del principal afluente de la laguna, el río Guapo, que ofrece un excedente de agua dulce, así como de varios arroyos intermitentes. La dirección predominante de los vientos más fuertes se opone a la dirección de la entrada de los ríos principales, por lo que la mezcla de aguas es limitada, dando lugar a diferencias en los gradientes de distribución horizontal de la salinidad y los nutrientes. Además, la presencia de manglares en la parte central

impide la circulación del agua. Los movimientos de las mareas son probablemente amortiguados en el extremo oriental de la laguna, según lo sugerido por los patrones de distribución de salinidad ^[43].

El canal de entrada actúa como un filtro que elimina los efectos de las corrientes litorales y se somete a la influencia de las fluctuaciones de la marea. Durante la temporada de lluvias hay un flujo neto de agua de la laguna con el mar abierto, debido al aumento del nivel del agua. Durante la estación seca, los movimientos producidos por las mareas se originan en el Mar Caribe, provocando una oscilación de 2 cm en el nivel del agua lagunar. La Laguna de Tacarigua, que recibe el aporte fluvial del río Guapo y de varios arroyos estacionales, es una excepción, sin embargo, el volumen y la tasa de entrada de agua dulce de la laguna no han sido determinados ^[43].

5.5. Flora

La vegetación está representada por formaciones halófilas de manglares, áreas de sabana cubiertas de gramíneas y plantas arbustivas, así como por formaciones arbustivas bajas, típicas de las playas y dunas. El Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua se le ha señalado como la región estuarina más productiva en la costa venezolana. Los manglares constituyen la vegetación dominante, distribuidos en casi todo el borde de la laguna como es común en otras zonas litorales, lagunas costeras o albuferas de Venezuela. También crecen en el interior de la misma, constituyendo islotes de considerable extensión. Para la Laguna de Tacarigua se suelen citar cuatro especies de manglar de las siete especies señaladas para Venezuela, estas especies de mangle son: mangle rojo, la cual es la especie dominante, cubriendo hasta el 70 % del bosque de manglares; mangle negro; mangle blanco; mangle amarillo o mangle botón ^[42].

5.6. Fauna

Se observan más de 22 especies de mamíferos, entre ellos el venado maticán, el murciélago pescador, la pereza, el zorro cangrejero los monos capuchinos y araguatos, el chigüire y el cunaguaro y el perro de monte. Las aves suponen el principal componente de fauna del complejo lagunar, en la actualidad se han registrado unas 227 especies. Entre las que destacan las Tijereta de mar, y el pelícano, entre otros. La fauna herpetológica esta constituida por unas 15 especies de reptiles y anfibios y también se ha señalado como zona anidación de cuatro especies de tortugas marinas; a saber: *Chelonia mydas*, *Caretta caretta*, *Dermochelys coriacea* y *Eretmochelys imbricata*. Asimismo, se considera como el refugio más importante de las poblaciones del caimán de la costa ^[42].

Igualmente, debe agregarse que se considera un criadero natural de peces de muchas especies que requieren de aguas salobres en algún momento de su ciclo de vida, en ella se han señalado 52 especies de peces. La fauna de moluscos está representada por un cierto número especies, algunas de estas presentando interés comercial para consumo humano como son: los bivalvos Guacuco y Chipichipi, entre otros ^[42].

5.7. Geología

La Laguna de Tacarigua presenta un origen geológico relativamente reciente. La zona ocupada por el parque está dentro de la depresión de Barlovento, la cual es una planicie aluvial de gran extensión que se ha venido formando con los depósitos provenientes de la Cordillera de la Costa, principalmente por el aporte de ríos como: Chuspa, Curiepe, Capaya, Caucagua, Tuy y Guapo. Se considera que estos sedimentos se han depositado en la región, en los últimos dos a cuatro millones de años. La barra costera que separa a la laguna del mar se originó durante la trasgresión o ruptura Flamenca del Mar Caribe en el Holoceno, aún hoy continúa el proceso de depósito de

arenas que la cubren. La Laguna de Tacarigua forma parte de un complejo de lagunas costeras que incluye también la Laguna de Unare y la Laguna de Píritu ^[9].

5.8. Litología

La Asociación Metamórfica La Costa (AM La Costa) está compuesta por unidades con una compleja mezcla de litologías metaígneas y metasedimentarias, con la conspicua presencia de elementos ofiolíticos (anfíbolita, metagabro, metabasalto, eclogita, graucofanita, serpentinita, etc.), donde los minerales metamórficos ferromagnesianos indican haber sido sometidos a un régimen de alta presión - baja temperatura (AP/BT). Esta unidad corresponde a un terreno adosado debido a la interacción por la colisión oblicua entre las placas Caribe y Sudamérica. Las edades disponibles indican que corresponde al Cretácico. Las rocas de esta asociación afloran en la zona definida como "Napa Costera - Margarita".

Las unidades constitutivas son:

- **Mármol de Antímano:** con predominio de rocas carbonáticas entremezcladas con rocas máficas y esquisto con mineralogía variada.
- **Anfíbolita de Nirgua:** donde resalta la presencia si bien no mayoritaria de rocas anfibólicas de diversos tipos, incluyendo eclogita y glaucofanita, pero igualmente esquisto y gneis de mineralogía variable.
- **Esquisto de Tacagua:** una unidad mayormente metasedimentaria, con esquisto grafitoso formado en una cuenca anóxica, donde los sedimentos terrígenos están interestratificados por capas de material piroclástico (ahora esquisto actinolítico epidótico ± albita ± cuarzo ± calcita), con escasos lugares donde pueden interpretarse algunos flujos de lava.

- **Serpentinita:** Estos cuerpos usualmente se encuentran ubicados cerca de fallas. Además de diversos tipos de serpentinita propiamente dicha, se encuentran anfibolitita granatífera, anfibolitita, metagabro, rodingita, etc.

Dentro de esta asociación, Nirgua posee mezcla de elementos de corteza continental (metasedimentos y rocas metaígneas de la familia del granito) con aquellos de corteza oceánica. Mientras que Tacagua y Antímamo son fundamentalmente una cobertura metasedimentaria de las anteriores, intermezclada con material volcánico. Los cuerpos de serpentinita son bloques desmembrados de rocas máficas o ultramáficas de la corteza oceánica o manto ^[53].

14. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental a seguir en el presente trabajo de investigación con el fin de cumplir con los objetivos planteados se divide en tres etapas; a saber: campo, laboratorio y oficina.

6.1 Etapa de oficina o pre-campo

A lo largo de la siguiente etapa se realizó la respectiva revisión bibliográfica, referente a las características principales de los sistemas marinos costeros, es decir, en los lagos y en las lagunas, así como también de los rasgos, comportamiento y origen de los elementos de estudio en estos ambientes sedimentarios de tipo acuático,

Por otra parte, se utilizó un mapa de la zona de estudio, en donde se pudieron ubicar los diferentes puntos de muestreo, los cuales fueron elegidos según la topología del lugar, la separación natural que posee esta albufera y las características contrastantes que definen la dinámica del ecosistema del ecosistema lagunar como: la apertura y cierre de la boca, las descargas de agua dulce y sedimentos, el intercambio de agua salada, las condiciones físico naturales particulares, los vertidos domésticos y agrícolas y la distribución de los asentamientos humanos.

6.2 Etapa campo

Esta etapa involucró el proceso de captación de 19 muestras de sedimentos, específicamente 5 en el período de marzo de 2010 y 7 en los períodos de marzo 2011 y agosto de 2011, además de la medida de los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, temperatura, salinidad, profundidad y oxígeno disuelto (OD), en la columna de agua. Cabe destacar que por las condiciones del área para el período de marzo de 2010 sólo se pudo obtener la medida de oxígeno disuelto (OD). La toma de

las muestras de sedimentos de fondo de Laguna Grande, Laguna Arena y El Cazote, del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua fue realizada utilizando una draga marca Petersen que contiene aproximadamente 1 Kg de carga sedimentaria. Esta, fue lanzada en los puntos 9 (PNLT 10), 10 (PNLT 11), 11 (PNLT 12) y 12 (PNLT 13) de Laguna Grande también en el punto 13 (PNLT 14) de El Cazote y en los puntos 15 (PNLT 17) y 17 (PNLT 18) de Laguna Arena. El proceso de captación de las muestras se realizó específicamente en los meses de marzo 2010 y 2011 que representan el período de sequía y agosto 2011 que representa el período de lluvia; el total de muestras captadas es de 19, es decir, una muestra por punto o estación. A continuación en la figuras 6, 7 y 8 se presenta el mapa de la zona de estudio, señalando los puntos en donde se realizó el proceso de captación de las muestras de sedimentos de fondo durante la etapa campo en los respectivos períodos de muestreo.



Figura 6 ^[44, 45]. Mapa de la Laguna de Tacarigua mostrando los puntos a muestrear en el período Marzo 2010.

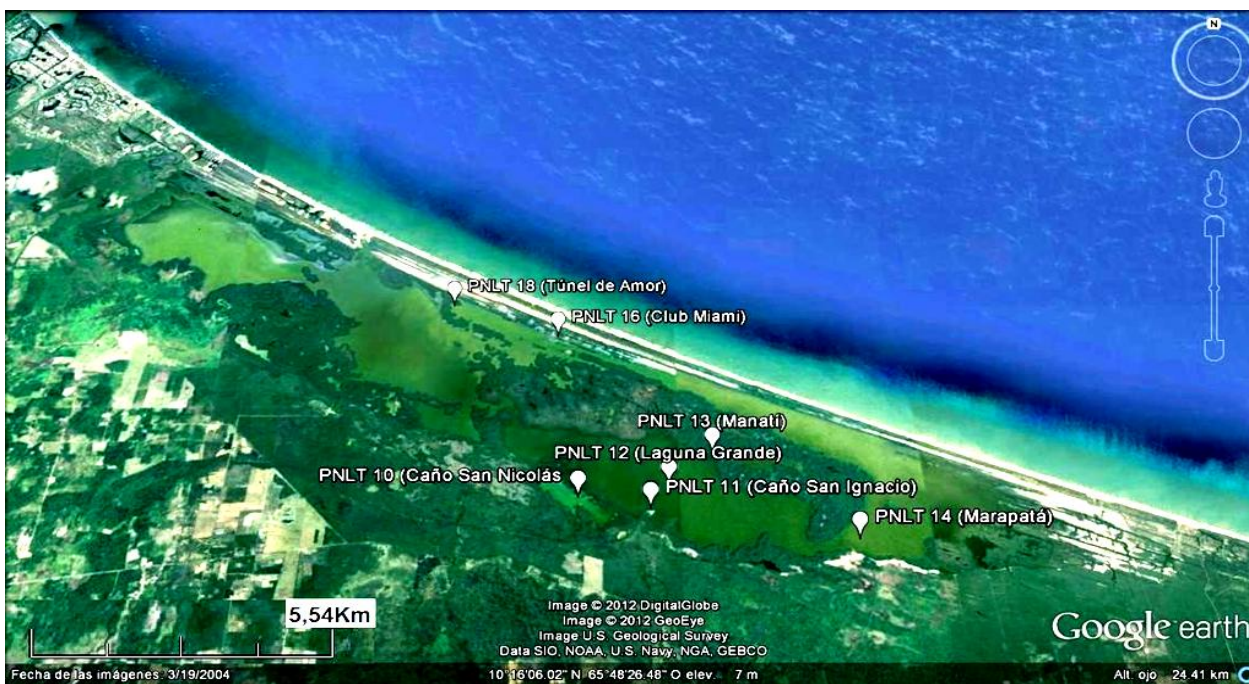


Figura 7 [44, 45]. Mapa de la Laguna de Tacarigua mostrando los puntos a muestrear en el período Marzo 2011.

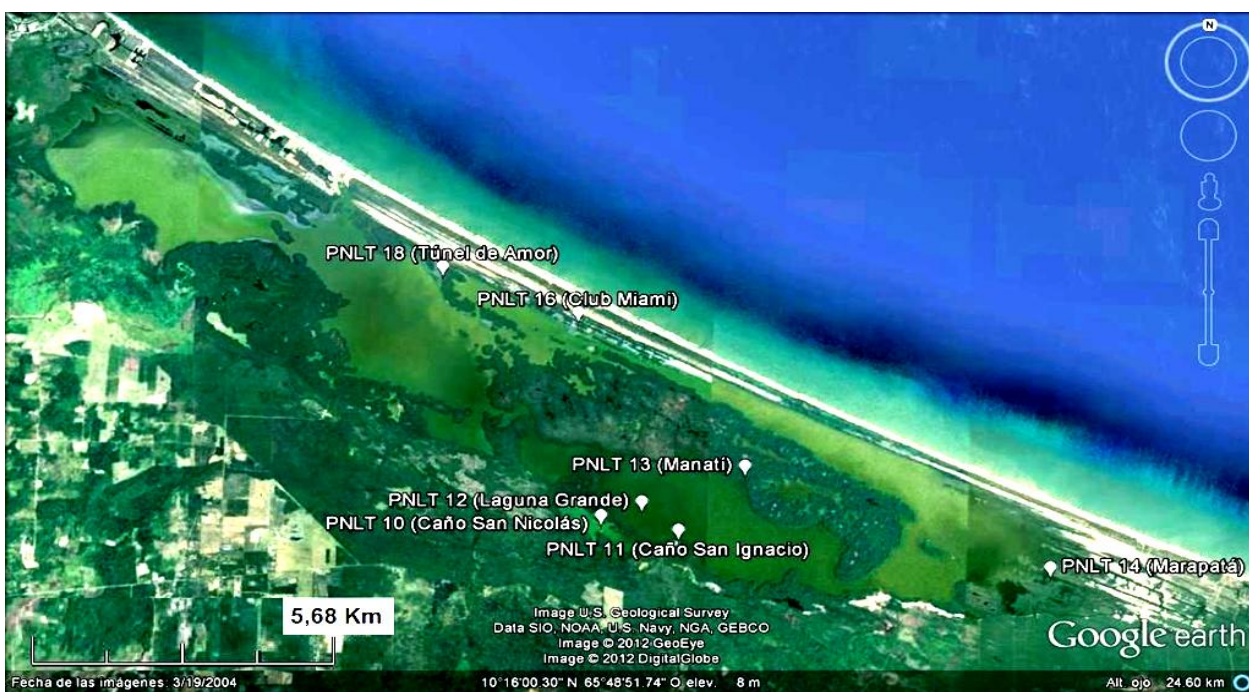


Figura 8 [44, 45]. Mapa de la Laguna de Tacarigua mostrando los puntos a muestrear en el período Agosto 2011.

6.3. Etapa de laboratorio

Esta etapa comprendió la realización de los distintos tratamientos a las 19 muestras de sedimentos recolectadas, captadas en las lagunas objeto de estudio, pertenecientes Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua.

Inicialmente, los sedimentos fueron físicamente tratados, utilizando la técnica del tamizado en húmedo para obtener las diferentes fracciones granulométricas, específicamente la fracción limo-arcilla o lodo y la fracción mayor a la misma; una vez obtenida dicha fracción de cada muestra, se realizó un ataque químico mediante extracciones ácidas con HCl 1M, HNO₃ concentrado y HF concentrado para luego determinar la concentración y distribución de los metales pesados, metales alcalinos como el sodio y el potasio y alcalinotérreos como el calcio y el magnesio mediante técnicas espectroscópicas. Además de ello, se realizó un estudio termogravimétrico a diferentes temperaturas para determinar las posibles fases minerales presentes en los sedimentos y realizar una comparación con los análisis químicos.

6.3.1. Tratamiento físico

Las muestras de sedimentos, fueron homogeneizadas y luego separadas en las dos fracciones granulométricas utilizando la técnica de tamizado en húmedo obteniendo así una fracción con un tamaño de grano menor a 63 μm y otra mayor 63 μm , que posteriormente serán pesadas para determinar el porcentaje en peso de la distribución granulométrica en cada una. En la figura 9 se presenta la metodología implementada para la determinación del porcentaje en peso de la distribución granulométrica para la fracción mayor y la menor a 63 μm .

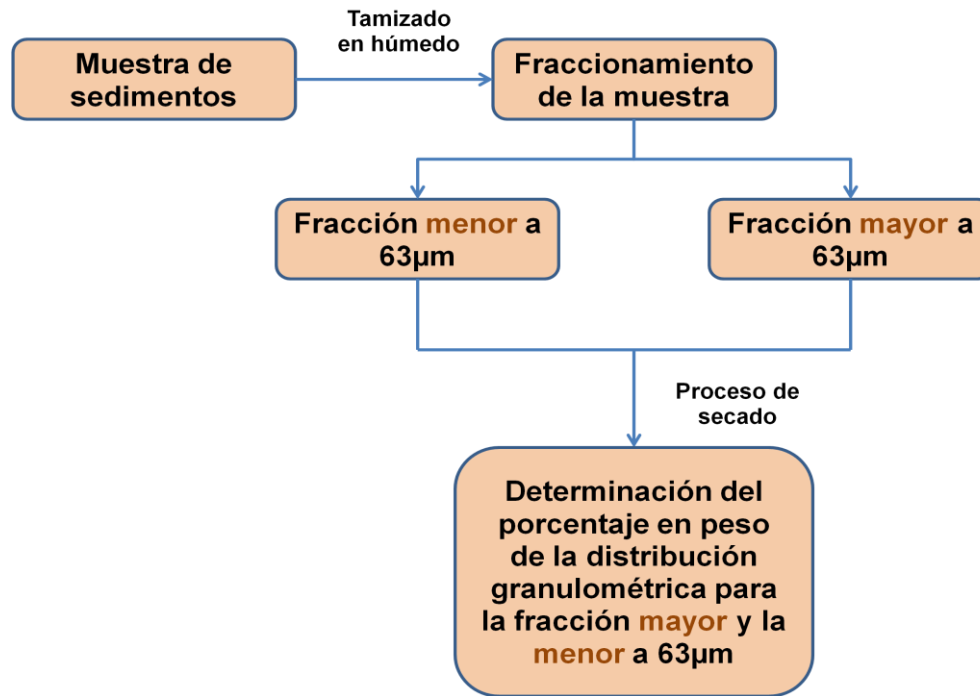


Figura 9 ^[7,45]. Metodología seguida para el tratamiento físico de las muestras.

Una vez obtenido el peso de las fracciones mayor y menor a 63 µm, se procedió a la trituración de las fracciones lodo obtenidas a partir del tamizado en húmedo.

6.3.2. Determinación de fases minerales por termogravimetría

Luego de pulverizadas la fracción de interés de los sedimentos de fondo de la zona de estudio, se procedió a pesar aproximadamente 2 g de dicha fracción en crisoles de porcelana. Los crisoles y las muestras fueron previamente pesados y se procedió a colocarlos en la mufla durante aproximadamente 2 horas a temperaturas de 100°C, 450°C y 550°C y 900°C; pasado el tiempo dentro de la mufla, las muestras se dejaron reposar y posteriormente fueron pesadas ^[23]. En la figura 10 se puede observar que cada temperatura está asociada a una fase específica.

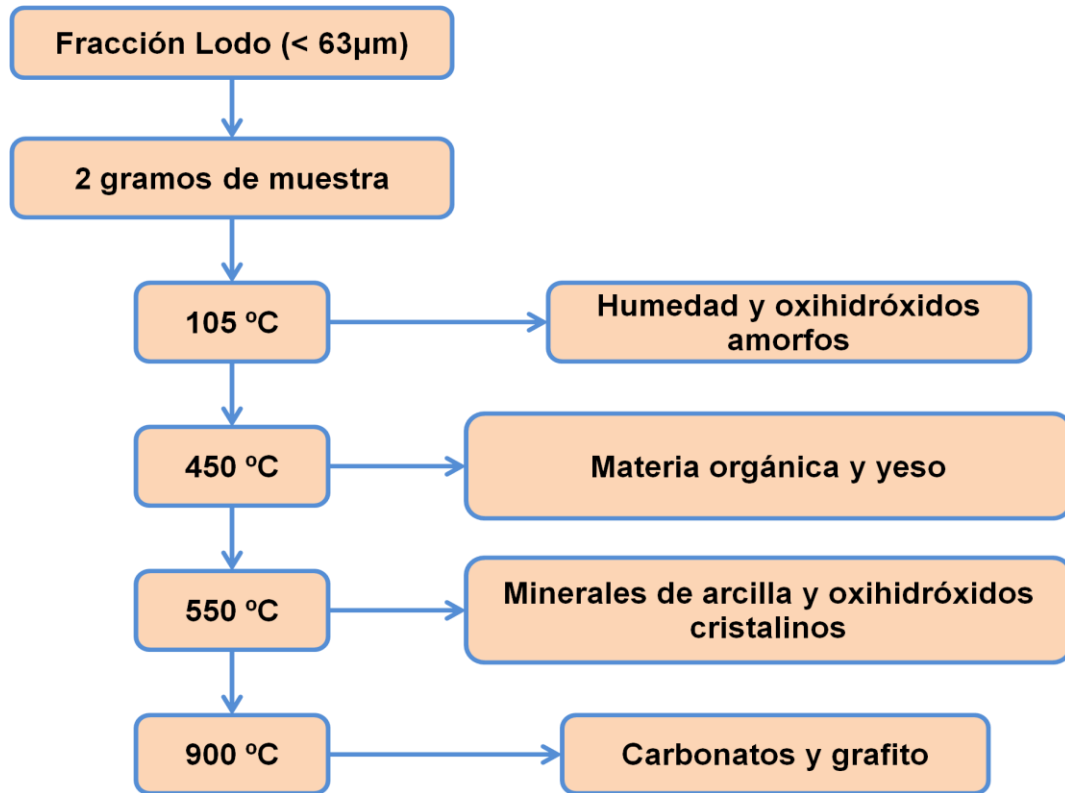


Figura 10 ^[37]. Metodología seguida para el análisis termogravimétrico de la fracción lodo en las muestras de sedimento.

6.3.3. Tratamiento químico

6.3.3.1. Extracción secuencial con ácido clorhídrico (HCl) 1M y ácido nítrico (HNO₃) concentrado

El proceso de extracción secuencial comenzó con el pesado de aproximadamente 2 gramos de la fracción menor a 63 μm obtenidas para cada una de las muestras recolectadas, estas previamente pulverizadas para luego ser colocadas en beakers de 100mL. Luego se les agregó 40 mL de HCl 1M, con agitación constante, por lo menos en un tiempo estimado de 24 horas. Posteriormente, las muestras fueron filtradas en un embudo tallo largo utilizando papel de filtro WHATMAN 41; esto con el

propósito de separar el residuo y el extracto soluble, siendo este último enrasado a un volumen de 50 mL en un balón aforado, con agua deionizada. Los residuos insolubles de esta primera digestión seguidamente fueron lavados con agua deionizada, procediendo luego, a eliminar el exceso de agua por evaporación, para posteriormente tratar estos residuos con 20 mL de HNO_3 concentrado en los mismos vasos de precipitados de 100mL, colocándose en planchas de calentamiento a una temperatura entre 60-70°C durante 2 horas. El paso siguiente, involucró una nueva fase de filtración utilizando embudos tallo largo y papel de filtro WHATMAN 41; para separar el extracto soluble, luego fue enrasado a un volumen de 50 mL en un balón aforado con agua deionizada ^[7,45]. Ambos extractos fueron almacenados en frascos plásticos previamente lavados con HNO_3 al 10%.

A través de este método se obtienen dos soluciones, las cuales posteriormente serán analizadas para la determinación de los metales. La solución que se obtiene al reaccionar la muestra de sedimento con HCl 1M representó las especies adsorbidas, oxihidróxidos amorfos y carbonatos. Por su parte, la solución que se obtiene al reaccionar el residuo insoluble con HNO_3 concentrado representó los elementos asociados a las fases de oxihidróxidos de cristalinidad media, sulfuros, materia orgánica y disolución parcial de arcillas ^[36].

6.3.3.2. Extracción total con ácido fluorhídrico (HF) concentrado y agua regia

Luego de la extracción secuencial con HNO_3 (c) a las muestras de sedimentos de fondo, el residuo insoluble fue pesado, y luego se tomó un peso de aproximadamente 0,2000 g del mismo, estos fueron colocados en recipientes cerrados de teflón. Posteriormente se les añadió 6mL de HCl (c) y se colocaron en baño de arena con plancha de calentamiento a una temperatura de aproximadamente 250 °C por 15 minutos. Luego fueron añadidos 2mL de HNO_3 (c), se dejaron en digestión por 30min

aproximadamente. Luego de transcurrido este tiempo, fueron añadidos 7mL de HF ^(c) y colocados en digestión por un tiempo aproximado de 1 hora. Después de la digestión, se dejaron calentar hasta sequedad para luego añadir 2mL de HNO₃ ^(c) al residuo insoluble. Finalmente las muestras fueron filtradas en un embudo tallo largo utilizando papel de filtro WHATMAN 41, con el propósito de separar el residuo y el extracto soluble, siendo este último enrasado a un volumen de 50 mL en un balón aforado, con agua deionizada. Los extractos obtenidos fueron almacenados en frascos plásticos previamente lavados con HNO₃ al 10%. La solución obtenida al reaccionar el residuo insoluble con HF concentrado representó a los elementos asociados a aluminosilicatos y a oxihidróxidos de alta cristalinidad ^[52]. El residuo final representó a los minerales pesados, como por ejemplo el zircón, pero no formaba parte de este estudio.

6.3.3.3. Análisis químico. Determinación de Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn

En esta etapa se determinaron las concentraciones de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb y Zn en las soluciones obtenidas por la extracción secuencial, mediante la técnica de espectrometría de absorción atómica con llama (EAA) mientras que las concentraciones de los elementos Na y K fueron determinadas mediante la técnica de espectrometría de emisión atómica (EEA). En la figura 11 se presenta la metodología seguida para el análisis químico implementado para las muestras de sedimento de fondo.

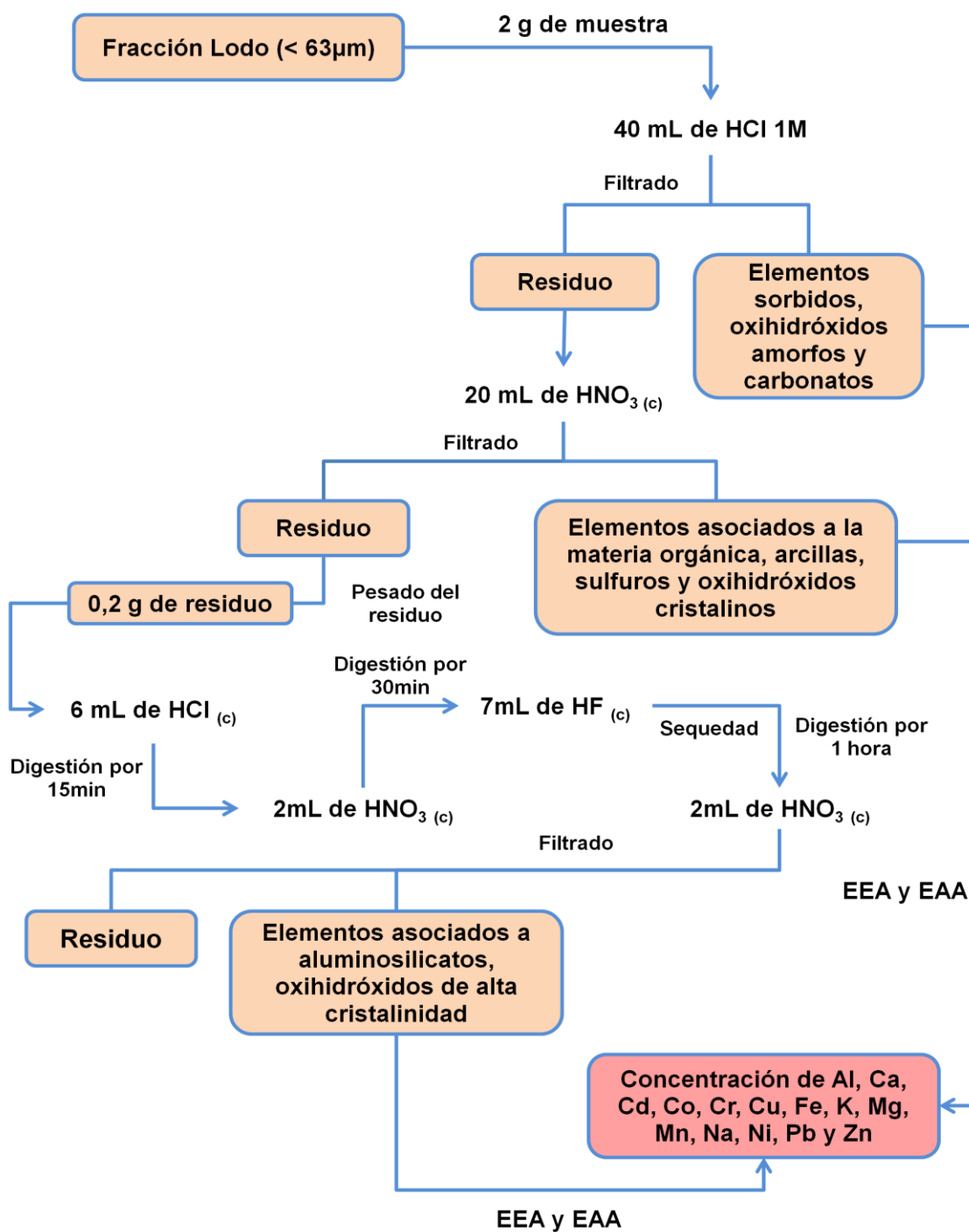


Figura 11 ^[7,53]. Metodología seguida para el análisis químico de las muestras de sedimentos.

6.3.3.4. Tratamiento estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva, mediante correlaciones entre los elementos, gráficas termogravimétricas, cajas gráficas, índices de geoacumulación (IGEO) y factores de enriquecimiento (FE), mediante el software Microsoft Office Excel 2007 y STATITICA v8.0.360.

7. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación son presentados y discutidos los resultados obtenidos durante las actividades de campo y laboratorio. En primer lugar son expuestos los resultados de los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH, conductividad, salinidad y profundidad de la columna de agua (apéndice 3) medidos en campo, seguido de las características físicas de los sedimentos y los porcentajes obtenidos en la fracción $> 63\mu\text{m}$ y la menor a $< 63\mu\text{m}$. Seguidamente, son mostrados los resultados de la variabilidad del método (apéndice 7) realizado de las concentraciones de Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los 3 períodos muestreados.

7.1. Parámetros fisicoquímicos y profundidad de la columna de agua

Las figuras 12, 13 y 14 muestran la distribución espacial del pH en los períodos estudiados, allí puede observarse que en el período de marzo de 2010 estos valores se encuentran entre 7,5 y 8,3; mientras que en el período de marzo de 2011 el valor más bajo es de 7,3 y el más alto de 8,5; por último en el período de agosto de 2011 estos valores oscilan entre 3,9 hasta 5,8.

Observando el pH en los períodos de marzo de 2010 y marzo de 2011, puede apreciarse que los valores más elevados se encuentran hacia la zona de Laguna Arena, lo cual puede estar asociado a la influencia del agua de mar en esta parte del área de estudio; estos resultados fueron similares a los obtenidos por De Freitas (2008) en sedimentos de fondo del Golfete de Cuare ^[7]. En el período de marzo de 2011 se observa una tendencia leve al aumento del pH de la columna de agua hacia la zona de El Cazote, indicando esto que en comparación a Laguna Grande y Laguna Arena, hay una mayor entrada de agua de mar. ^[7].

En el caso del período de agosto de 2011, puede observarse una disminución brusca del pH, siendo estos valores los más bajos en comparación con los otros dos períodos muestreados; esto indica que durante este período se depositó gran cantidad de materia orgánica a causa del elevado transporte de la misma por el aumento de las aguas de escorrentía y afluentes conectados a la zona de estudio, debido a la influencia de las lluvias y por lo tanto un elevado transporte hacia la columna de agua con materia orgánica en solución, la cual contiene gran cantidad de grupos ácidos ^[35].

Por otra parte, al existir gran cantidad de materia orgánica en solución en este período de lluvias, se puede intuir que hay una disminución brusca del oxígeno disuelto (OD). Conde (1996) comenta que la materia orgánica contenida en los sedimentos de la Laguna de Tacarigua, presenta un promedio de carbono elevado en comparación con la Laguna de Unare y la de Píritu y también superiores a los valores considerados como normales para las aguas oceánicas. Este investigador también comenta que la relación C/N ha sido alta durante el tiempo, lo que indica un predominio en la descomposición de materia orgánica ^[35,43].

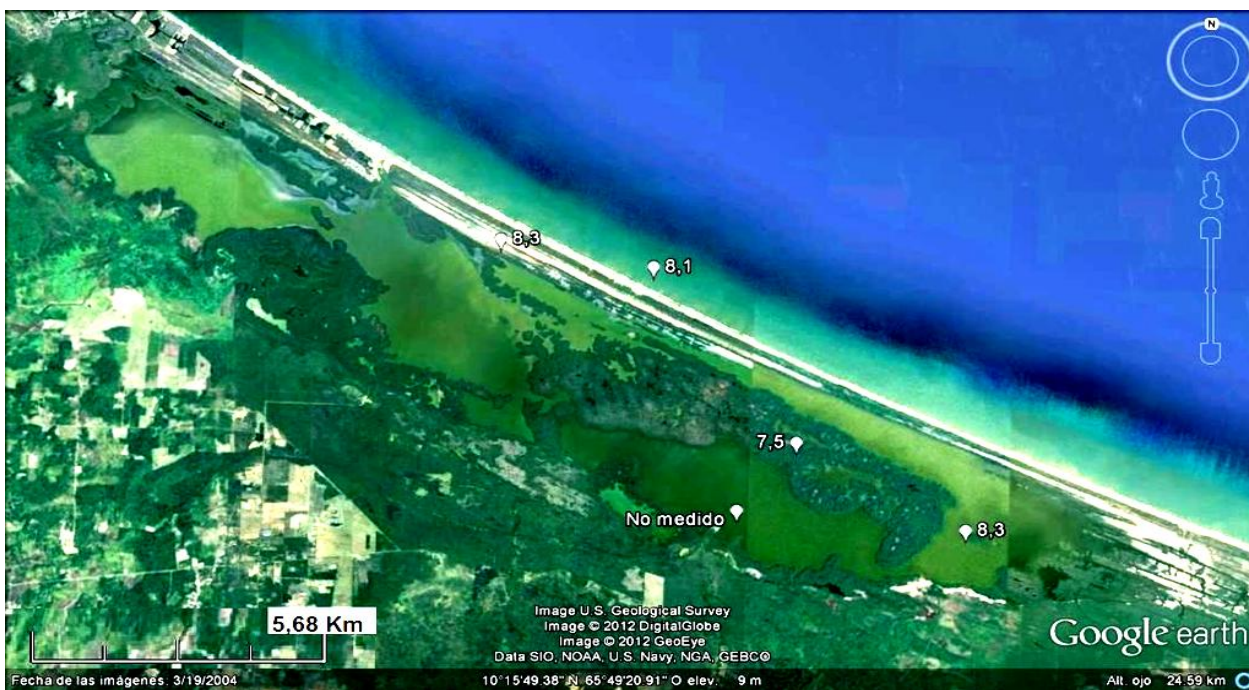


Figura 12 [44, 45]. Mapa de distribución del pH en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.



Figura 13 [44, 45]. Mapa de distribución del pH en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.



Figura 14 [44, 45]. Mapa de distribución del pH en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.

Por su parte, la conductividad medida en el mes de marzo de 2010 comprendió valores desde 18870 hasta 41200 $\mu\text{s}/\text{cm}$; mientras que para marzo de 2011, se obtuvieron valores que oscilaron entre 11040 y 32720 $\mu\text{s}/\text{cm}$ un poco más bajo en comparación al período anterior, asimismo, en el período agosto de 2011 estos valores circularon entre 6060 y 31500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, más bajos en comparación con los períodos anteriores. El descenso de la conductividad en el período de agosto de 2011 o período de lluvia, se puede atribuir al importante aporte de agua dulce a través de la escorrentía superficial manifestada por los ríos, arroyos y caños que discurren hacia la laguna, reflejado esto en la disminución de la conductividad. Efecto contrario ocurrió en los períodos de marzo de 2010 y 2011, donde la conductividad es elevada a consecuencia de la fuerte sequía, esto produce el cierre de la boca de la laguna y finalmente la disminución de las aguas de las corrientes que se dirigen hacia la misma, además de los procesos de evaporación en los afluentes, y en la laguna misma, acumulando así gran cantidad de especies iónicas [9,35]. Los valores de conductividad pueden ser observados en las figuras 15, 16, 17.



Figura 15 [44, 45]. Mapa de distribución de conductividad en $\mu\text{s/cm}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.



Figura 16 [44, 45]. Mapa de distribución de conductividad en $\mu\text{s/cm}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.

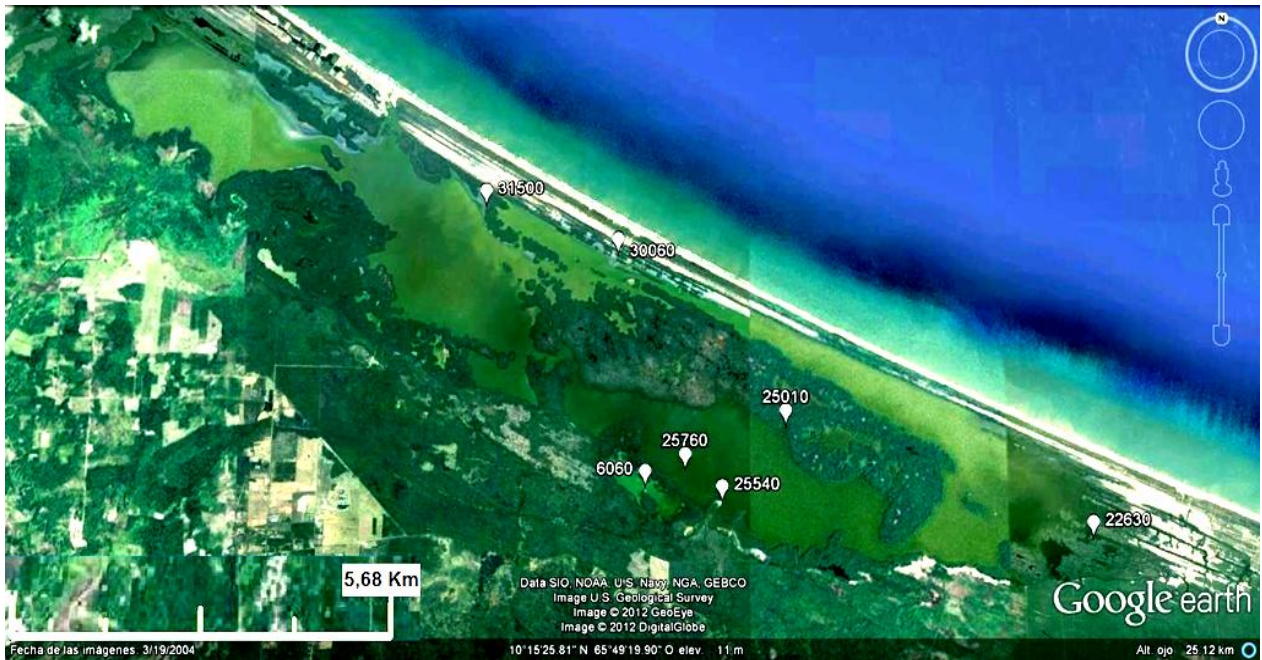


Figura 17 [44, 45]. Mapa de distribución de conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.

Claramente la conductividad y la salinidad están asociadas, ya que en el caso de la conductividad es una medida indirecta de la cantidad total de iones presentes en el agua [48]; mientras que la salinidad mide básicamente la concentración de sales disueltas [49]. Al observar los valores de salinidad en los tres períodos de muestreo en las figuras 18, 19 y 20, puede apreciarse que en marzo de 2010 estos oscilaron entre 1,50 y 2,40 ‰, mientras que en el período de marzo de 2011 los mismos se encontraron entre 0,55 y 2,01 ‰, finalmente y no menos importante, en el período de agosto de 2011 se observaron valores desde 0,33 hasta 1,98 ‰, lo que confirma que durante el período de sequía de marzo de 2010 ocurrió un gran aporte de carga sedimentaria que cerró la boca de la laguna además de sequía de los afluentes, debido a procesos naturales de evaporación que disminuyen la cantidad de agua por lo que la cantidad de sales presentes en la columna de agua fue elevada en comparación con el período de lluvias [9,35].

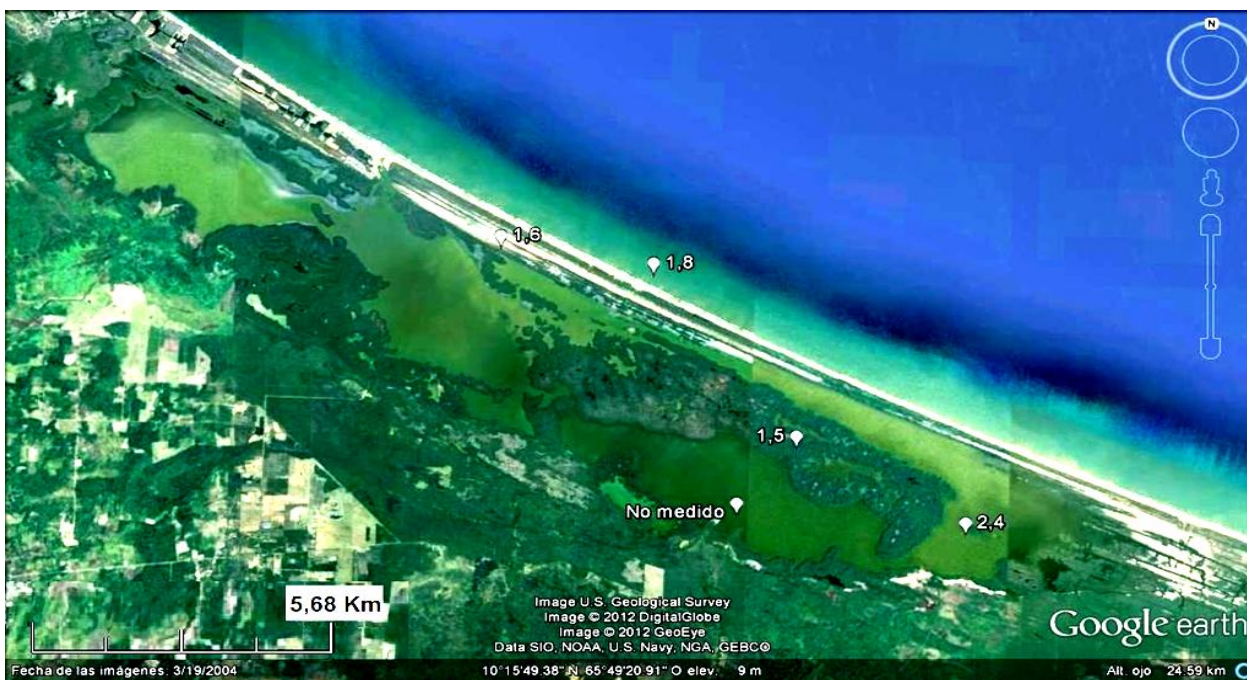


Figura 18 [44, 45]. Mapa de distribución de salinidad en ‰ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.



Figura 19 [44, 45]. Mapa de distribución de salinidad en ‰ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.



Figura 20 ^[44, 45]. Mapa de distribución de salinidad en ‰ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.

Por otra parte, la temperatura superficial de la columna de agua de la zona de estudio fue similar en los tres períodos muestreados; en ese sentido, en el período de marzo de 2010 se obtuvieron valores que oscilaron entre 28,3 y 31,5 °C, mientras que en el período de marzo de 2011 se encontraron valores desde 27,8 hasta 31,5 °C; y para el período de agosto de 2011 se obtuvieron valores entre 30,2 y 33,6 °C. Asimismo, De Freitas (2008) encontró estos mismos valores de temperatura en su zona de estudio, es decir, en el Golfete de Cuare y explica que estas temperaturas son relativamente elevadas para ser aguas superficiales, esto debido a que se esperaba que las mismas fuesen un poco más bajas, indicando que estas se encontraban poco mezcladas con las aguas profundas ^[7]; aunado a ello, estos valores obtenidos permiten explicar la presencia relativamente alta de sales disueltas en estos períodos muestreados, ya que a mayor temperatura más elevado es el proceso de evaporación del agua. Las temperaturas superficiales medidas en los tres períodos pueden ser observadas en las figuras 21, 22 y 23.



Figura 21 [44, 45]. Mapa de distribución de temperatura en °C en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.



Figura 22 [45]. Mapa de distribución de temperatura en °C en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.



Figura 23 [44, 45]. Mapa de distribución de temperatura en $^{\circ}\text{C}$ en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.

En lo que respecta al factor profundidad de la columna de agua, en los puntos de muestreo de la zona de estudio, se pudieron apreciar valores en el período de marzo de 2010 desde 94 hasta 112 cm, mientras que en el período de marzo 2011 se encontraron valores entre 11 y 74 cm. Asimismo, en el período de agosto de 2011, los valores oscilaron entre 13 y 99 cm, evidenciado esto en las figuras 24, 25 y 26. Cabe destacar que estas medidas de profundidad fueron tomadas desde la distancia en que el sedimento fue capturado a la superficie del agua. Estos cambios de profundidad se pueden atribuir a que probablemente en el período de lluvia de 2009, específicamente en el mes de agosto, existió un gran aporte de sedimentos provenientes de los afluentes y caños cercanos a la zona, los cuales fueron depositándose con el tiempo y fueron acumulándose dentro del sistema lagunar. Debe resaltarse que este aporte de sedimentos a las escorrentías superficiales, proviene de la erosión y deforestación de los bosques en las cabeceras de los afluentes que drenan la cuenca del río Guapo, cuya carga sedimentaria, manifestada principalmente a través del río Guapo, es

depositada en la Laguna de Tacarigua, quien desemboca en el Caño Madre Casañas, mediante su desviación hacia este caño [9].

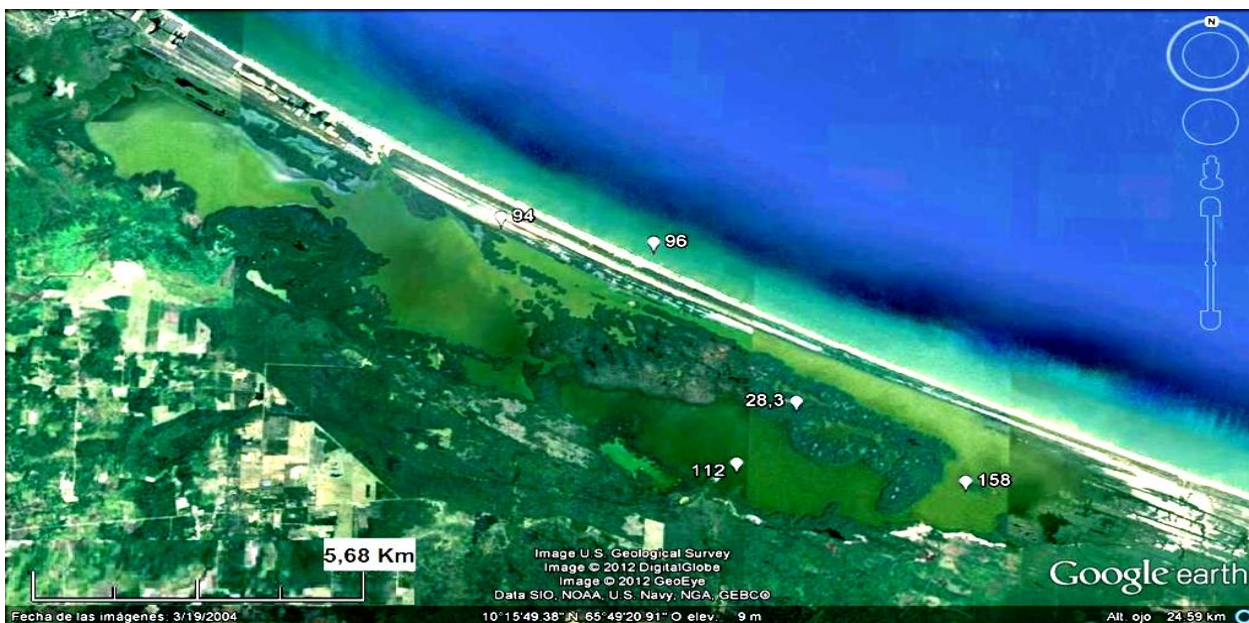


Figura 24 [44, 45]. Mapa de distribución de profundidad en cm en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2010.

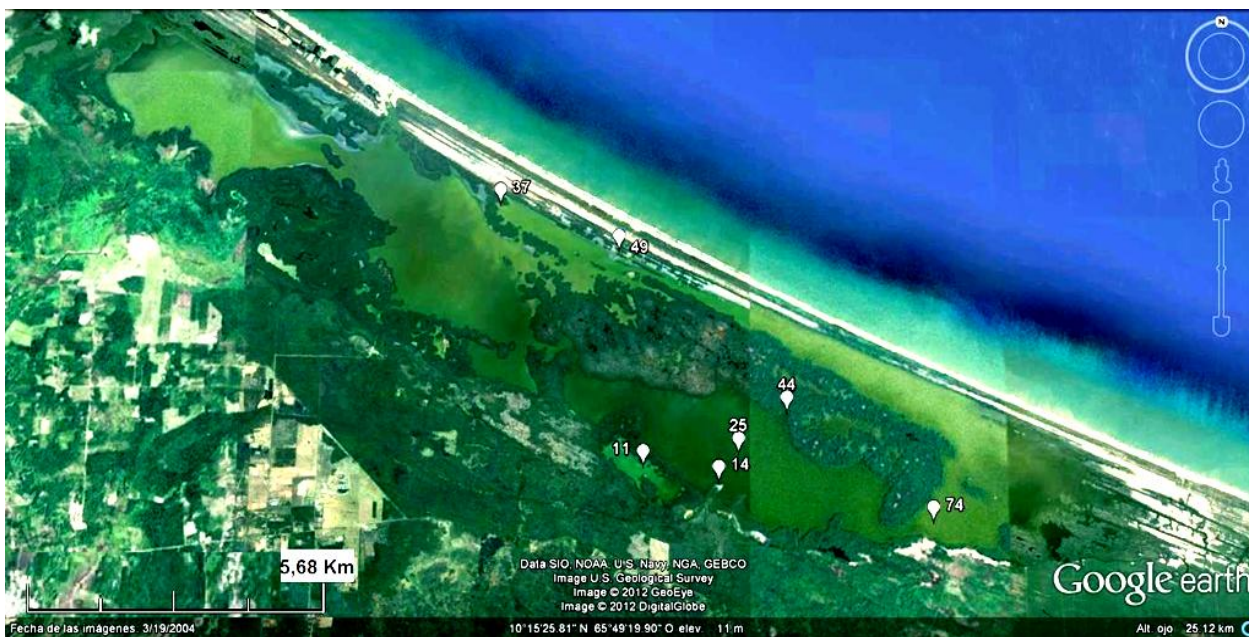


Figura 25 [44, 45]. Mapa de distribución de profundidad en cm en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Marzo de 2011.



Figura 26 [44, 45]. Mapa de distribución de profundidad en cm en la columna de agua en cada una de las estaciones de muestreo en el período de Agosto de 2011.

7.2. Descripción física de las muestras de sedimento de fondo de la zona de estudio

La distribución granulométrica espacial de los sedimentos de fondo de la zona de estudio, está dominada por la fracción $< 63 \mu\text{m}$ o fracción lodo, exceptuando en el período de agosto de 2011 en donde se observa predominancia de la fracción $> 63 \mu\text{m}$. este comportamiento puede apreciarse en las figuras 27, 28 y 29.

En el mismo orden de ideas, en las figuras 26 y 27 puede observarse que en los períodos de marzo de 2010 y 2011 respectivamente, la fracción lodo es la predominante; especialmente en el último período nombrado, esto es debido al evento sequía ocurrido durante estos períodos, produciendo una disminución en las corrientes de agua o afluentes que fluyen hacia la Laguna de Tacarigua en general, por lo que el

material particulado de tamaño limo-arcilla por ser más liviano puede ser llevado más fácilmente hasta los lugares de depósito final.

No obstante, para agosto de 2011, ocurrió el efecto contrario; es decir, los sedimentos de tipo arena fueron arrastrados por las lluvias, esto debido al aumento en la velocidad de flujo de los afluentes conectados a la laguna y por ende se favorece el transporte del material particulado tamaño $>63 \mu\text{m}$, especialmente arena. Dicha distribución granulométrica puede observarse en la figura 27.

Es importante resaltar que en el período de marzo de 2010, se observa el predominio de la fracción $> 63 \mu\text{m}$ en algunos puntos de muestreo, oscilando entre 69 y 85% en peso de la misma, especialmente hacia el suroeste de la zona. Esto parece indicar que para el período anterior de lluvias de agosto 2009 no muestreado, existió una fuerte depositación de estos sedimentos debido al aumento en la velocidad de las aguas de escorrentía y afluentes conectados a la laguna; esta ligera tendencia puede ser observada claramente en la figura 26. Debe ser mencionado, que el punto de muestreo 15 (PNLT 16) de ese período de marzo de 2010 presenta la mayor cantidad de la fracción arena (85 %) debido a la ubicación litoral de este punto, quien espacialmente está ubicado en mayor contacto con el mar. En este sector, existe la velocidad de arrastre suficiente como para transportar sedimentos que presenten predominancia en tamaño de granos de este tipo.

Por su parte, en el período correspondiente a marzo de 2011, al parecer la carga sedimentaria de la fracción $> 63 \mu\text{m}$ que provino del período de agosto de 2010 de lluvia tampoco muestreado, no fue elevada. Esto se señala debido a que los valores oscilaron entre 13 y 78% en peso, lo que podría indicar que durante este período la velocidad de las corrientes de agua de los afluentes y otros conectados a la laguna no fue lo suficientemente fuerte, como para transportar esta clase de material de tipo arena, esto en comparación con los valores obtenidos de la fracción $<63 \mu\text{m}$, ya que estos oscilaron entre 22 y 87 % en peso. Este material particulado es mucho más fácil de transportar

por medio de los afluentes y ríos, debido a que como fue señalado, es más liviano, lo que podría explicar su abundancia en la zona de estudio. Cabe destacar, además que en estudios anteriores se ha evidenciado que anualmente se deposita una importante cantidad de sedimentos a la laguna, debido a sus características geológicas y geomorfológicas ^[9].

Es importante indicar que no existe evidencia en referencias bibliográficas, de estudios donde se hayan obtenido valores de porcentajes de arena y lodo en la zona de estudio. Tampoco se puede dejar de mencionar el hecho de que en la laguna, ha aumentado la velocidad de sedimentación durante los últimos años, debido a la deforestación cercana al río Guapo ^[43].

Finalmente, el color de los sedimentos varió entre marrón claro y oscuro, indicando el primer color presencia de ambientes óxicos, mientras que el marrón oscuro es indicativo de materia orgánica y por lo tanto ambientes anóxicos. Estos resultados fueron similares a los obtenidos por De Freitas (2008) en los sedimentos de fondo del Golfete de Cuare ^[7].

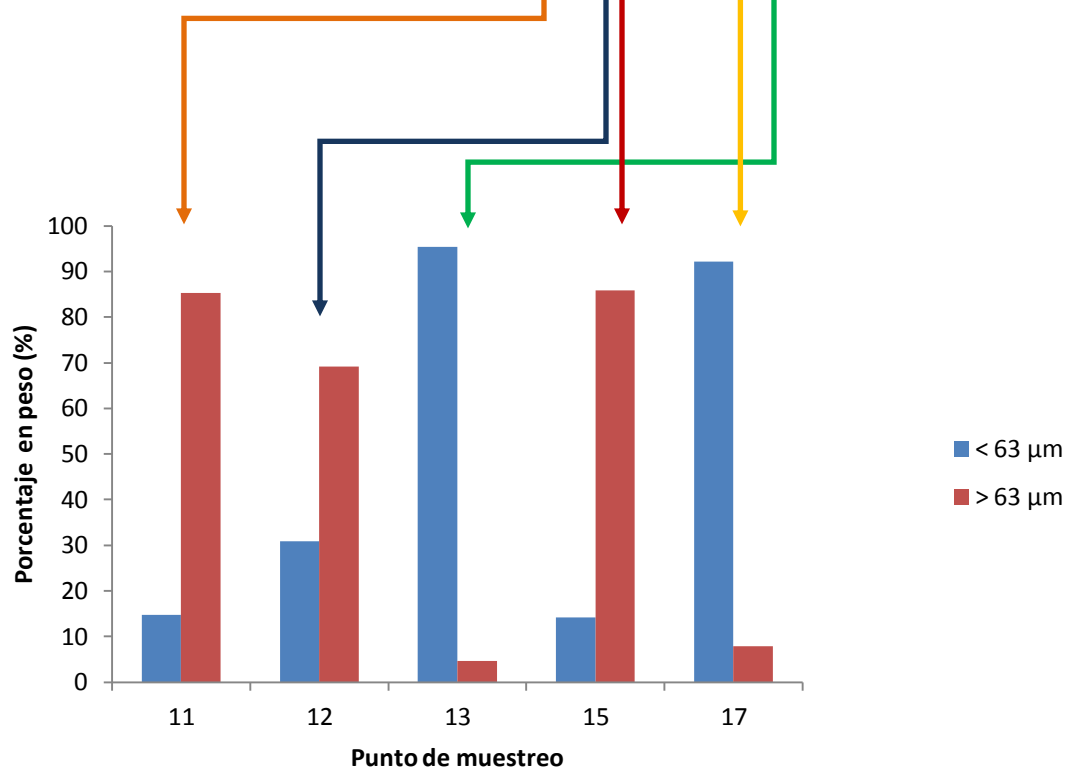


Figura 27. Porcentajes en peso de la fracción $>63 \mu\text{m}$ y la fracción $<63 \mu\text{m}$ o lodo en los sedimentos de fondo de la zona de estudio en los períodos de marzo de 2010.

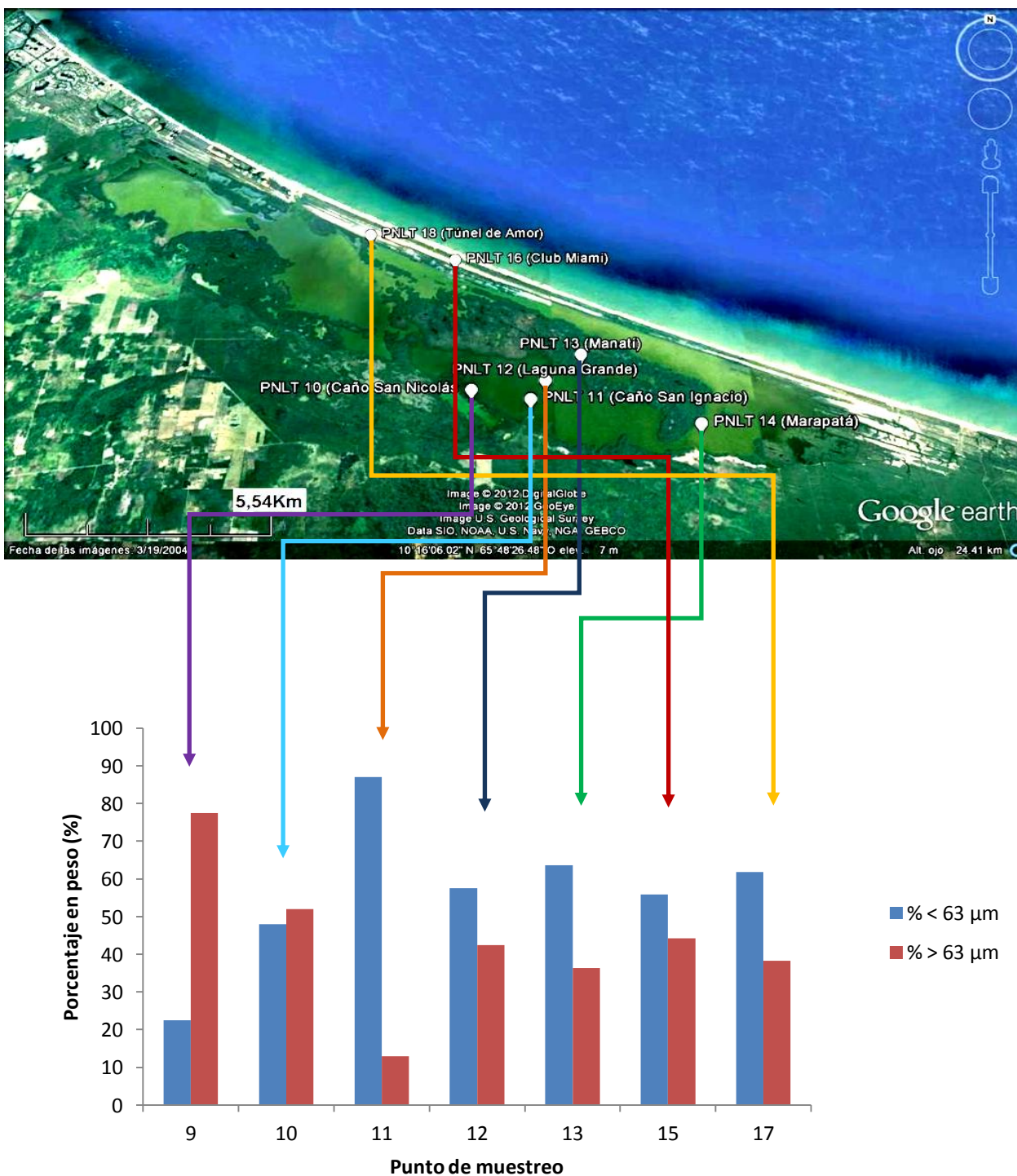


Figura 28. Porcentajes en peso de la fracción >math>> 63 \mu\text{m}</math> y la fracción <math>< 63 \mu\text{m}</math> o lodo en los sedimentos de fondo de la zona de estudio en los períodos de marzo de 2011.

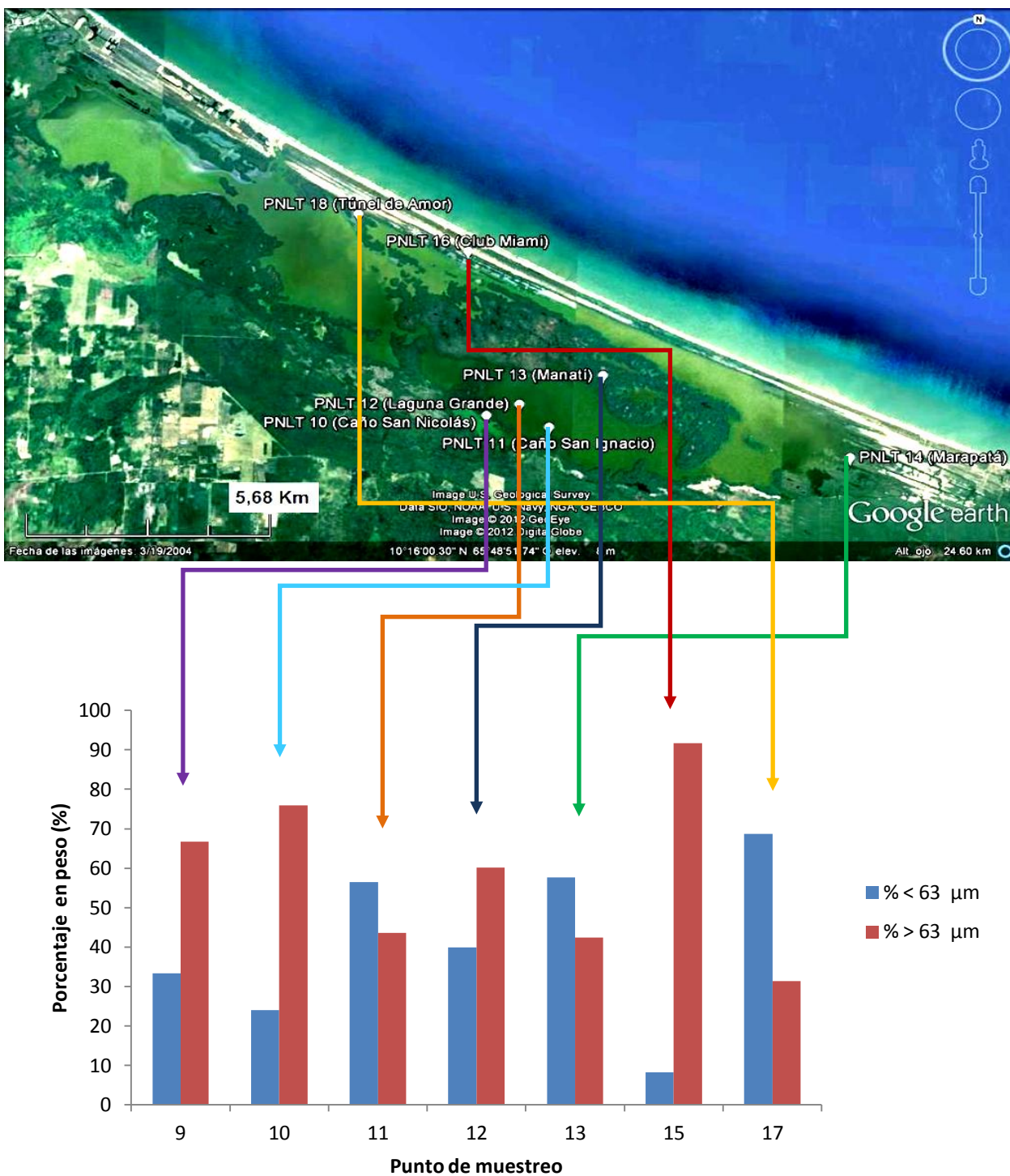


Figura 29. Porcentajes en peso de la fracción $>63 \mu\text{m}$ y la fracción $<63 \mu\text{m}$ o lodo en los sedimentos de fondo de la zona de estudio en los períodos de agosto de 2011.

7.3. Concentración de los elementos bajo estudio

A continuación serán discutidos los valores de concentración para los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn (apéndices 5 y 6) de los sedimentos de fondo de la zona de estudio. Por otra parte, el apéndice 7 contiene los resultados estadísticos de las concentraciones de los elementos, esto realizando 3 réplicas a dos muestras en los diferentes extractos obtenidos; es decir, el extracto de HCl 1M, el de HNO_{3(c)} y el obtenido de la digestión total (HF_(c) y agua regia), lo cual suministró información del error de las concentraciones de los elementos y de la precisión del método.

7.3.1. Coeficiente de variación

Por medio de las concentraciones obtenidas en los diferentes extractos para los elementos contenidos en los sedimentos de fondo estudiados en el presente trabajo de investigación, se determinaron los respectivos coeficientes de variación, obtenidos a partir de la siguiente ecuación:

$$CV (\%) = \frac{\text{Desviación estándar}(S)}{\text{Promedio } (X_{\text{prom}})} \times 100\%$$

7.3.2. Límite de detección

Este parámetro estadístico se define como la concentración del analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco Y_B , más tres veces la desviación estándar del blanco S_B , es decir:

$$L.O.D. = Y_B + 3S_B$$

No obstante, es bueno destacar que Y_B es igual al punto de corte de la curva de calibración del elemento en cuestión, por lo que S_B puede ser tomado como el error

típico de dicha curva al realizar el análisis de regresión y finalmente obtener un valor en concentración. De esta forma para este Trabajo Especial de Grado se procedió a la depuración de los datos obtenidos mediante las técnicas EEA y EAA [46,50].

7.3.3. Distribución espacial

A fin de visualizar la distribución y abundancia de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn, se realizaron gráficos de las concentraciones de dichos elementos en los sedimentos de fondo de la zona de estudio, con cada uno de los extractos obtenidos para todos los períodos de muestreo. Se utilizó para evidenciar más claramente las concentraciones de los elementos por extracto y totales en el sedimento, un mapa modelo similar al de la figura 30, el cual presenta todos los puntos muestreados en los diferentes períodos y fue incorporando en él, gráficos de barras indicativos de la concentración de cada elemento.

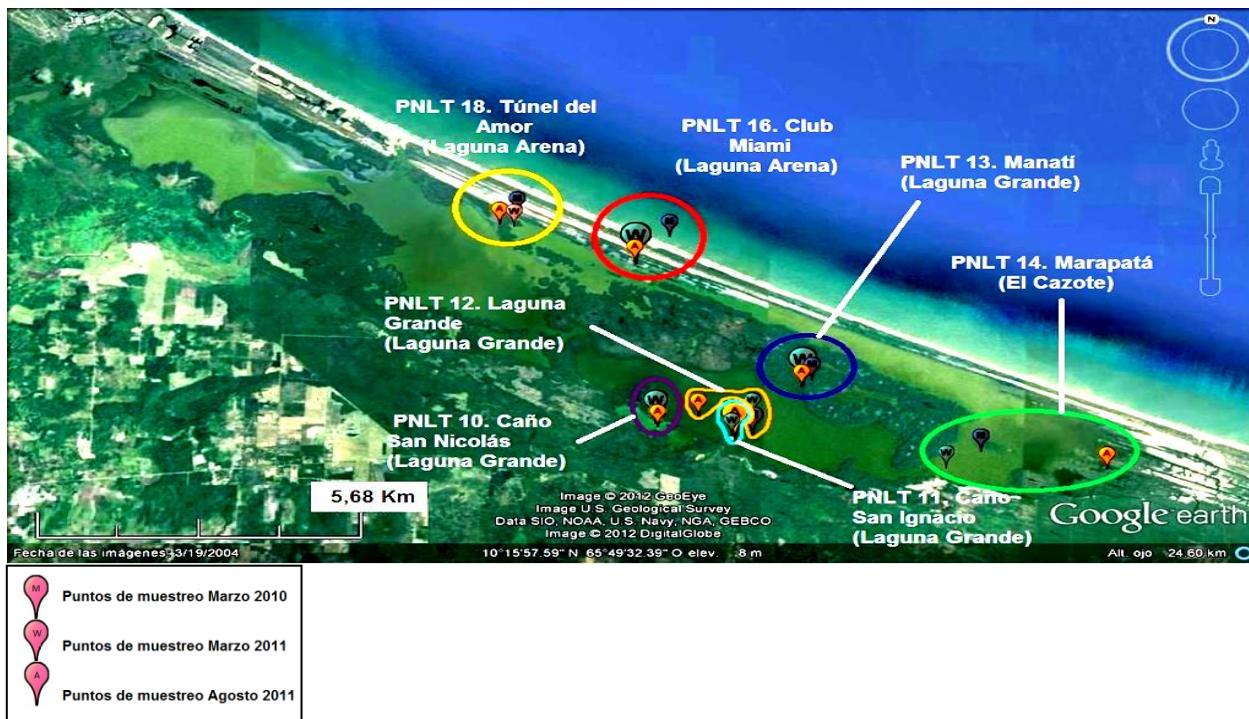


Figura 30 [44,45]. Mapa modelo de ubicación de los puntos de muestreo para todos los períodos.

Los íconos encerrados en color morado, representan el punto 9 (PNLT 10) y los encerrados en azul turquesa representan el punto 10 (PNLT 11) para los períodos de marzo y agosto de 2011. Por su parte los íconos encerrados en color naranja, azul marino, verde, rojo y amarillo representan los puntos 11 (PNLT 12), 12 (PNLT 13), 13 (PNLT 14), 15 (PNLT 16) y 17 (PNLT 17) respectivamente, para los tres períodos muestreados.

A continuación serán discutidos cada uno de los elementos bajo estudio en el siguiente trabajo de investigación. Por otro lado, con la finalidad de corroborar asociaciones entre los elementos, ha sido evaluado el grado de correlación entre metales traza y constituyentes mayoritarios, el cual es frecuentemente utilizado para indicar el origen de los elementos ^[46,50].

7.3.3.1. Aluminio (Al)

El análisis de las concentraciones totales de Al contenidas en los sedimentos de fondo, muestra que los valores oscilaron entre 121988 y 184451 $\mu\text{g/g}$ para período de marzo de 2010, mientras que en el período de marzo de 2011 los valores se encontraron entre 44465 y 186841 $\mu\text{g/g}$; por su parte, en el período de agosto 2011 los valores circularon entre 78908 y 192569 $\mu\text{g/g}$, notándose que estas últimas concentraciones son las más elevadas. Puede apreciarse más claramente en la figura 31 que las concentraciones de este elemento en el período de agosto de 2011 en la mayoría de los puntos de muestreo son mucho más elevadas en comparación con los otros períodos, esto podría deberse a que durante dicho período se presentó gran cantidad de lluvias, por lo que ocurre un elevado aumento en la velocidad de las aguas de escorrentía y afluentes conectados a la zona de estudio, las cuales transportan hacia ella gran cantidad de sedimentos que son ricos en minerales que contienen Al, como las arcillas, oxihidróxidos amorfos y cristalinos y aluminosilicatos ^[7, 9,36,45].

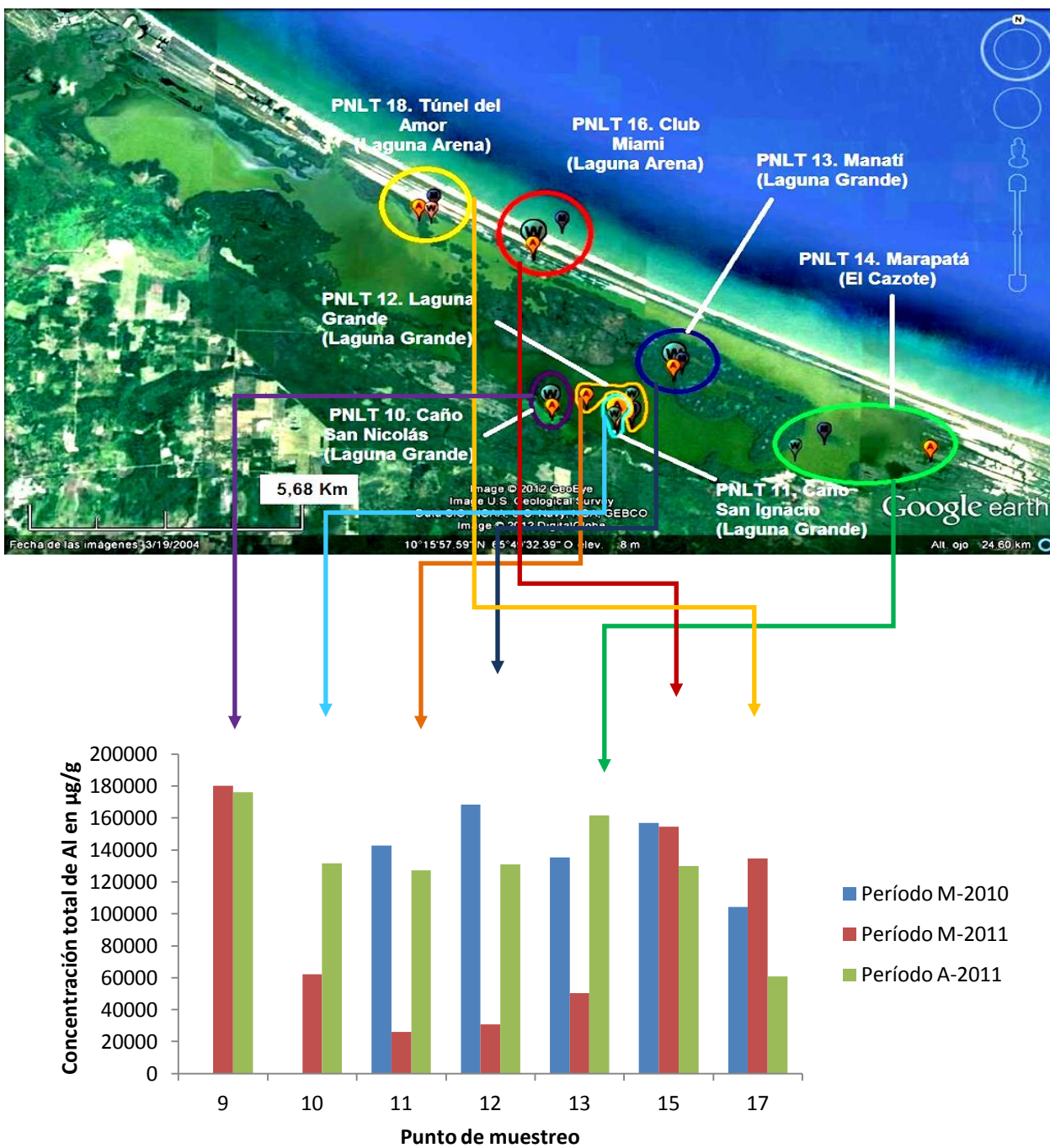


Figura 31. Distribución espacial y temporal total de Al en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

En el mismo orden de ideas el análisis general de Al, es decir, en todos los períodos de muestreo indica que las concentraciones en el extracto de HCl 1M oscilaron entre 2851 y 5779 $\mu\text{g/g}$; la presencia de este elemento en dicho extracto, podría estar asociada a oxihidróxidos amorfos de Al en la fracción lodo estudiada [7].

Por otro lado, las concentraciones obtenidas en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ varían entre 9086 y 41306 $\mu\text{g/g}$, más elevadas en comparación con el extracto anterior [21], lo que puede indicar la presencia de minerales como Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), el cual es un oxihidróxido cristalino. También se puede atribuir a algún mineral de tipo arcilla como la andalucita (Al_2SiO_5) [7, 36, 47].

Aunado a ello se observan concentraciones mucho más elevadas de este elemento en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia en comparación con los otros dos extractos anteriores, ya que estos valores oscilaron entre 26077 y 179996 $\mu\text{g/g}$, lo que indica que dicho elemento también se encuentra asociado a aluminosilicatos como la caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) [47].

Se presenta también una tendencia en aumento hacia la zona de Laguna Grande (suroeste de la Laguna), todo esto puede notarse claramente en la figura 32, donde el punto 9 (PNLT 10) presenta las mayores concentraciones de este elemento, esto indicando que los afluentes cercanos a este como el Caño San Nicolás y otros conectados a la laguna transportan gran cantidad de sedimentos que son ricos en minerales de tipo arcilla, aluminosilicatos y oxihidróxidos amorfos y cristalinos como los indicados anteriormente, que contienen en su estructura este elemento en cuestión [7, 9, 36, 43]. En dicha figura también puede observarse y corroborarse lo antes explicado en la distribución temporal y espacial total mostrada en la figura 30, ya que el extracto en donde se presentaron las mayores concentraciones fue el de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia, el cual es suficiente fuerte como para destruir dichas fases minerales. Este elevado aporte de carga sedimentaria es debido al aumento de la velocidad del agua de las corrientes y

afuentes conectados a la zona en estudio a causa de las lluvias presentes en dicho período.

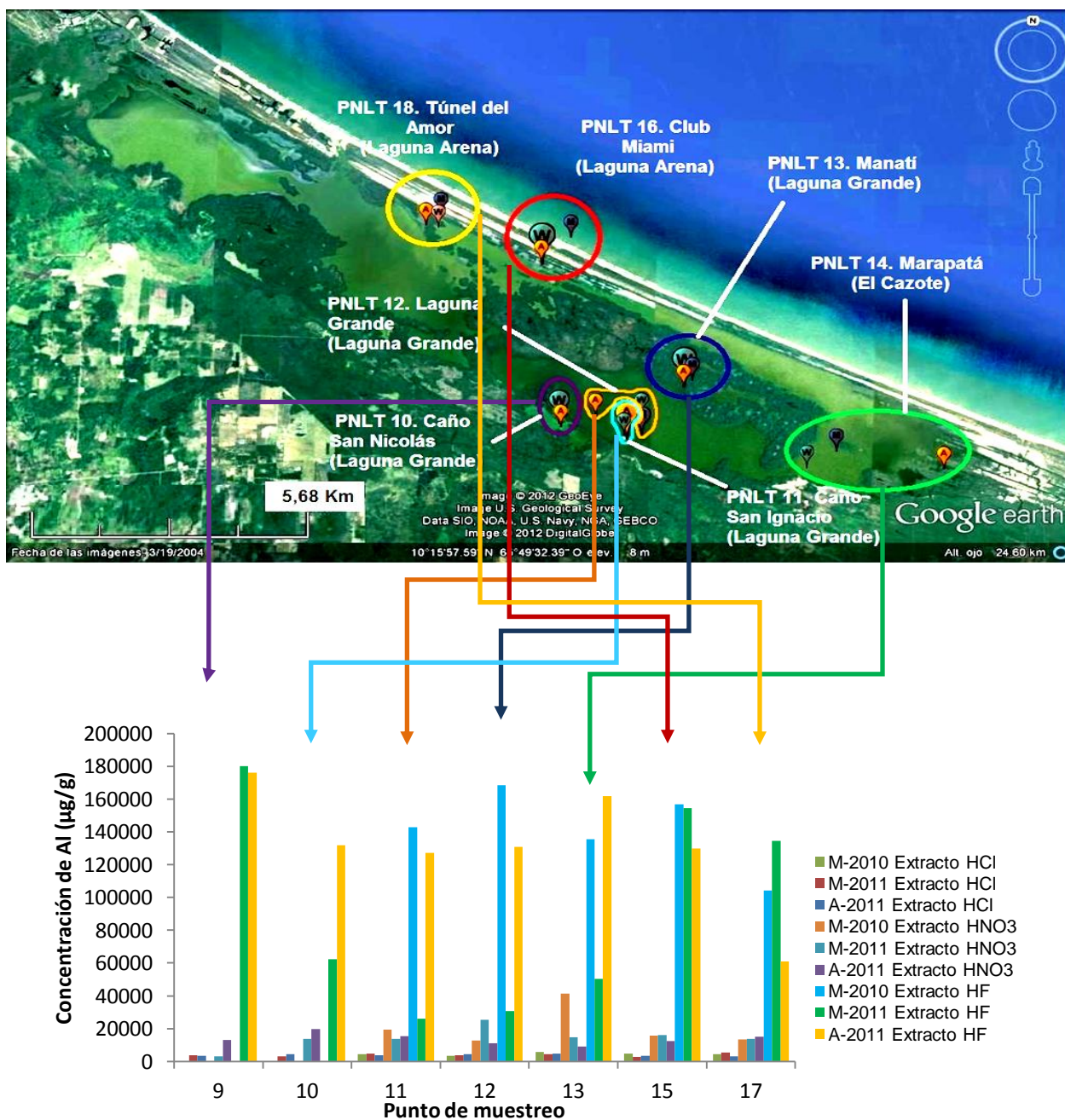


Figura 32. Distribución espacial de Al en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo

7.3.3.2. Hierro (Fe)

Las determinaciones de Fe en los sedimentos de fondo, específicamente en la fracción lodo, muestra que los valores varían entre 33250 y 62222 $\mu\text{g/g}$ para período de marzo de 2010 y para el período de marzo de 2011 se encontraron valores entre 18315 y 78740 $\mu\text{g/g}$; aunado a ello, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 se encontraron entre 28729 y 62860 $\mu\text{g/g}$.

Puede evidenciarse en la figura 33 que en la mayoría de los puntos muestreados en el período de agosto de 2011 que las concentraciones de este elemento fueron superiores comparadas con las de los otros dos períodos muestreados, específicamente se observa un aumento de concentraciones hacia Laguna Grande (suroeste de la laguna) sobre todo en el punto 9 (PNLT 10). Estos resultados corroboran lo antes dicho en la sección anterior para el elemento Al, es decir, que existe una presencia notable de carga sedimentaria en ese punto de muestreo y parte de esa zona que se encuentra rica en fases minerales de tipo arcilla, aluminosilicatos y oxihidróxidos cristalinos.

Por su parte y en el mismo orden de ideas, los valores obtenidos de este elemento en el extracto de HCl 1M oscilaron desde 11958 hasta 55943 $\mu\text{g/g}$, encontrándose un aumento hacia el suroeste de la laguna, específicamente en Laguna Grande, esto puede observarse más claramente en la figura 34. Estas concentraciones relativamente elevadas se pueden atribuir a algún oxihidróxido amorfo de Fe.

Aunado a ello, las concentraciones obtenidas en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ oscilaron entre 428 y 2048 $\mu\text{g/g}$, estas en comparación con el extracto anterior son bajas, pero a pesar de ello las mismas pueden implicar la parcial destrucción de una fase tipo oxihidróxido cristalino como la goethita ($\alpha\text{FeO}(\text{OH})$)^[47].

Ahora bien, los valores obtenidos en el extracto de HF_(c) y agua regia oscilaron desde 4132 hasta 21513 µg/g, estos son mucho más elevados que los obtenidos en el extracto anterior. Estas altas concentraciones pueden ser debido a la presencia de minerales resistentes como la magnetita (Fe₃O₄) o algún aluminosilicato como la biotita (K(Mg,Fe)₃(AlSi₃O₁₀)(OH)₂), la augita (Ca,Na)(Mg,Fe,Al)(SiAl)₂O₆, entre otros [7, 36, 47].

Además de ello, puede notarse en la figura 35 que existe buena correlación de Fe con Al para todos los períodos muestreados en el extracto de HF_(c) y agua regia, lo que ayuda a confirmar la posible presencia de fases minerales tipo arcilla y aluminosilicatos antes nombradas, ya que esta mezcla de ácidos es capaz de destruir fácilmente esta clase de fases minerales presentes en los sedimentos, es por ello que en dicho extracto se obtuvieron las mayores concentraciones de este elemento.

También puede observarse en dicha figura que hay una tendencia en aumento de las concentraciones de Fe hacia la zona de Laguna Grande (suroeste de la laguna), sobre todo en el período de agosto de 2011 y específicamente los mayores valores se encuentran ubicados en el punto de muestreo 9 (PNLT 10) perteneciente al Caño San Nicolás, mientras que los valores más bajos se encuentran hacia la zona de Laguna Arena (noroeste de la laguna), esto también confirma lo antes dicho para el elemento Al y confirma la relación con el mismo, es decir, que en ese punto de muestreo el agua de escorrentía proveniente de ese Caño y otros afluentes cercanos a él y conectados a la laguna transportan una elevada cantidad de sedimentos que contienen grandes proporciones de minerales de tipo arcilla, aluminosilicatos y oxihidróxidos amorfos y cristalinos como los indicados anteriormente y que contienen en su estructura estos dos elementos, debido a la significativa cantidad de lluvias presentes en ese período muestreado.

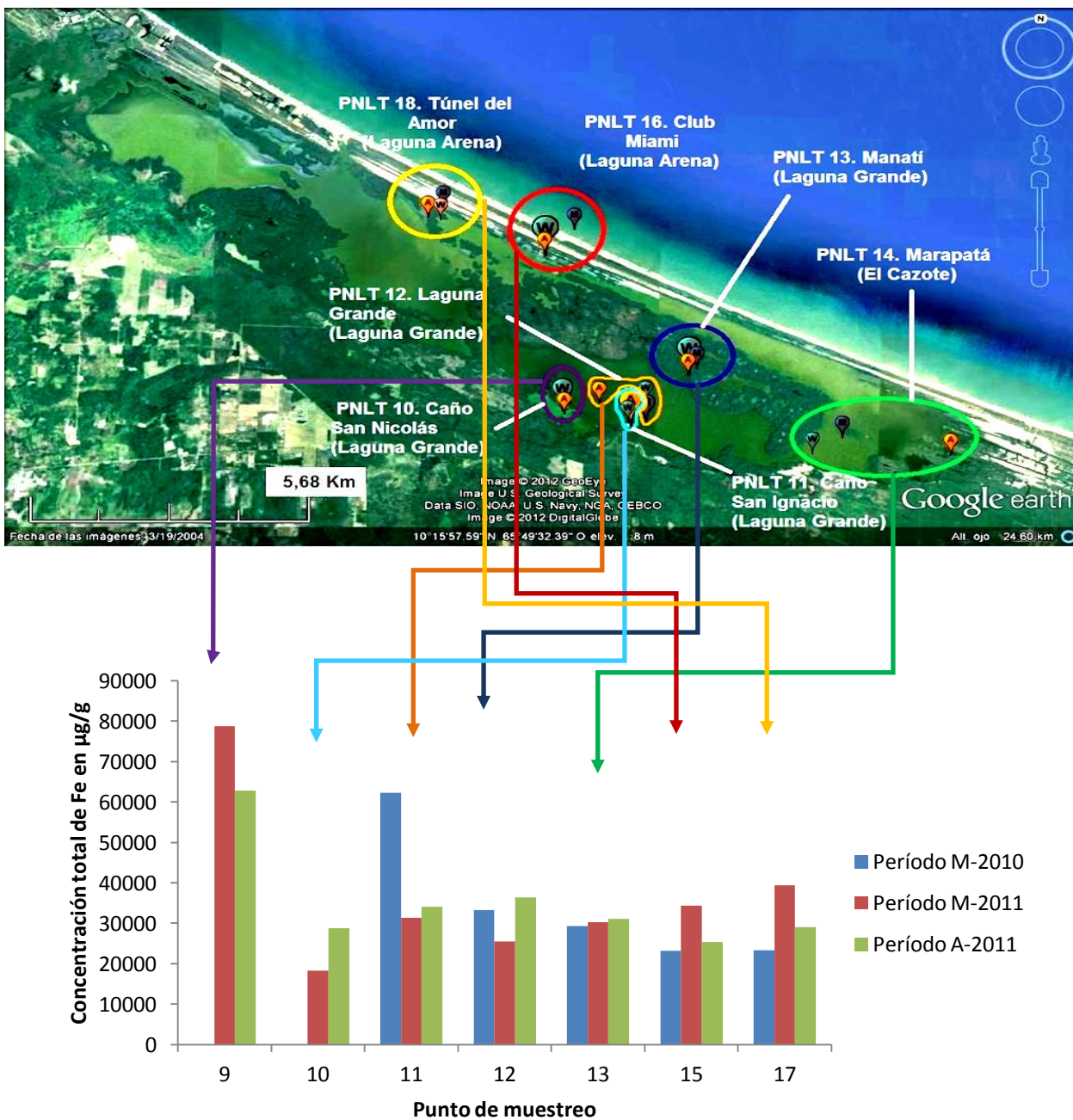


Figura 33. Distribución espacial y temporal total de Fe en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

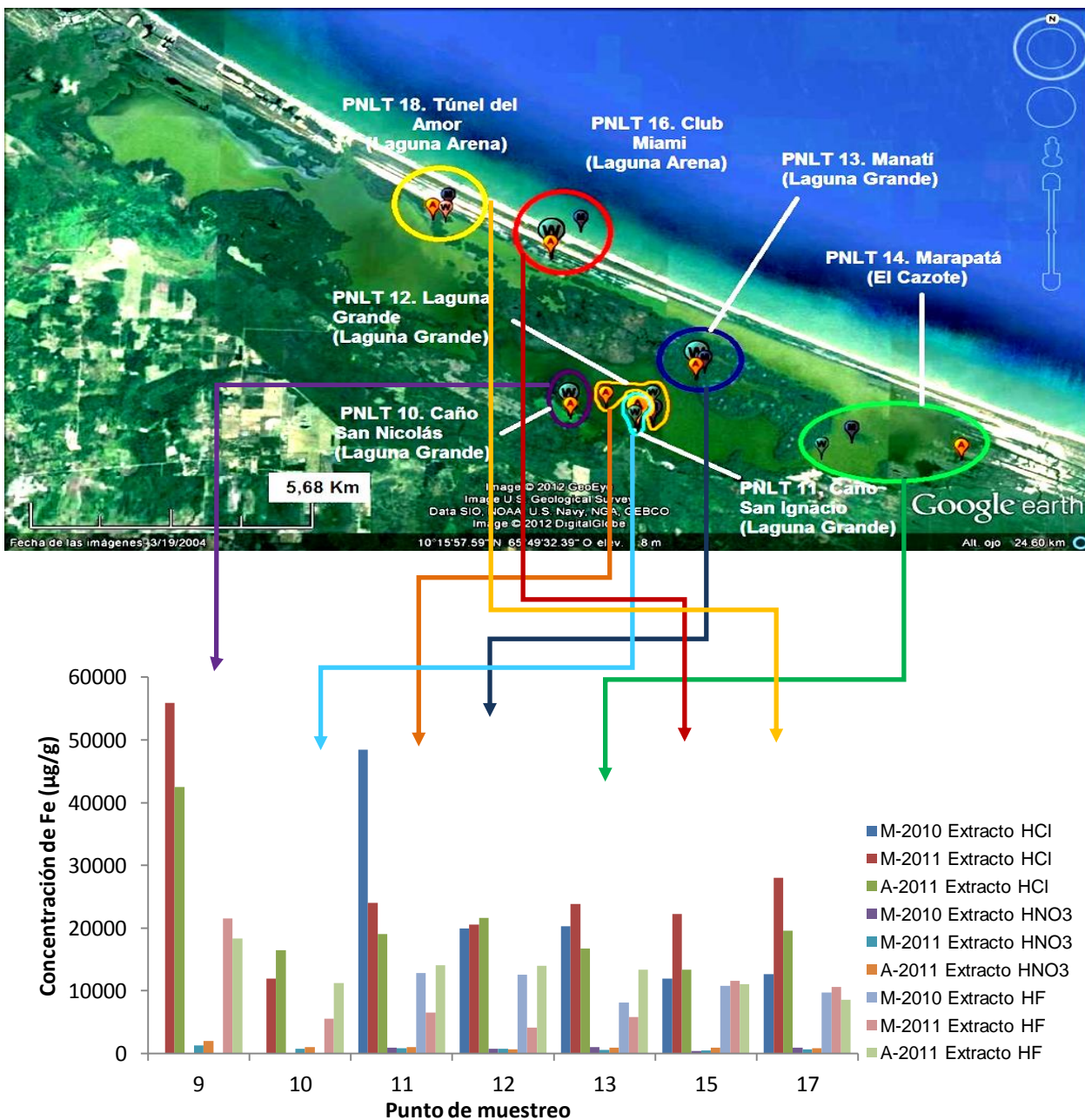


Figura 34. Distribución espacial de Fe en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo

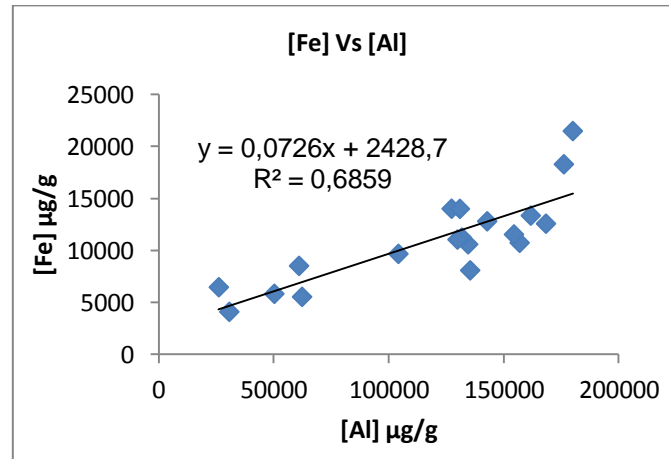


Figura 35. Correlación de Fe/Al en el extracto HF_(c) y agua regia para todos los períodos muestreados

7.3.3.3. Manganeso (Mn)

Ahora el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo del elemento Mn, muestra que los valores oscilaron entre 194 y 409 µg/g para período de marzo de 2010, mientras que para el período de marzo de 2011 se encontraron valores entre 243 y 644 µg/g; por otra parte, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 se encontraron entre 346 y 649 µg/g. Se puede notar que el período de agosto de 2011 presenta las mayores concentraciones, además de un notable aumento hacia la zona de Laguna Grande, específicamente en el Caño San Nicolás (punto 9 (PNLT 10)), esto al igual que en el caso de los elementos Al y Fe (figura 36), lo que podría implicar un transporte de sedimentos en ese punto de muestreo que contienen oxihidróxidos de Mn amorfos y cristalinos por parte de las aguas de escorrentía y afluentes conectados a la laguna como se dijo en las anteriores secciones [7, 9, 36,43].

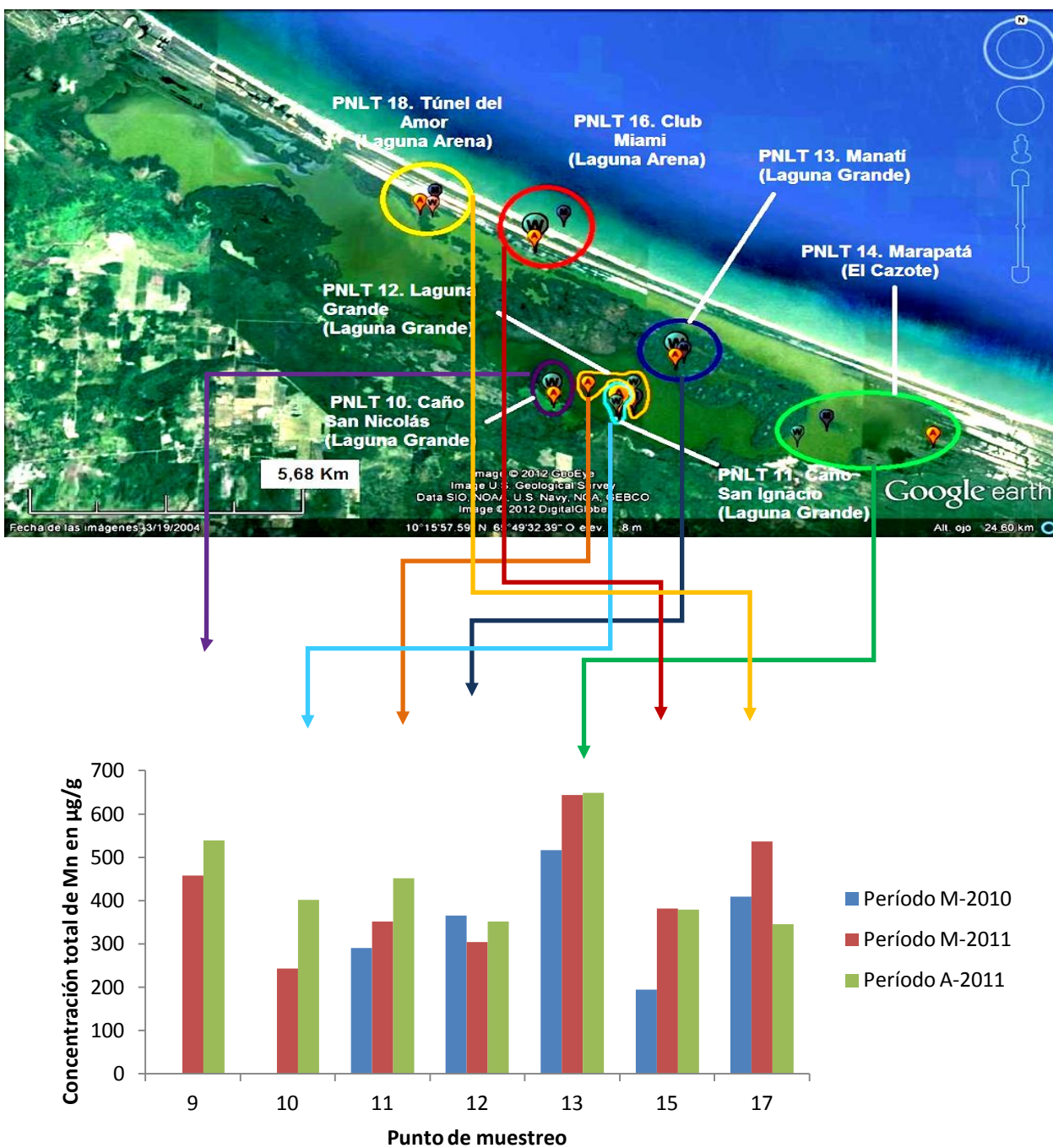


Figura 36. Distribución espacial y temporal total de Mn en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

Por su parte, en el extracto de HCl 1M, se obtuvo concentraciones desde 124 a 437 $\mu\text{g/g}$, a pesar de ser concentraciones bajas pueden asociarse a oxihidróxidos amorfos de Mn o como elemento sorbido en oxihidróxidos amorfos de Fe. Todo esto parece indicar que en los sedimentos de fondo de la zona de estudio, hay una pequeña cantidad de oxihidróxidos amorfos de Mn y poco significativa en comparación con otras fases minerales como las arcillas y los aluminosilicatos.

En el mismo orden de ideas, en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ se obtuvo un rango de concentraciones entre 88 y 324 $\mu\text{g/g}$, siendo estos valores más bajos en comparación con los obtenidos en el extracto anterior. Al igual que en el extracto anterior, no se obtuvieron buenas correlaciones entre Mn, Al y Fe al tomar los datos de todos los períodos, caso contrario cuando se tomaron los datos individualmente, ya que pudo apreciarse que existe buena correlación con el Fe en el período de marzo de 2010. La figura 37 muestra buena correlación, lo que indica que el Mn a pesar de encontrarse en bajas concentraciones, puede estar asociado a oxihidróxidos cristalinos como la manganita ($\text{MnO}(\text{OH})$).

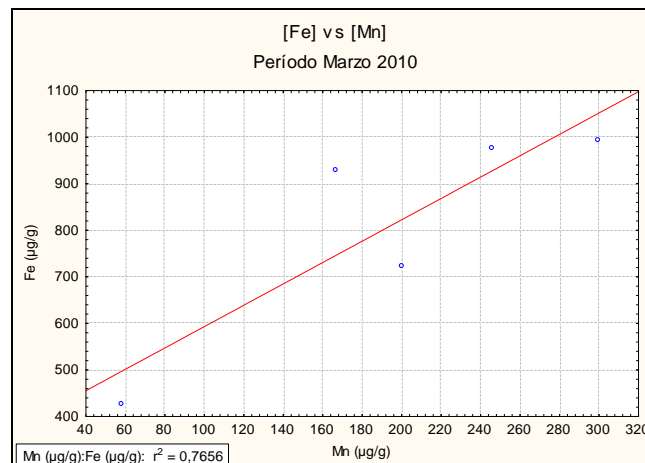


Figura 37. Correlación de Fe/Mn en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de marzo de 2010

Por su parte, como era de esperarse no se obtuvieron valores de concentración de Mn para el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia, ya que se esperaba que realizando las dos primeras extracciones se destruyeran todas las posibles fases relacionadas con este elemento.

Además de todo lo antes indicado para el elemento Mn puede evidenciarse en la figura 38, que en la mayoría de los puntos muestreados en el período de agosto de 2011, las concentraciones de este elemento fueron superiores comparadas con las de los otros dos períodos muestreados, notándose un ligera tendencia en aumento hacia El Cazote (sureste de la laguna).

Estos resultados corroboran lo antes dicho en la secciones anteriores para los elementos Al y Fe, es decir, que existe una presencia notable de carga sedimentaria que se encuentra rica en fases minerales de tipo arcilla o aluminosilicatos y oxihidróxidos cristalinos de Fe principalmente y oxihidróxidos de Mn, producto del transporte de las aguas de escorrentía y afluentes cercanos debido a la alta velocidad de los mismos a causa de las lluvias presentes.

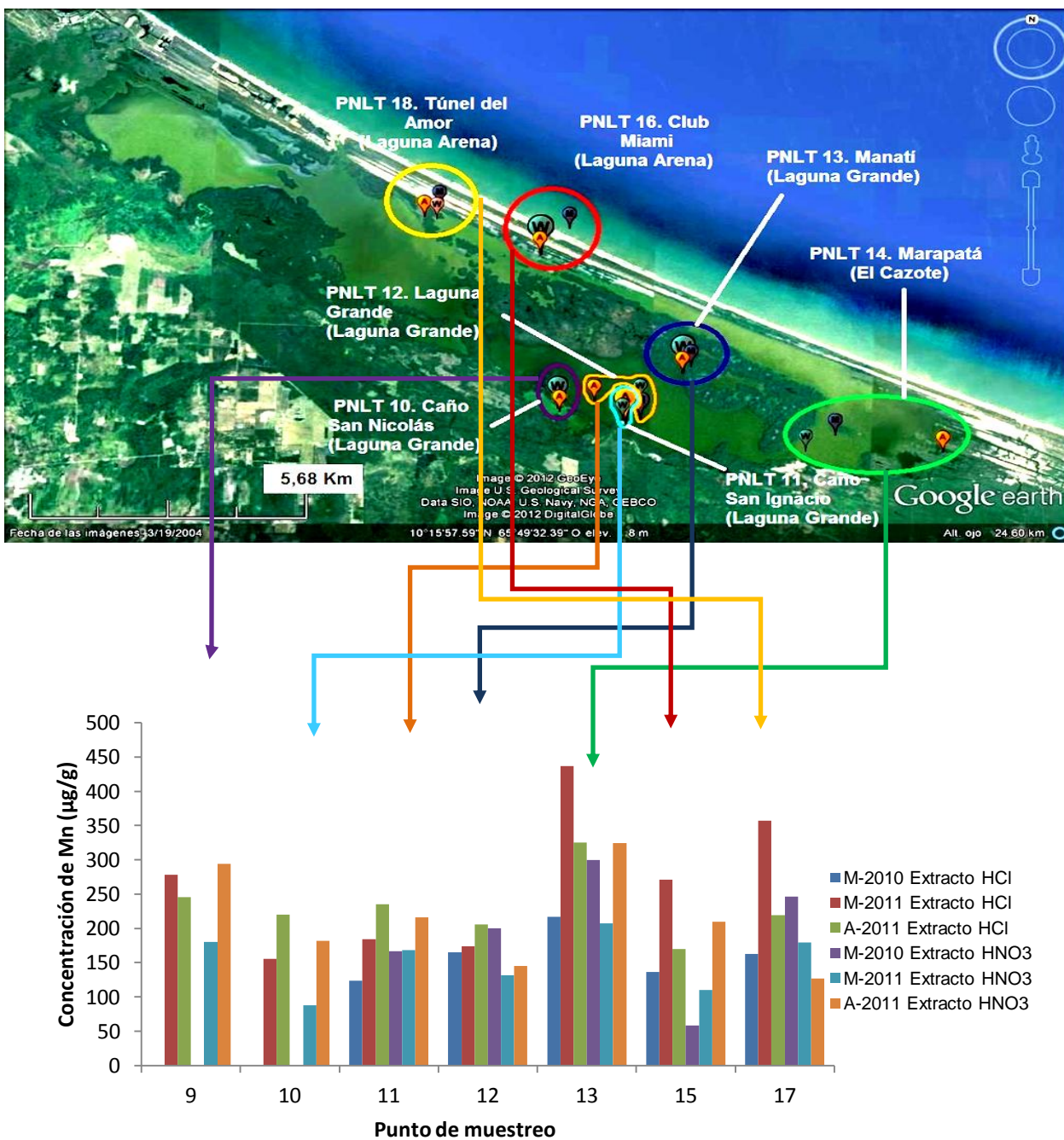


Figura 38. Distribución espacial de Mn en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

7.3.3.4. Calcio (Ca)

Siguiendo el mismo orden de ideas anterior, para el elemento Ca, el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo, indicó que los valores oscilaron entre 29 y 238 $\mu\text{g/g}$ para período de marzo de 2010; por su parte, en el período de marzo de 2011 se encontraron valores que circulaban entre 183 y 4887 $\mu\text{g/g}$; aunado a ello, los valores encontrados en el período de agosto 2011 oscilaban entre 247 y 6522 $\mu\text{g/g}$.

Al igual que en el caso de los elementos antes discutidos, se puede evidenciar que el período de agosto de 2011 presenta las mayores concentraciones obtenidas de Ca, lo que confirma que durante ese período muestreado, en el cual existe gran predominancia de lluvias, se presenta un elevado transporte de carga sedimentaria que puede contener las fases minerales antes nombradas y otro material como conchas marinas (estas ricas en CaCO_3), debido a los aportes de las aguas de escorrentía y afluentes conectados a la zona de estudio y a la laguna. También hay que destacar que la zona también contiene gran cantidad de conchas marinas debido a la presencia de manglares, los cuales retienen a las mismas entre sus raíces.

Esta tendencia de concentraciones en el período de agosto de 2011 puede ser notada más claramente en la figura 39, la cual representa la distribución temporal y espacial de este elemento. También es resaltante observar en dicha figura que el punto 13 (PNLT 14) es quien presenta los mayores valores de concentración de Ca, lo cual podría estar asociado a la presencia de vegetación como los manglares, los cuales retienen gran cantidad de conchas marinas en sus raíces. Ahora, para el extracto de HCl 1M se obtuvieron valores de concentración para todos períodos que oscilaban entre 29 y 6485 $\mu\text{g/g}$, notándose en la figura que los valores más altos encontrados fueron los del período de agosto de 2011, esto puede ser evidenciado más claramente en la figura 40. La presencia del elemento Ca en este período puede ser atribuida al gran aporte de conchas marinas contenidas en los sedimentos, estas son aportadas por

la elevada velocidad de las aguas de escorrentía y por afluentes en la zona de estudio. Nótese también en dicha figura que los mayores valores de concentración de este elemento se encuentran en este extracto y específicamente en el punto 13 (PNLT 14), lo corrobora la asociación de dicho elemento con fases carbonáticas debido a la presencia de conchas marinas y que en ese punto hay mayor cantidad de las mismas en comparación con los otros puntos de muestreo. Por esta razón se puede intuir que las concentraciones de Ca obtenidas en los períodos de sequía, específicamente marzo de 2010 y 2011 implican que este se encuentra como elemento sorbido en la superficie de algún oxihidróxido de Fe o Mn ^[7], principalmente de Fe ya que el Mn se encuentra en bajas concentraciones, mientras que las concentraciones obtenidas en el período de lluvias, específicamente en agosto de 2011, pueden ser atribuidas a algún aporte por parte de las conchas marinas las cuales contienen fases carbonáticas ^[7].

En este caso tampoco se obtuvieron buenas correlaciones al tomar los datos de todos los períodos, sin embargo, en la figura 41 se pudo observar una buena correlación con el elemento Mn en el período de agosto de 2011 en el extracto de HCl 1M, lo que puede indicar la presencia de fases carbonáticas como la rodocrosita (MnCO_3) ^[7]

Por otra parte, en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$, se pudieron obtener valores de concentración de Ca comprendidos entre 4 y 49 $\mu\text{g/g}$, estos sustancialmente más bajos comparándolos con los valores obtenidos en el extracto anterior. Al igual que en el extracto anterior no se obtuvieron buenas correlaciones al tomar los datos de todos los períodos, y tampoco tomando dichos datos de forma individual, sin embargo, a pesar de las bajas concentraciones obtenidas en este extracto, puede haber una asociación de este elemento con aluminosilicatos del grupo de las arcillas como vermiculita $((\text{Mg,Ca})_{0,3}(\text{Mg,Fe,Al})_{3,0}(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ o a partículas de carbonato recubiertas con oxihidróxidos de Fe cristalino ^[7,47]. Por otro lado, hay que destacar que en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia no se presentaron concentraciones de este elemento, lo

que puede indicar que el mismo se encuentra asociado sólo a fases que pueden ser destruidas fácilmente en el HCl 1M y $\text{HNO}_3(c)$

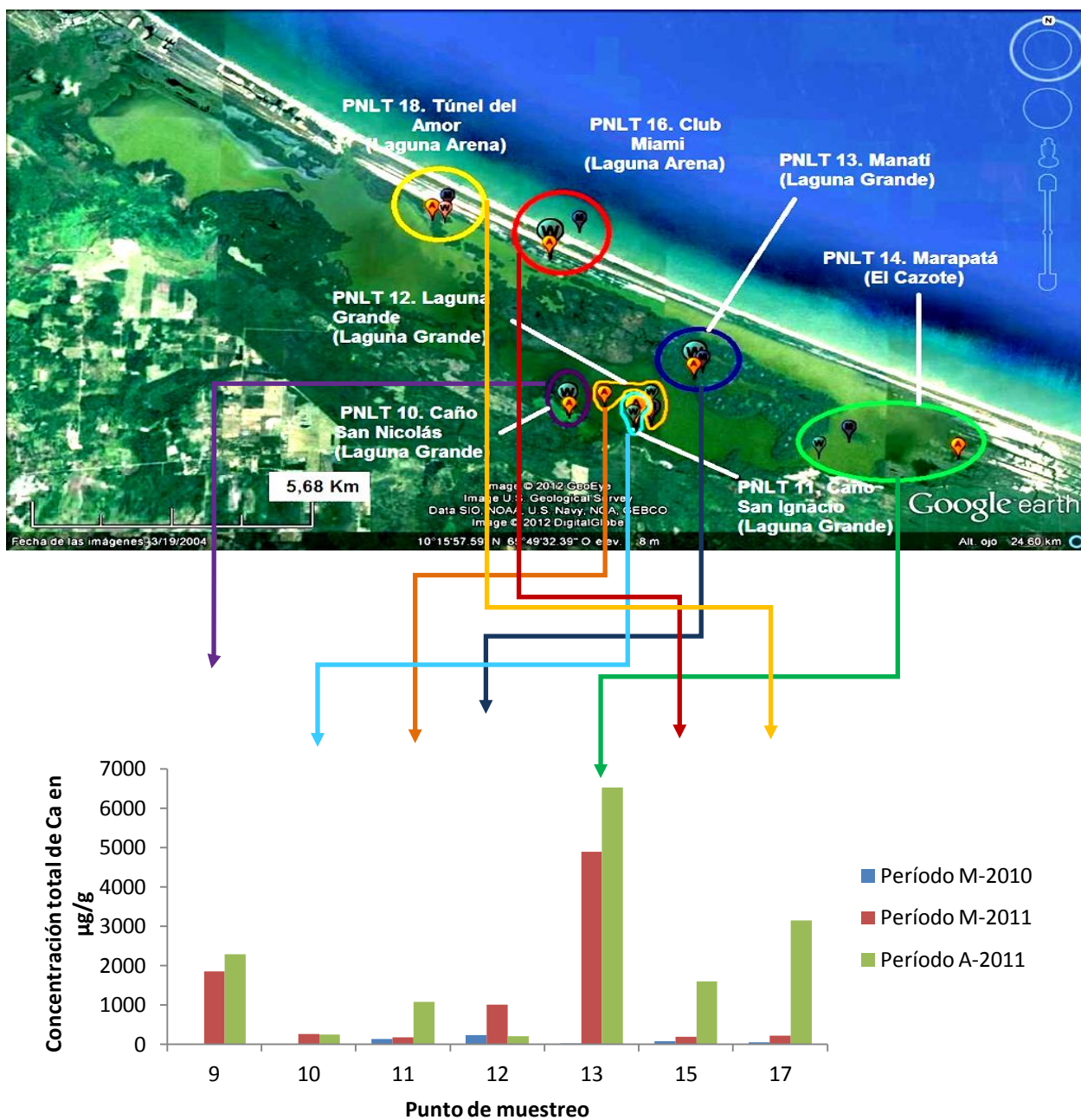


Figura 39. Distribución espacial y temporal total de Ca en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

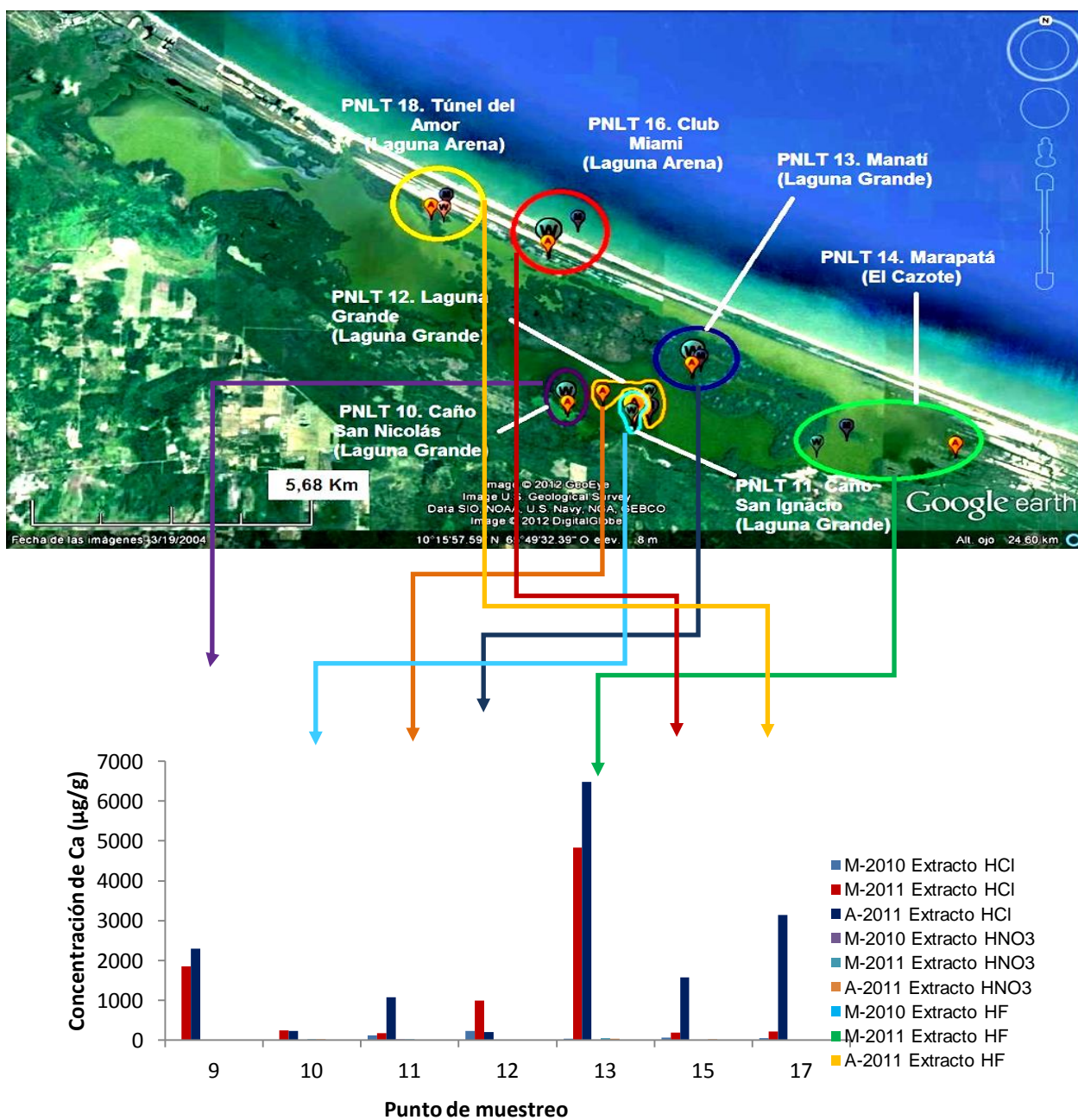


Figura 40. Distribución espacial de Ca en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

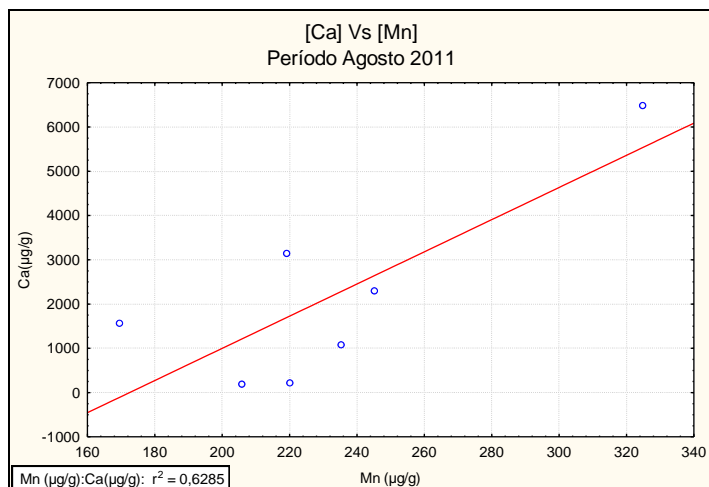


Figura 41. Correlación de Mn/Ca en el extracto de HCl 1M para agosto de 2011.

7.3.3.5. Magnesio (Mg)

Continuando con el elemento Mg, el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo en la zona de estudio, mostró que los valores para período de marzo de 2010 oscilaron entre 4423 y 10758 µg/g; mientras que, para el período de marzo de 2011 estos valores se encontraban entre 6785 y 13133 µg/g; por su parte, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 oscilaban entre 7958 y 13030 µg/g.

Este elemento se comporta igual que los otros elementos antes explicados, ya que las mayores concentraciones se encuentran en el período de agosto de 2011 (figura 42). Los mayores valores se encuentran hacia Laguna Grande y El Cazote, esto debido a que la influencia de las lluvias, lo cual ocasiona un aumento en la velocidad de de las aguas de escorrentía y afluentes conectados a la zona de estudio y a la laguna, por lo que aumenta el transporte de sedimentos ricos en fases minerales como arcillas, aluminosilicatos que contienen este elemento Mg y también Al Fe y Ca ^[9,43]. En la figura

41 se puede notar que las mayores concentraciones se encuentran hacia el suroeste y sureste de la zona de estudio corroborando lo antes explicado.

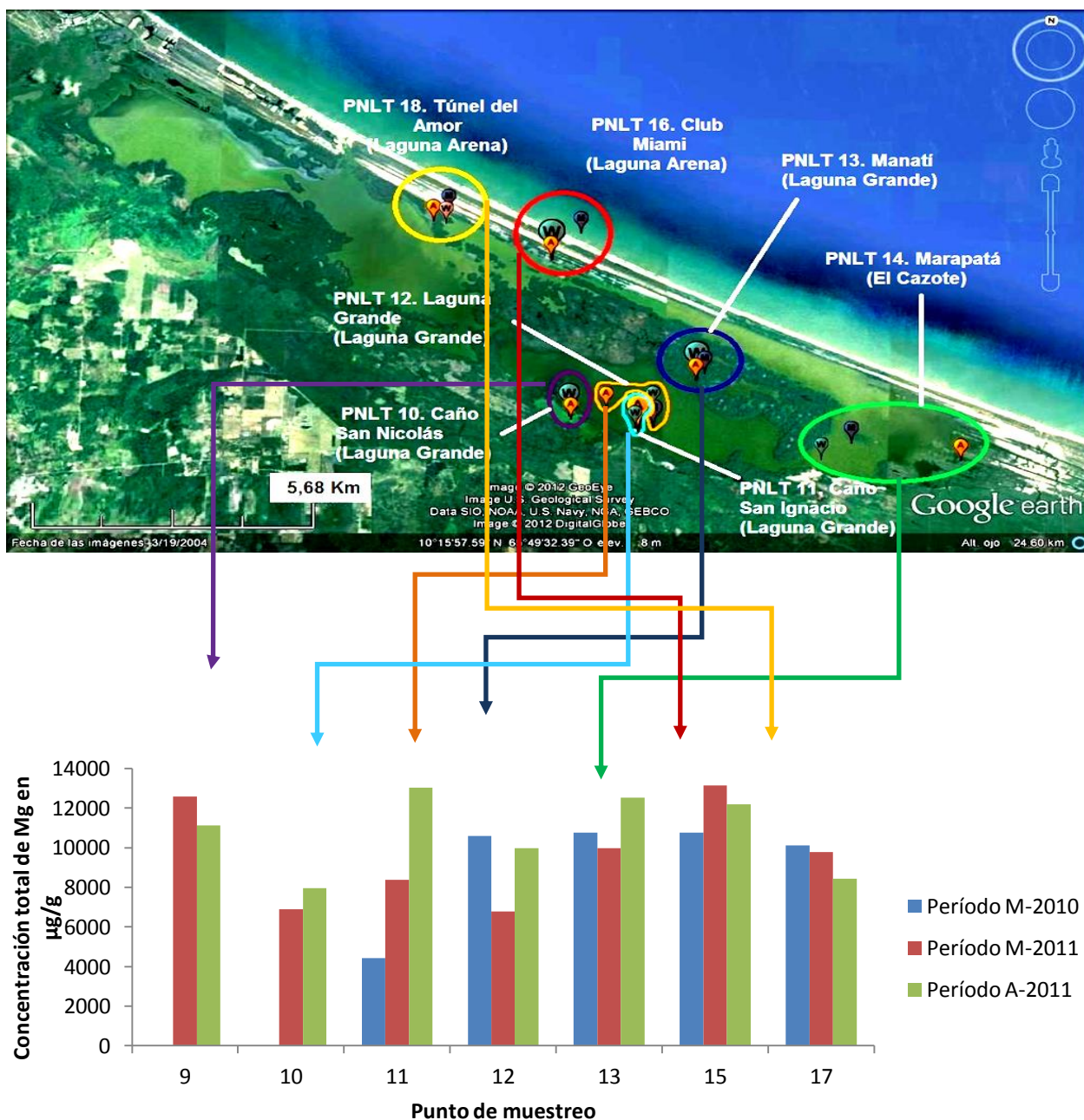


Figura 42. Distribución espacial y temporal total de Mg en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

Las concentraciones de Mg en el extracto de HCl 1M oscilaron entre 2118 y 8325 $\mu\text{g/g}$ para todos los períodos de muestreo. En la figura 43 se muestra claramente que este elemento no presenta muy buenas correlaciones con el Ca y el Mn en este extracto, sin embargo, se puede intuir que este puede encontrarse asociado a alguna fase carbonática como magnesita (MgCO_3) [7,47]. Asimismo, en la figura 44 se puede observar que el punto 13 (PNLT 14) presenta los valores de concentración de Mg más elevados de la zona al igual que el elemento Ca en este extracto, lo que podría implicar que estos dos elementos provienen de una misma fuente, relacionada directamente con los sedimentos de fondo depositados en ese punto de muestreo.

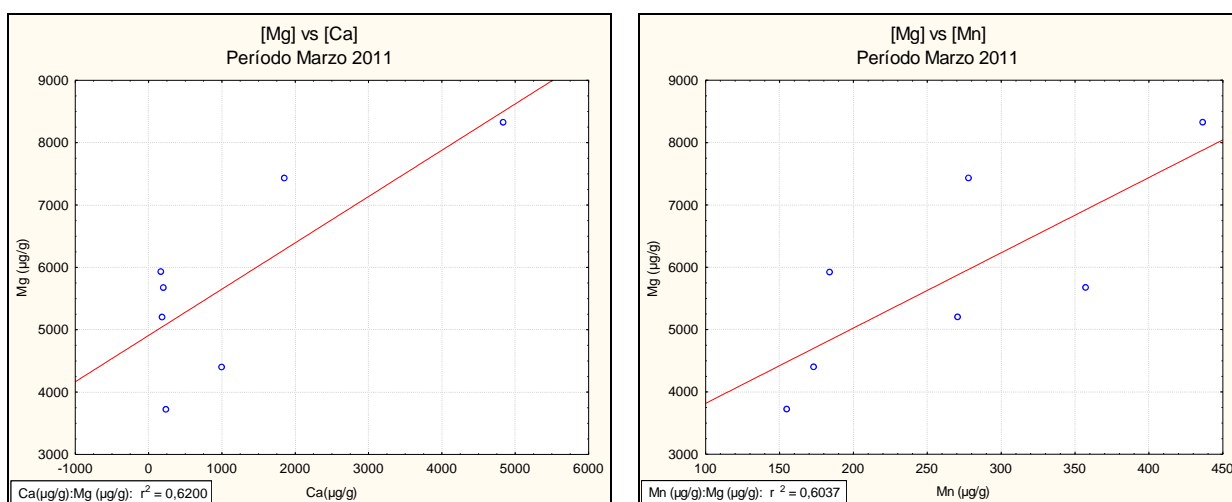


Figura 43. Correlaciones de Mg/Ca y Mg/Mn en el extracto de HCl 1M para el período marzo de 2011.

Por su parte, las concentraciones de Mg asociadas al extracto $\text{HNO}_{3(c)}$ oscilaron entre 280 y 2799 $\mu\text{g/g}$, siendo más bajas en comparación a las obtenidas en el extracto anterior. En la figura 44 se puede observar en general una tendencia ligeramente constante para todos los períodos y en todos los puntos de muestreo, es decir, que en la zona de estudio parece haber una homogeneidad en concentraciones de este elemento y puede haber asociación de fases minerales como las arcillas.

En el mismo orden de ideas, el hecho de que en la litología cercana a la zona de estudio, es decir, en la de Cordillera de la Costa, haya presencia de rocas máficas tal como lo indica Urbani (2002) ^[53], parece indicar que esta también podría ser la causa de las concentraciones de Mg encontradas en este extracto. Aunado a ello, tomando tanto los datos de todos los períodos de muestreo como los datos de cada período por separado, no se obtuvieron buenas correlaciones con Mn y Al, las cuales son mostradas en la figura 45.

En cuanto a la buena correlación con el Mn se puede intuir que puede haber una asociación de Mg con algún óxido como la espinela ($MgAl_2O_4$) o a algún oxihidróxido de Mg como la brucita ($Mg(OH)_2$), mientras que la buena correlación con Al parece evidenciar y corroborar la presencia de micas como la biotita ($(K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2)$), y también de arcillas como la montmorillonita ($((Al,Mg)_8(Si_4O_{10})_4(OH)_8 \cdot 12H_2O)$) o la vermiculita ($((Mg,Ca)_{0,3}(Mg,Fe,Al)_{3,0}(Al,Si)_4O_{10}(OH)_4 \cdot 8H_2O$) en el sistema en estudio; también se puede decir que la buena correlación entre el Al y el Mg, implica una fuente de Mg en el sistema posiblemente asociada a arcillas de alto grado de meteorización como la caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) ^[7,47].

Ahora los valores de Mg en el extracto de $HF_{(C)}$ y agua regia variaron desde 306 hasta 6491 $\mu g/g$, siendo más altos estos valores en comparación con los dos extractos anteriores. Sin embargo, para este extracto no se obtuvo buenas correlaciones con Al y Mg (figura 46), pero a pesar de ello, las altas concentraciones de este elemento en este extracto corroboran la presencia de aluminosilicatos en los sedimentos. Asimismo, en dicha figura 46 se puede notar también la obtención de una buena correlación con el elemento Fe en el período de Agosto de 2011, lo que corrobora dicha presencia de arcillas en la zona ^[7,36].

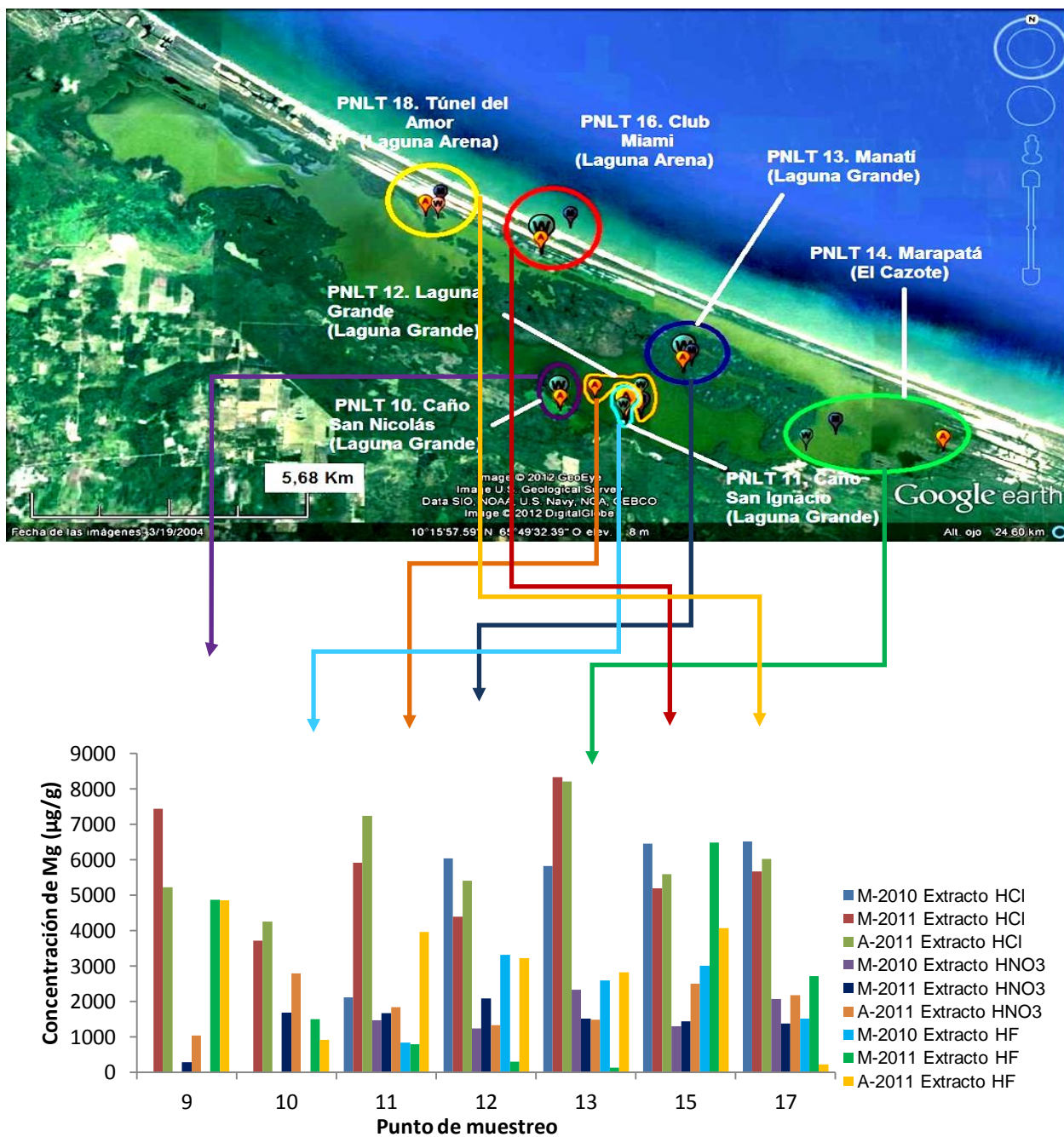


Figura 44. Distribución espacial de Mg en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

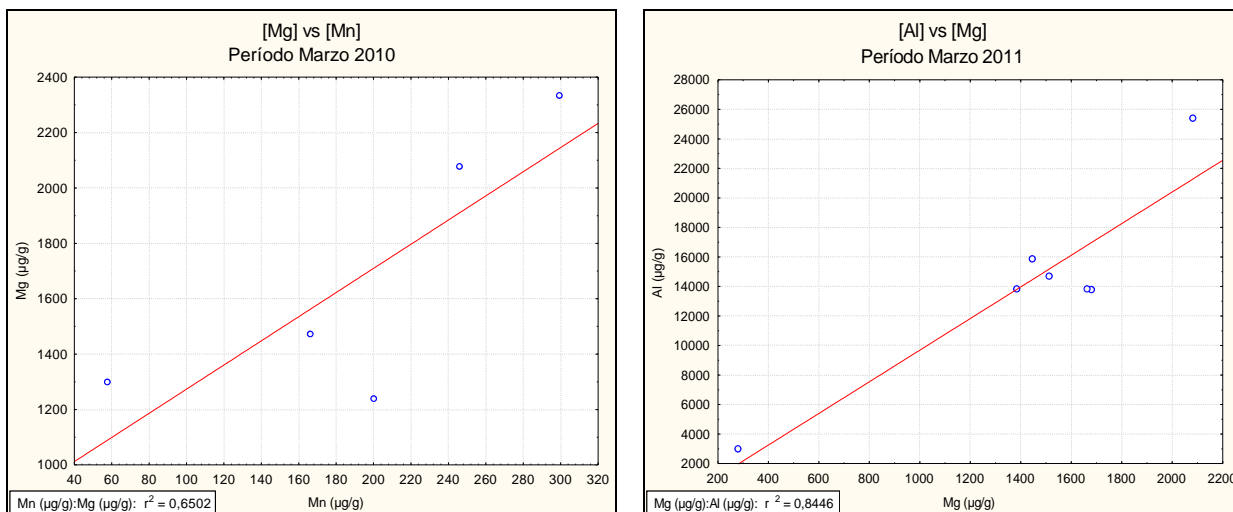


Figura 45. Correlaciones de Mg/Mn y Al/Mg en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de marzo de 2010 y marzo de 2011 respectivamente.

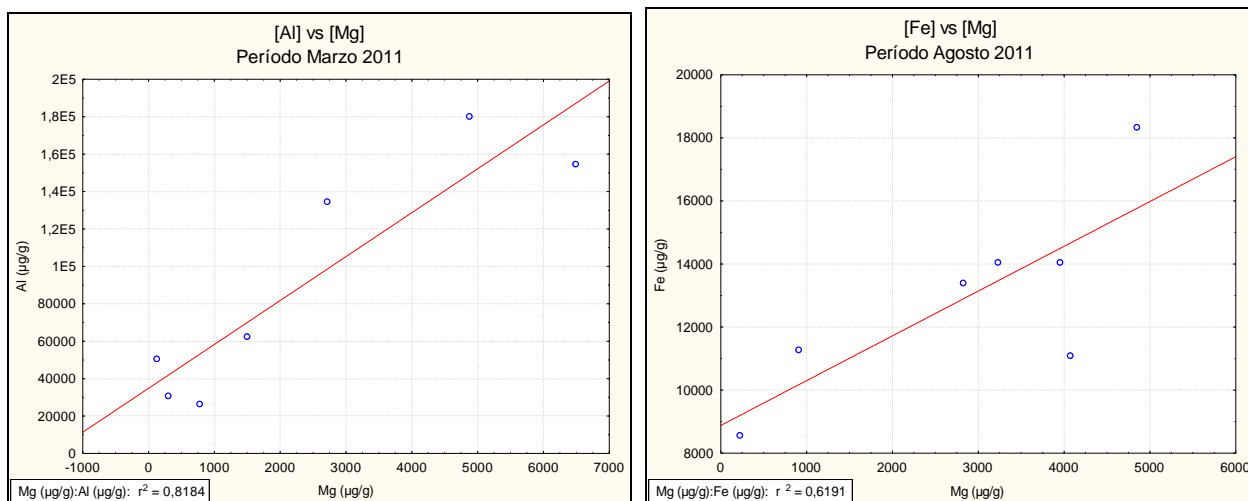


Figura 46. Correlaciones de Al/Mg y Fe/Mg en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia para el período de marzo de 2011 y de agosto de 2011 respectivamente.

7.3.3.6. Potasio (K)

Para el elemento K, el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo en la zona de estudio, mostró que los valores para período de marzo de 2010 oscilaron entre 26117 y 36945 $\mu\text{g/g}$; aunado a ello, para el período de marzo de 2011 estos valores oscilaron entre 11105 y 32685 $\mu\text{g/g}$ siendo más bajos comparados con los del período anterior; por su parte, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 oscilaban entre 19660 y 37478 $\mu\text{g/g}$, siendo estos más elevados en comparación con los otros dos períodos.

Este elemento también sigue la misma tendencia que el Al, Fe, Mn, Ca y Mg, ya que se presentan las mayores concentraciones en el período de agosto de 2011, esto puede ser observado más detalladamente en la figura 47, mostrándose también que los mayores valores se encuentran entre El Cazote y Laguna Arena (sureste y noroeste de la laguna respectivamente), lo que podría indicar una influencia de las lluvias, lo que ocasiona un aumento en la velocidad de las aguas de escorrentía y otros afluentes cercanos y conectados a la dicha zona, junto con la influencia del mar en el caso de Laguna Arena, por lo que ocurre un transporte de material rico en este elemento contenido en fases minerales como micas tipo illita $((\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})])$ que contiene este elemento y algunos de los antes estudiados ^[47].

Al examinar la distribución de K en los diferentes extractos estudiados, puede indicarse que para HCl 1M los valores oscilaron entre 706 y 2196 $\mu\text{g/g}$, mientras que en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ estos valores están entre 541 y 4106 $\mu\text{g/g}$, y finalmente, en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia se obtuvieron los mayores valores de este elemento, en un rango comprendido entre 9567 y 34607 $\mu\text{g/g}$. Estos últimos son los valores más elevados entre los tres extractos y esto puede ser asociado a gran cantidad de arcillas o aluminosilicatos como los antes nombrados. Esto puede ser notado en la figura 48, la cual muestra la distribución espacial de este elemento en todos los períodos y extractos obtenidos. Otro aspecto resaltante mostrado en dicha figura, es que al igual que el Mg y

el Ca, los valores más elevados se encuentran en el punto 13 (PNLT 14), lo que indica que este elemento al igual que los otros dos proviene de una misma fuente, posiblemente aluminosilicatos que contienen estos elementos en su estructura.

Sin embargo, no se obtuvieron buenas correlaciones del K con Fe y Ca en el extracto de HCl 1M (figura 49). Estas correlaciones a pesar de no ser muy buenas, pueden ayudar a confirmar que en los sedimentos de fondo de la zona de estudio, específicamente en la fracción lodo, existen fases minerales de tipo aluminosilicatos o arcillas en fase amorfa, que fácilmente pueden ser destruidas por el HCl a esa concentración.

En el mismo orden de ideas, para el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ se presentó también buena correlación de este elemento con Al utilizando los datos de todos los períodos de muestreo (figura 50), además de observarse una buena correlación con Mg en el período de agosto de 2011 (figura 51); esto corrobora en general que en el sistema en estudio, podría existir la presencia de arcillas, micas o aluminosilicatos que contienen estos elementos, como la moscovita $(\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2)$, la montmorillonita $((\text{Al},\text{Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_4(\text{OH})_8 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$ o la vermiculita $((\text{Mg},\text{Ca})_{0,3}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_{3,0}(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$, estos posiblemente arrastrados por las aguas de escorrentía y afluentes conectados al sistema ^[7,47].

Además de lo antes explicado, en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia como se dijo anteriormente, se evidencian las mayores concentraciones en relación con los dos extractos anteriores; por otra parte se obtuvo una buena correlación con Al para todos los períodos muestreados, mientras que para el período de marzo de 2011 no se presentó una buena correlación con el Mg; esto puede ser notado claramente en las figura 52 y 53 respectivamente. La buena correlación con Al termina de confirmar la presencia de arcillas o aluminosilicatos como la moscovita $(\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2)$ o feldespatos de potasio $(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$.

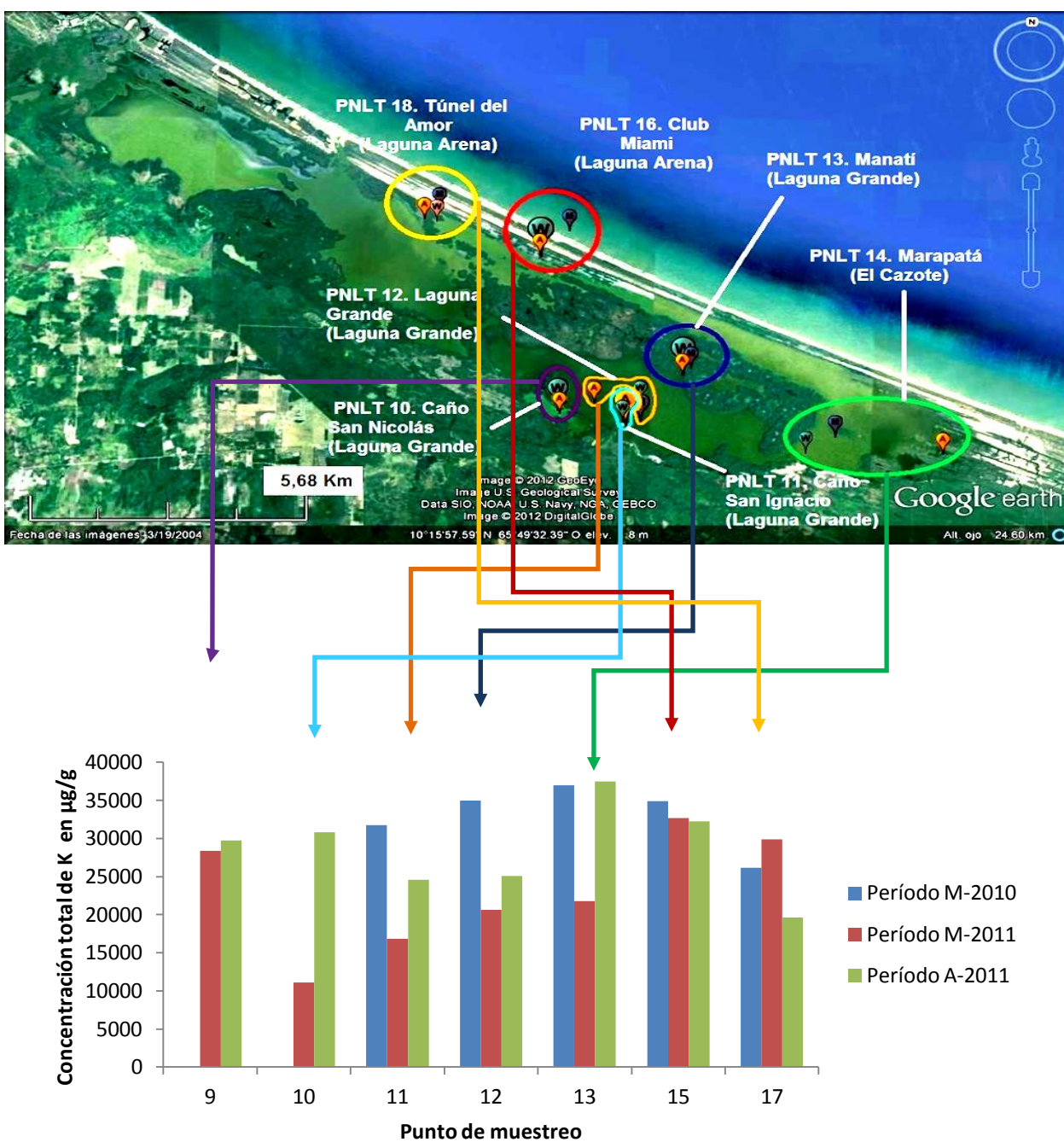


Figura 47. Distribución espacial y temporal total de K en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

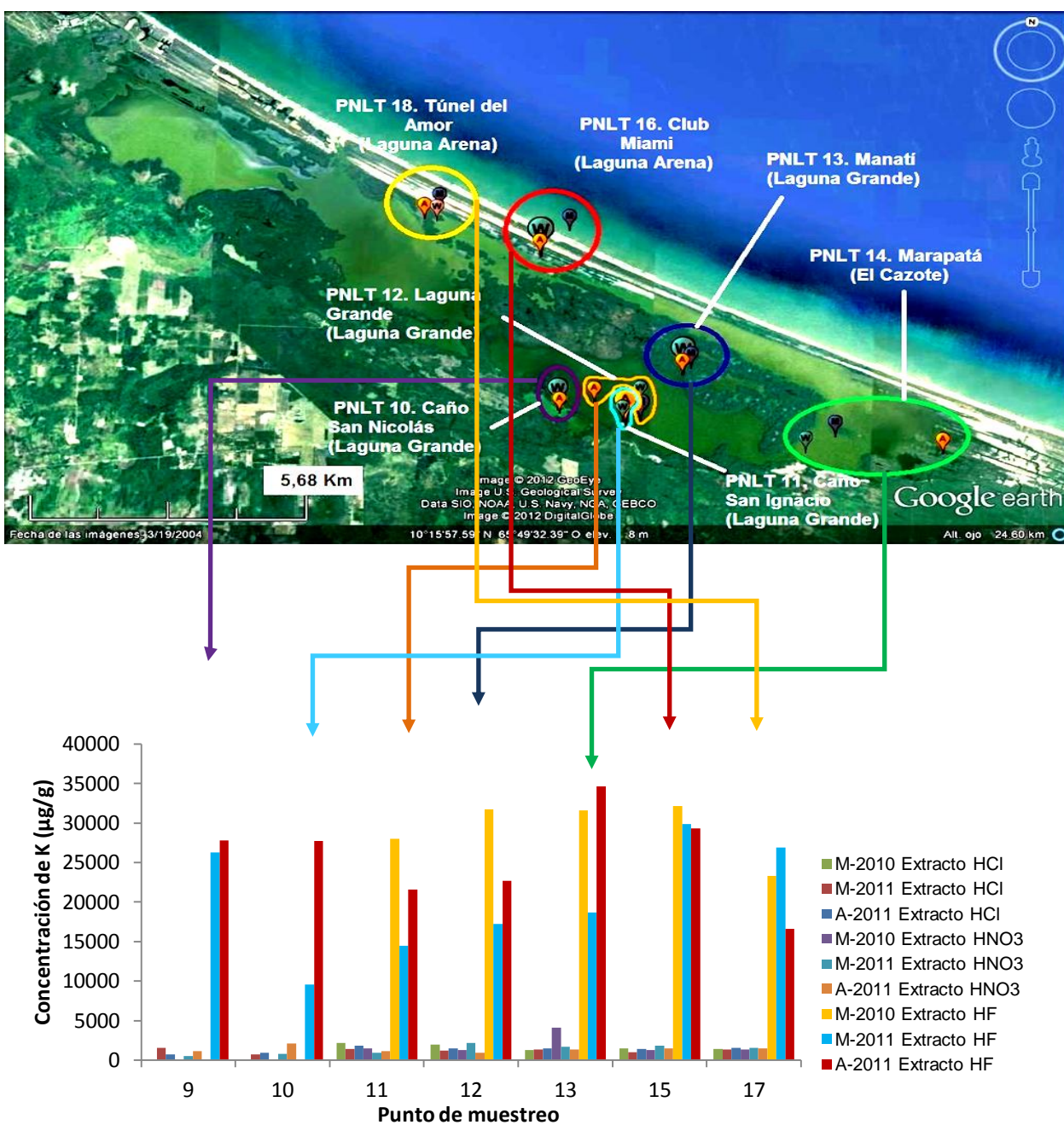


Figura 48. Distribución espacial de K en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

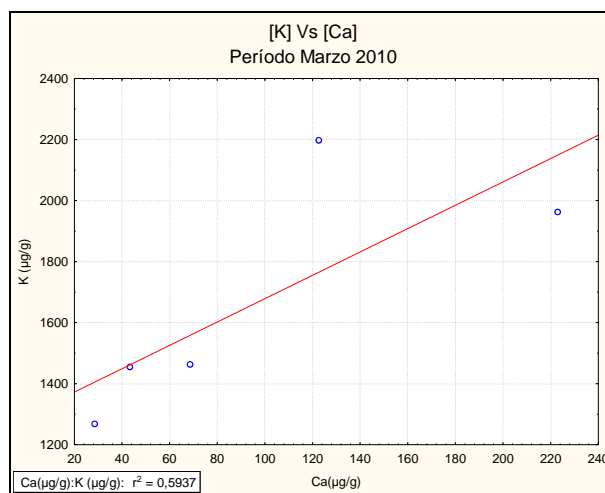
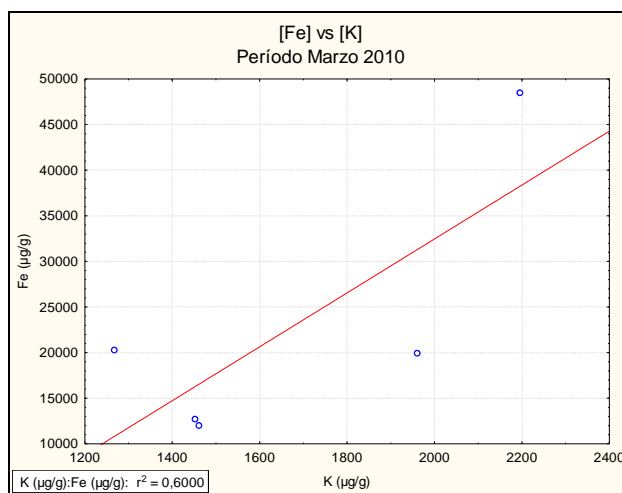


Figura 49. Correlaciones de K/Ca y Fe/K en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.

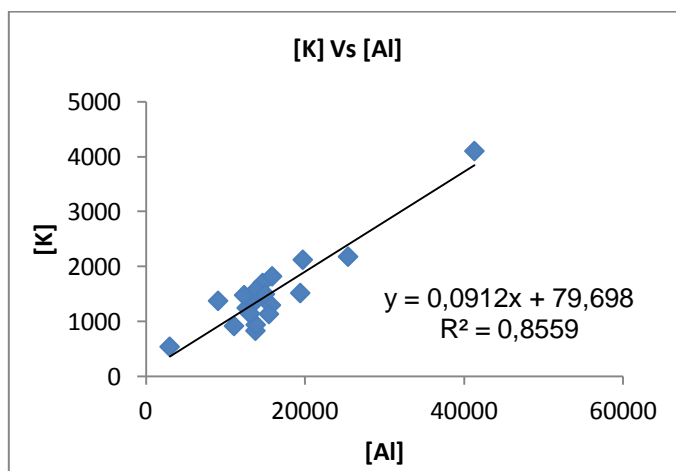


Figura 50. Correlación K/Al en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.

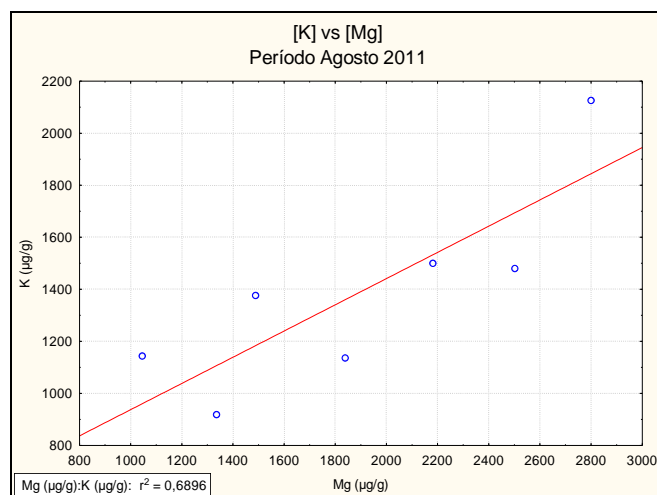


Figura 51. Correlación de K/Mg en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de agosto de 2011.

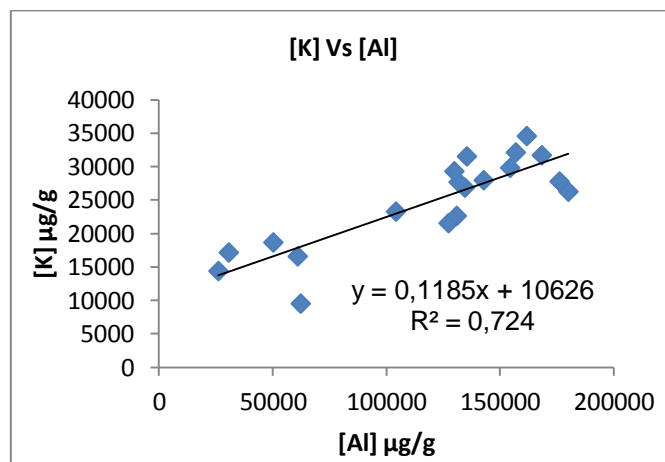


Figura 52. Correlación de K/Al en el extracto HF_(c) para todos los períodos de muestreo.

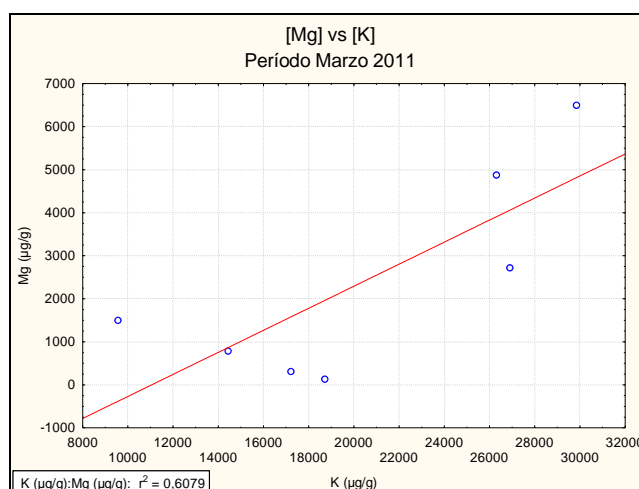


Figura 53. Correlación, K/Mg en el extracto de HF_(c) y agua regia para el período de marzo de 2011.

7.3.3.7. Sodio (Na)

En el caso del elemento mayoritario Na, el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo en la zona de estudio, indicó que los valores para el período de marzo de 2010 oscilaron entre 9388 y 19327 µg/g; por otro lado, para el período de marzo de 2011 estos valores están entre 13094 y 25399 µg/g siendo

más altos comparados con los del período anterior; aunado a ello, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 oscilaron entre 11294 y 27803 $\mu\text{g/g}$, siendo estos más elevados en comparación con los anteriores dos períodos de muestreo, estos valores se muestran en la figura 54, la cual contiene la distribución espacial y temporal de los puntos de muestreo.

Hay que destacar también que los mayores valores de concentración de este elemento se encuentran en algunos puntos de muestreo del período de marzo de 2010, especialmente en el punto 12 (PNLT 13), lo que corrobora los valores de salinidad y conductividad obtenidos en la columna de agua, es decir, que en dicho período el evento de sequía produjo una evaporación de las aguas de escorrentía de los afluentes conectados en la laguna, acumulando así gran cantidad de sales disueltas en comparación con los otros períodos de muestreo.

La alta concentración de Na en dicho punto de muestreo también puede ser atribuida a la presencia de manglares, los cuales son resistentes y retienen altas concentraciones de sales.

Es notable en dicha figura 53, que los valores más elevados de concentración de este elemento fueron los del período de agosto de 2011, siguiendo la misma tendencia o patrón que los otros elementos antes estudiados.

Nótese también en dicha figura que los valores de concentración de este elemento se mantienen relativamente constantes hacia la zona de Laguna Arena, esto podría ser atribuido a los aportes e influencia del agua de mar, ya que estos puntos de muestreo se encuentran muy cercanos a la zona litoral de la laguna.

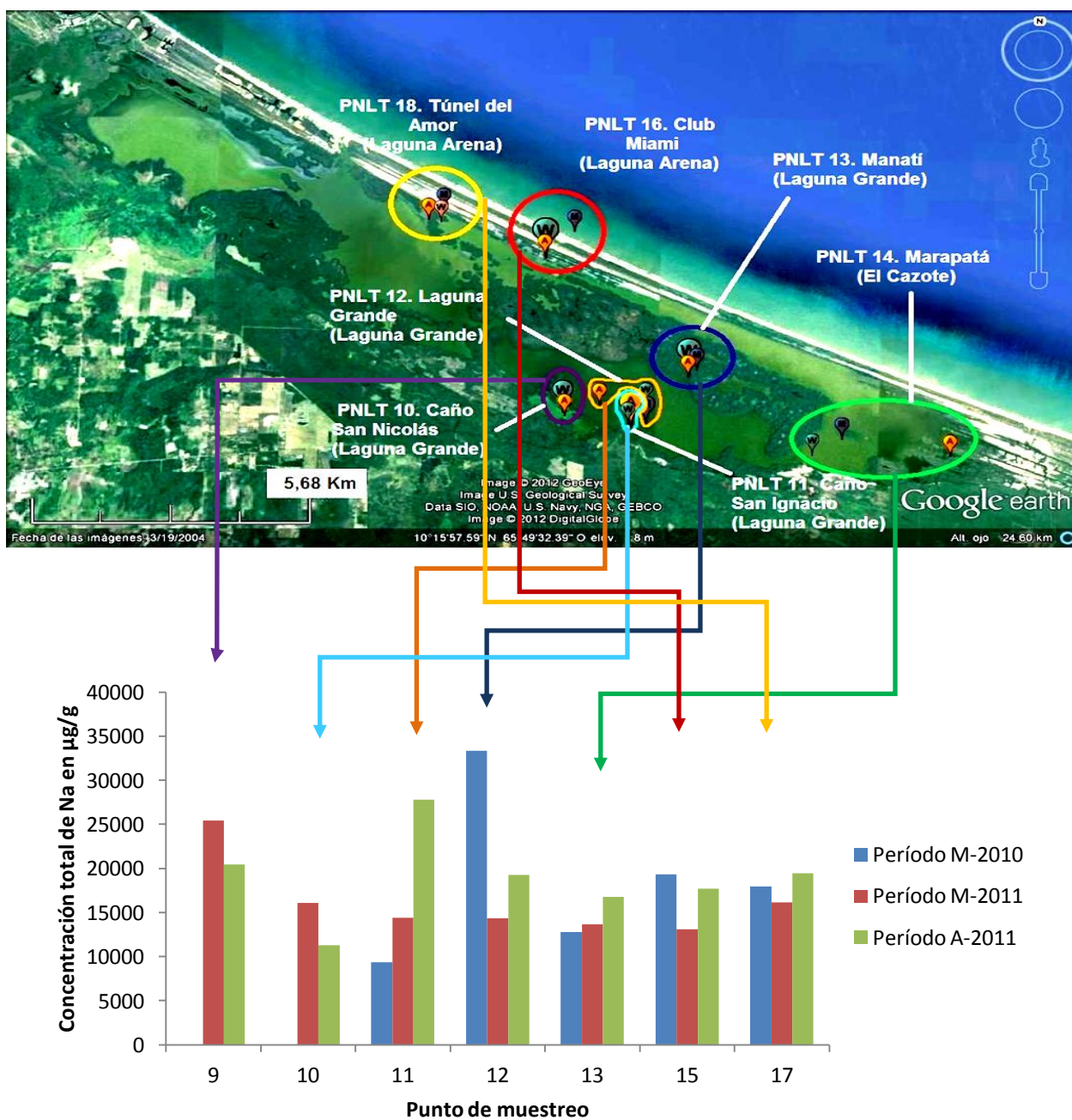


Figura 54. Distribución espacial y temporal total de Na en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

Por otro lado, las concentraciones de Na en el extracto de HCl 1M oscilaron entre 1489 y 19999 µg/g y los valores obtenidos en el extracto de HNO_{3(c)} se encontraron

entre 119 y 2177 $\mu\text{g/g}$, notoriamente mucho más bajos que los del extracto anterior y por último los valores obtenidos en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia estuvieron comprendidos entre 2536 y 14385 $\mu\text{g/g}$. Se puede apreciar en la figura 55 que existe una ligera tendencia en aumento de concentración de este elemento hacia la zona de Laguna Arena en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011, lo que podría indicar que la presencia de este elemento en esa zona podría ser debido a la influencia del agua de mar, que se encuentra cercano a los puntos 15 (PNLT 16) y 17 (PNLT 18) ubicados en dicha zona.

Caso contrario ocurre en el período de marzo de 2011, ya que se presenta una tendencia en descenso hacia la zona antes nombrada, lo cual podría indicar que el agua de mar no ejerce un aporte importante de este elemento en comparación al período de agosto de 2011, ya que la entrada de agua dulce proveniente de los ríos se hace más importante en este período. Para este elemento se obtuvieron relativamente buenas correlaciones con K y Fe, estas mostradas en las figuras 56 y 57 para el extracto de HCl 1M para los períodos de marzo y agosto de 2011 respectivamente, mientras que en la figura 58 se muestra que en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ se obtuvieron correlaciones de tipo K/Na y Mg/Na para el período de agosto de 2011. En el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia se obtuvo una buena correlación con el elemento Fe, esto observándose en la figura 59. Para el extracto de HCl 1M, se puede intuir que el Na al estar correlacionado con los elementos antes nombrados, se presenta la existencia de arcillas o aluminosilicatos en fase amorfa o puede encontrarse como elemento sorbido en la superficie de un mineral, ya que la influencia del mar pudo aportar cantidades considerables de este elemento. Ahora en el caso del extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$, las correlaciones obtenidas indican y corroboran la existencia de arcillas y aluminosilicatos en fase cristalina como los indicados anteriormente para el caso del Al, Fe y Mg. Por último, la correlación de Fe con el Na en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia confirma totalmente la presencia de minerales como la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{An}_0\text{-An}_{10})$) igualmente indicados en las otras secciones. Hay que destacar que el punto 12 (PNLT 13) presenta

el valor más elevado de este elemento en dicho extracto, lo que podría indicar que en ese punto hay una mayor depositación de sedimentos que contienen aluminosilicatos que contienen este elemento como los antes nombrados.

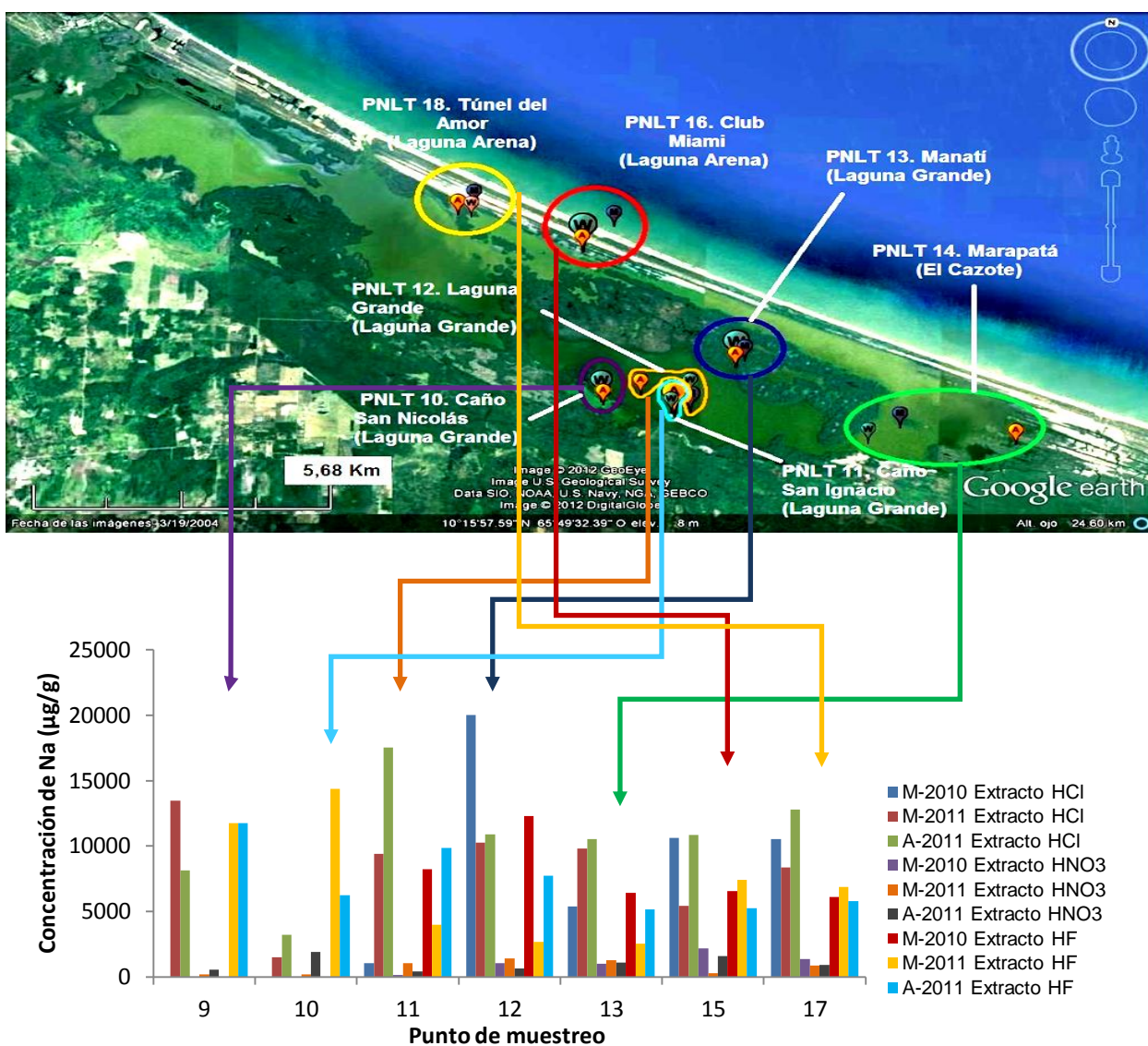


Figura 55. Distribución espacial de Na en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

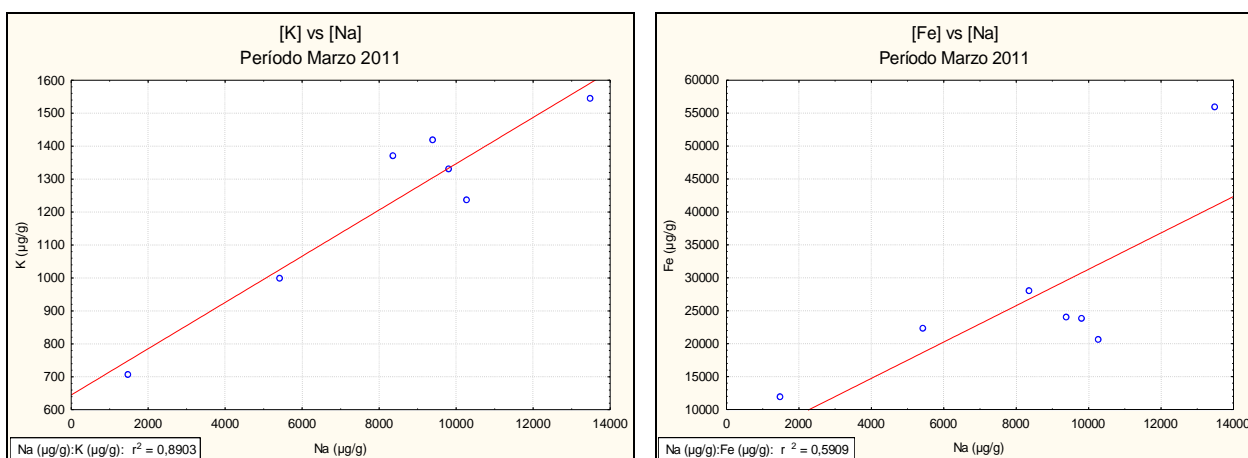


Figura 56. Correlación de K/Na y Fe/Na en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2011.

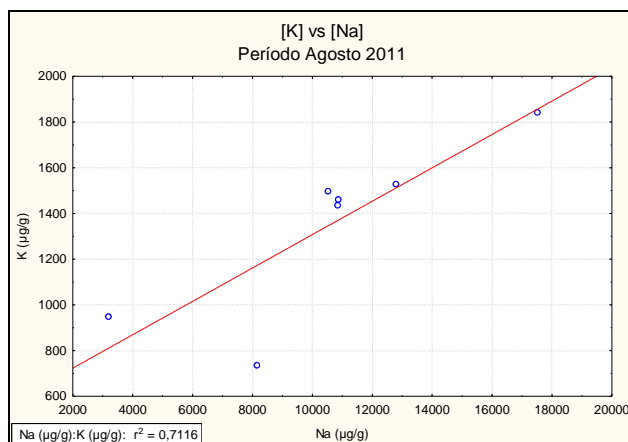


Figura 57. Correlación de K/Na en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011.

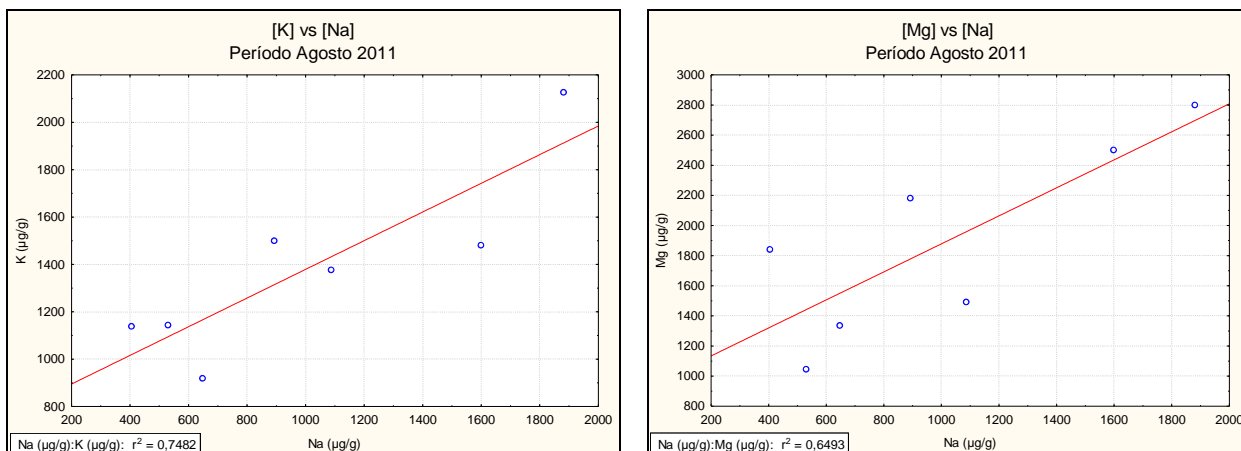


Figura 58. Correlaciones de K/Na y Mg/Na en el extracto de $\text{HNO}_3(\text{c})$ para el período de agosto de 2011.

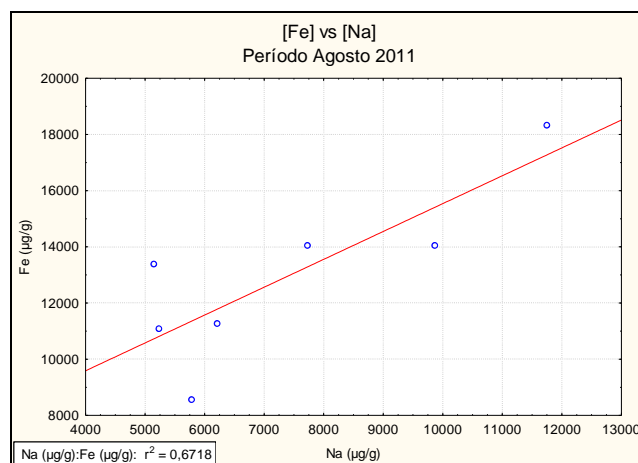


Figura 59. Correlación de Fe/Na en el extracto de $\text{HF}(\text{c})$ y agua regia para el período de agosto de 2011.

7.3.3.8. Cinc (Zn)

En el caso del Zn, las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo en la zona de estudio, reflejó valores para el período de marzo de 2010 entre 76 y 151 $\mu\text{g/g}$; además, para el período de marzo de 2011 estos valores varían entre 75 y 116 $\mu\text{g/g}$ siendo más bajos comparados con los del período anterior; por otro lado, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 oscilaban entre 91 y 114 $\mu\text{g/g}$, siendo estos más bajos en comparación con los anteriores dos períodos de muestreo; dichos resultados obtenidos pueden ser mostrados en la figura 60, la cual muestra dicha distribución espacial y temporal de los puntos de muestreo.

Se puede notar en la figura antes mencionada que los valores de concentración de este elemento son relativamente homogéneos en toda la zona de estudio. Es notorio al igual que lo anterior en la figura 60 que en el período de marzo de 2010 se encuentran las mayores concentraciones de este elemento, especialmente hacia El Cazote y Laguna Arena, esta última cercana a la boca de la Laguna de Tacarigua en donde la actividad antrópica es importante, es decir, que estas concentraciones pueden ser atribuidas por la influencia y aportes de dicha actividad humana.

Asimismo, el punto 13 (PNLT 14) refleja los valores de concentración más elevados de este elemento, esto al igual que el Ca, el Mn y el K, lo que parece indicar que todos ellos provienen de una misma fuente, es por ello que, no hay que descartar la idea de que este elemento se encuentre asociado a una fase mineral.

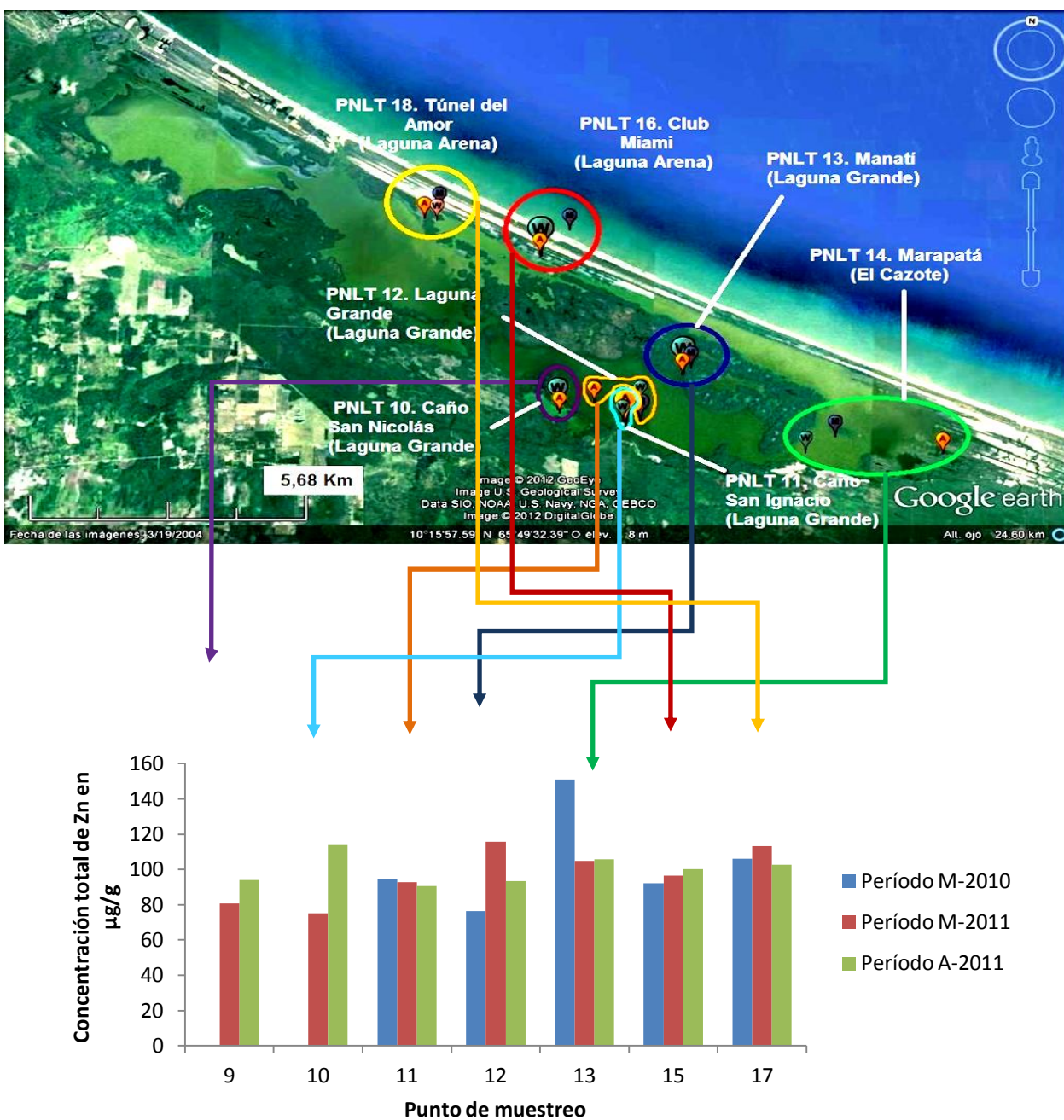


Figura 60. Distribución espacial y temporal total de Zn en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

Las concentraciones para este elemento en el extracto de HCl 1M oscilaron entre 44 y 82 $\mu\text{g/g}$, mientras que en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ estas mostraron una disminución significativa, ya que oscilaron desde 11 hasta 72 $\mu\text{g/g}$. Aunado a ello no se obtuvieron valores de concentración de Zn en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia, ya que estos se encontraban por debajo del límite de detección reportado (apéndice 7), e indica que la presencia de este elemento se encuentra asociada a las fases minerales que pueden ser destruidas por el HCl 1M y el $\text{HNO}_{3(c)}$, como arcillas, carbonatos, oxihidróxidos amorfos y cristalinos, materia orgánica o puede encontrarse como elemento sorbido.

Sin embargo, tampoco se puede descartar como se dijo anteriormente la presencia de este debido a los factores antrópicos. Esto será corroborado más adelante con parámetros ambientales como: los factores de enriquecimiento (FE) e índice de geoacumulación (IGEO) y la comparación de valores de estudio con valores base en sedimentos; dichos indicadores ambientales permitirán determinar el grado de contaminación en la zona en dado caso de que exista.

Asimismo, en la figura 61 se muestran las concentraciones de Zn en los diferentes puntos de muestreo y períodos para cada extracto, evidenciando que dicha concentraciones en el punto 17 (PNLT 18) o Túnel de Amor localizado en Laguna Arena son elevadas en comparación con las de los otros puntos, esto puede estar siendo producto de los aportes antrópicos cercanos a la costa y a la boca de la laguna, como por ejemplo la afluencia de sustancias químicas provenientes de las explotaciones agrícolas adyacentes a la zona y a la degradación y contaminación por desechos sólidos, orgánicos e inorgánicos, provenientes de centros urbanos y empresas pecuarias ya que en esa parte de la zona dicha actividad antrópica es importante ^[9, 38, 55]. Asimismo, hay que resaltar que al igual que el Ca, el Mn y el K, se presentan altas concentraciones de este elemento en el extracto de HCl 1M comparadas con los otros los extractos, lo que parece indicar también que provienen de una misma fuente, tal vez de tipo antrópica.

Por otro lado, en la figura 61 puede apreciarse que el Zn tiene una baja correlación con Ca para el período de marzo de 2010 en el extracto de HCl 1M. La presencia de Zn en dicho extracto puede indicar que no se encuentra asociada a carbonatos como smithsonita (ZnCO_3), pero si a procesos de absorción con la superficie de un oxihidróxido amorfo, posiblemente de Fe ya que la concentración de Mn es muy baja como para asociarlo a un oxihidróxido amorfo de Mn ^[21,47], sin embargo no hay que descartar la presencia de este elemento debido a los factores antrópicos como el uso de fertilizantes, pesticidas, plásticos, entre otros, cerca de la zona de estudio.

Además de esto, se presentó buena correlación de este elemento con Al, sin embargo, la correlación con Mn no fue buena, en los diferentes períodos para el mismo extracto de HCl 1M mostradas en las figuras 63 y 64. La buena correlación con Al indica que el Zn se encuentra asociado a algún oxihidróxido de Al amorfo al encontrarse levemente sorbido en su superficie ^[7,21].

Por otro lado, las concentraciones de este elemento en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ a pesar de ser bajas comparadas con las del extracto anterior, pueden ser asociadas a oxihidróxidos cristalinos de Mn y Fe, arcillas o a aluminosilicatos tipo montmorillonita $((\text{Al},\text{Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_4(\text{OH})_8 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$ o vermiculita $((\text{Mg},\text{Ca})_{0,3}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_{3,0}(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ que pudieron atraparlo mientras cristalizaban, esto debido a que se presentaron buenas correlaciones con Al y Mg para todos los períodos de muestreo, mientras que la correlación Mn fue obtenida en el período de marzo de 2010; dichas correlaciones son mostradas en las figuras 65, 66 y 67.

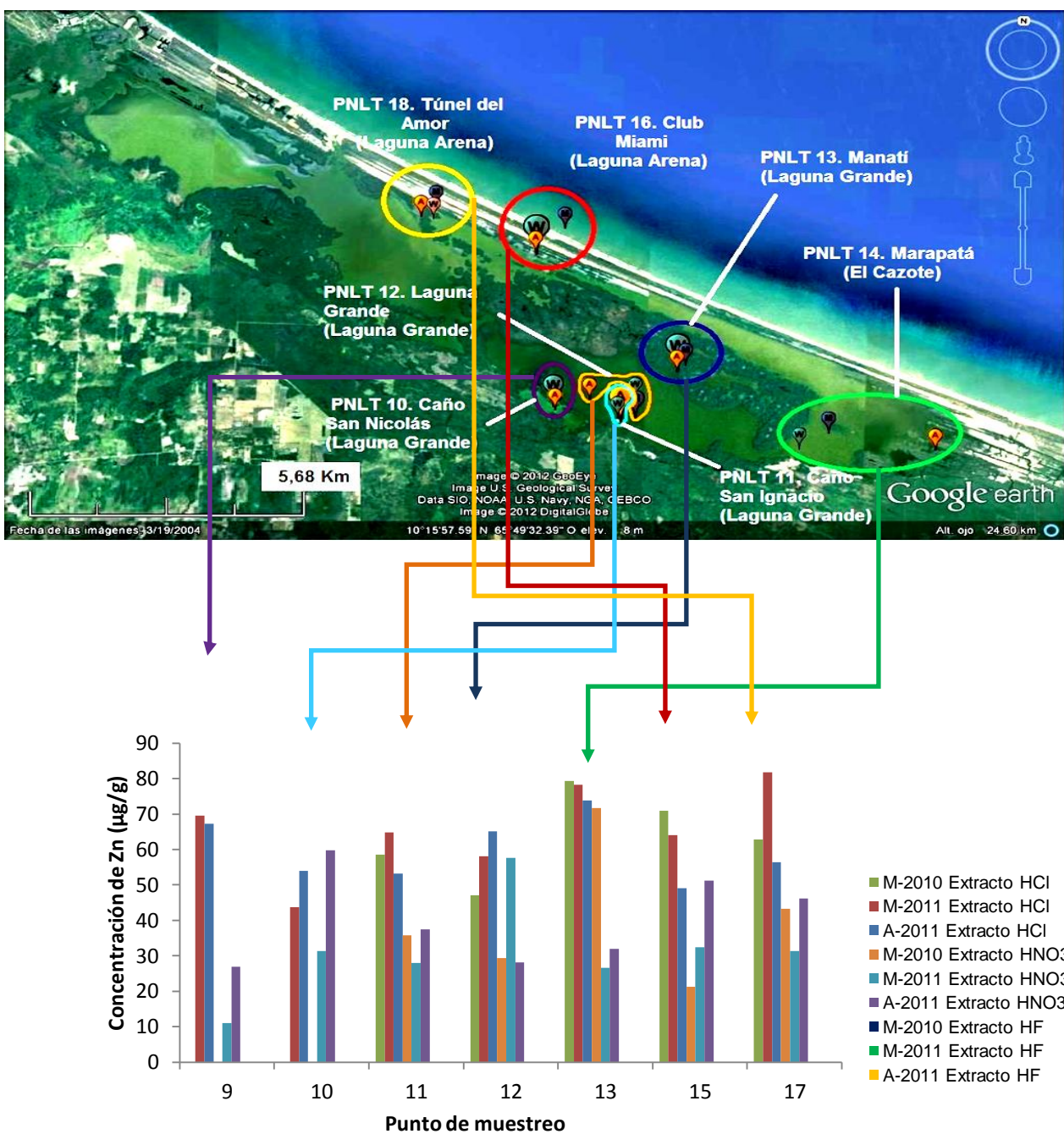


Figura 61. Distribución espacial de Zn en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

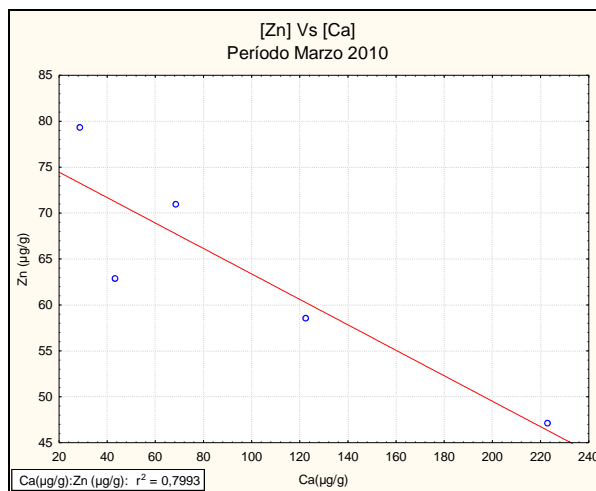


Figura 62. Correlación de Zn/Ca en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.

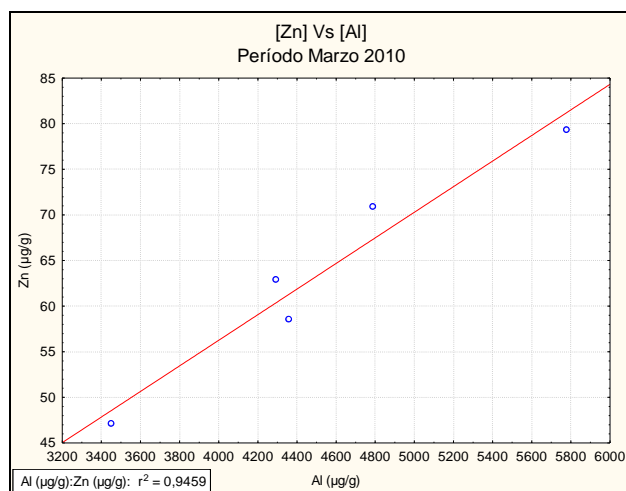


Figura 63. Correlación de Zn/Al en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.

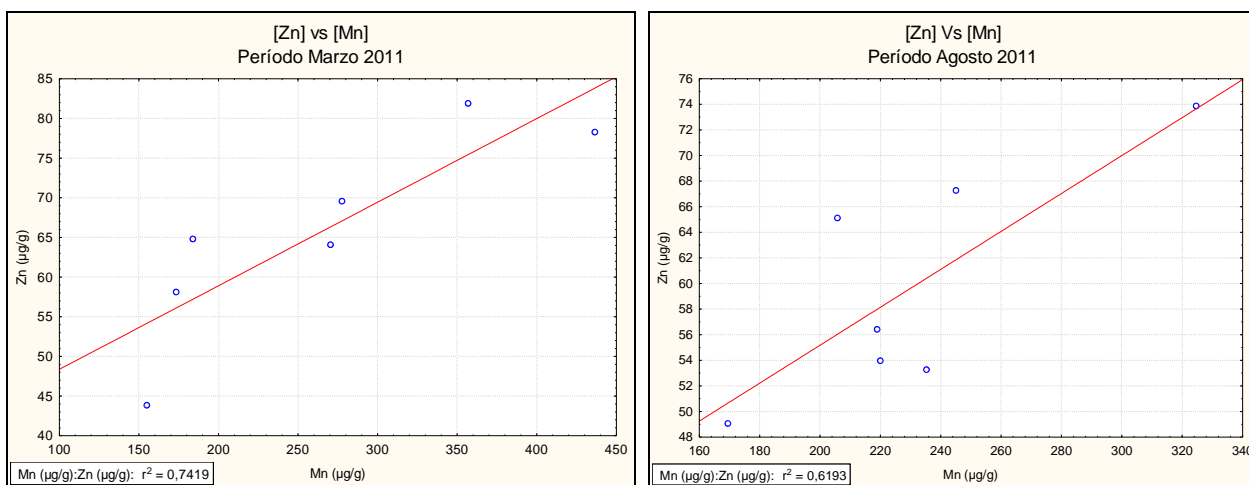


Figura 64. Correlación Zn/Mn en el extracto de HCl 1M para los períodos de marzo y agosto de 2011.

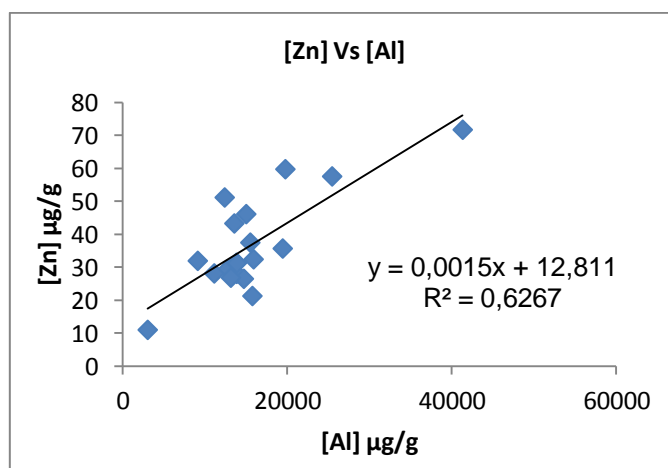


Figura 65. Correlación Zn/Al en el extracto de $\text{HNO}_3(\text{c})$ para todos los períodos de muestreo.

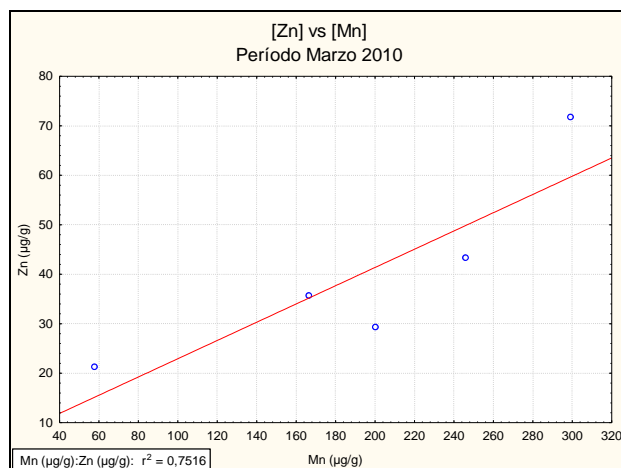


Figura 66. Correlación de Zn/Mn en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de marzo de 2010.

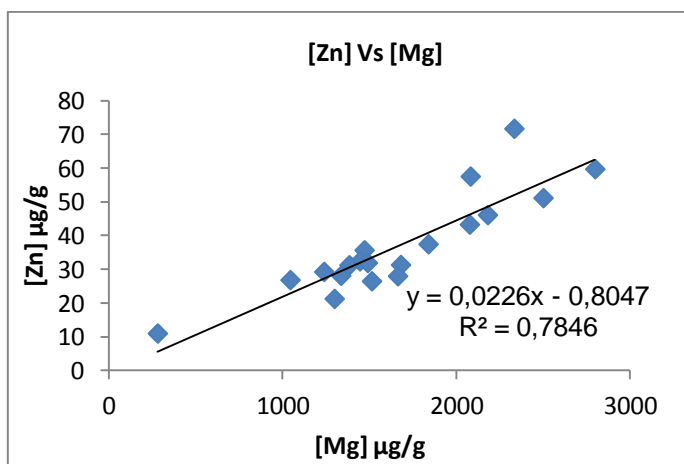


Figura 67. Correlación de Zn/Mg en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para los todos los períodos de muestreo.

7.3.3.9. Níquel (Ni)

El análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo para el elemento Ni, reveló que los valores oscilaron entre 121 y 150 $\mu\text{g/g}$ para el período de marzo de 2010; aunado a ello, en el período de marzo de 2011 se encontraron valores entre 58 y 152 $\mu\text{g/g}$; por su parte, los valores encontrados en el período de agosto 2011 oscilaban entre 68 y 174 $\mu\text{g/g}$ (figura 68). Los valores obtenidos en los tres períodos de muestreo sobrepasan el valor base de este elemento para sedimentos no contaminados por factores antrópicos (68 $\mu\text{g/g}$ ^[56]), lo que podría indicar que la actividad humana puede jugar un papel importante en cuanto al aporte de este elemento, ya que dicha actividad puede alcanzar a los sedimentos y materia orgánica en la zona de estudio al igual que el Zn ^[38].

Al igual que en el caso del Zn, las concentraciones de Ni fueron homogéneas en todas la zona de estudio, y al parecer este último elemento pudo haber sido trasladado a la laguna debido al arrastre de una cantidad considerable de materia orgánica, la cual puede atrapar a dicho elemento por procesos fisicoquímicos naturales de quelatación, además del aporte de carga sedimentaria que contiene minerales de tipo arcilla o aluminosilicatos como los antes nombrados, que pudieron haber atrapado a este elemento en su red cristalina mientras cristalizaban ^[7,21,36].

En dicha figura se puede notar también que los mayores valores de concentración se encuentran hacia la zona de Laguna Grande (suroeste de la laguna), lo que podría implicar que en esa parte de la zona hay aportes significativos de materia orgánica y sedimentos por parte de los afluentes como el Caño San Nicolás y el Caño San Ignacio conectados a dicha laguna, por lo que hay mayor cantidad de este elemento en forma quelatada e incorporada a la estructura de una fase mineral arcillosa o silicatada mientras cristalizaban, como las antes nombradas. Asimismo, la presencia de rocas máficas provenientes de la litología cercana a la zona puede aportar considerables cantidades de este elemento ^[53].

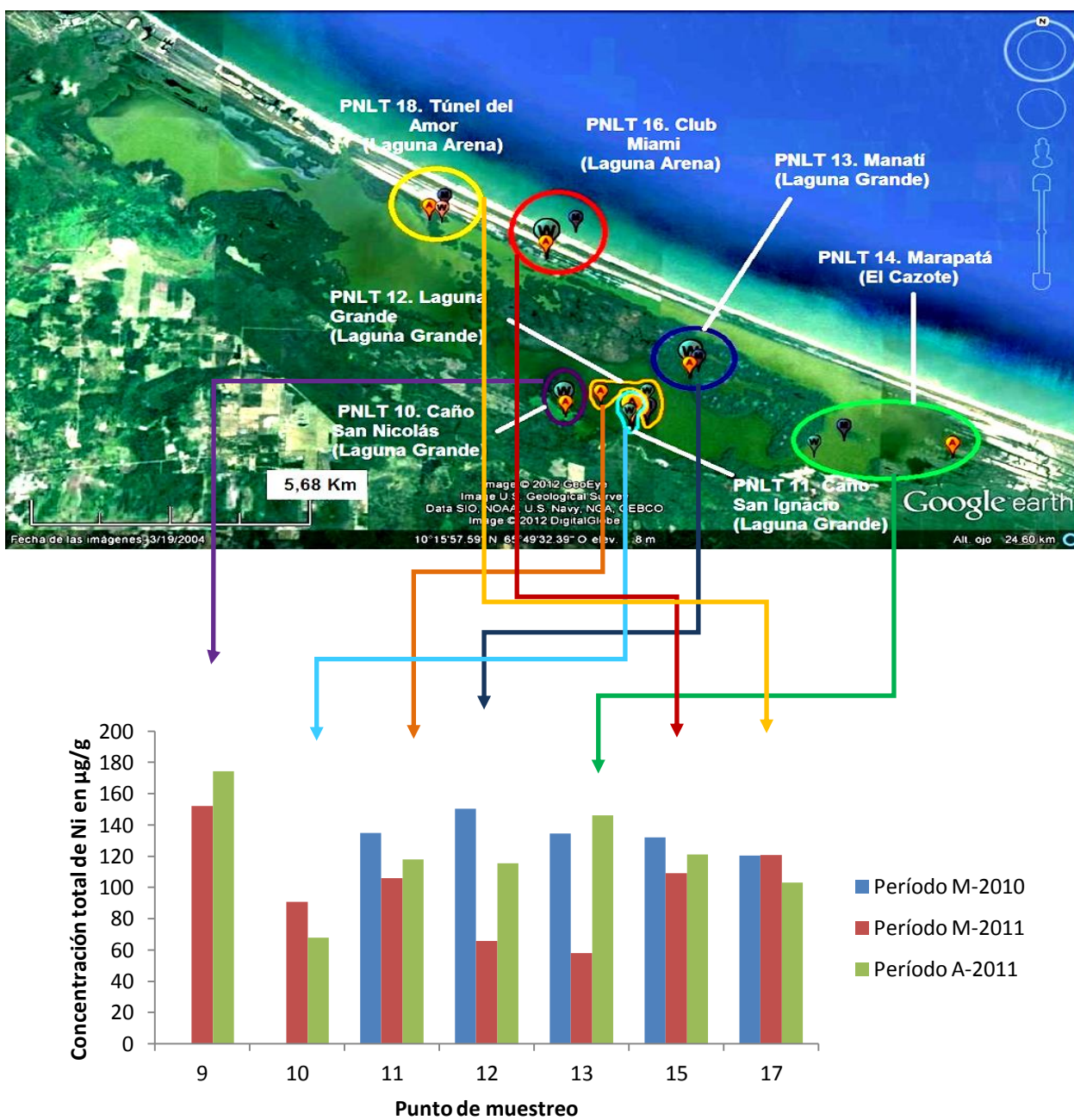


Figura 68. Distribución espacial y temporal total de Ni en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

Las concentraciones de Ni en el extracto de HCl 1M oscilaron entre 19 y 33 $\mu\text{g/g}$, además en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ se encontraron valores de este elemento desde 17 hasta 44 $\mu\text{g/g}$ y en el extracto de HF(c) y agua regia se encontraron las concentraciones más elevadas de este elemento, comprendidas entre 44 y 117 $\mu\text{g/g}$. Esto puede ser mejor visualizado en la figura 69, donde se presenta al igual que en los otros elementos, la distribución espacial por extracto de este elemento contenido en los sedimentos de fondo de la zona de estudio.

Por otra parte se observan en la figura 70 que no hubo buenas correlaciones de este elemento en el extracto de HCl 1M con Al y K en el período de marzo de 2011 mientras en la figura 71 que en el período de agosto de 2011 se observa una buena correlación con el elemento Co.

Aunado a ello, las buenas correlaciones de este elemento con Al y K puede indicar la presencia de alguna arcilla, aluminosilicato u oxihidróxido amorfo ya que este elemento Ni puede ser incorporado a la estructura de una fase por coprecipitación ^[7,21].

Por otra parte, puede apreciarse en la figura 72 que existe una buena correlación con el elemento Fe tomando los datos de todos los períodos muestreados, lo que termina de confirmar que el Ni se encuentra asociado a algún oxihidróxido o aluminosilicato amorfo, esto indicado también por De Freitas (2008) ^[7].

Asimismo, se encontraron buenas correlaciones en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ con Al, K y Mn, mostradas en las figuras 73 y 75, lo que podría implicar que este elemento se encuentra asociado a fases minerales tipo arcillas y oxihidróxidos de Mn cristalinos, los cuales pudieron atrapar a dicho elemento en su red cristalina mientras cristalizaban. Sin embargo, en la figura 74 se muestra una deficiente correlación con Al.

Además de las anteriores correlaciones, en la figura 75 se muestra que se obtuvo una buena correlación con Zn para todos los períodos de muestreo, esto y la

correlación Zn/Mg mostrada en la figura 66 indican la asociación de estos elementos a arcillas ricas en Mg, debido a procesos de sustitución isomórfica de Ni por Mg en la estructura de las arcillas ^[7,36].

Por último y no menos importante, puede observarse en las figuras 76 y 77 que existen para el extracto de HF _(c) y agua regia buenas correlaciones con los elementos Al y Fe, lo que confirma que este elemento se encuentra asociado a fases tipos arcilla o aluminosilicatos como los indicados en las anteriores secciones, los cuales pudieron haber incorporado a dicho elemento mientras sus estructuras cristalizaban ^[7,36].

Asimismo, puede observarse además en la figura 69 que existe un descenso en las concentraciones de este elemento hacia la zona de Laguna Arena. Caso contrario ocurre hacia la zona de Laguna Grande, especialmente en el punto 9 (PNLT 10), ya que allí se encuentran los mayores valores de concentración de este elemento, al igual que el Fe y el Mg, lo que podría indicar que estos provienen de una misma fuente y que en ese punto hay un gran aporte de carga sedimentaria que contiene minerales como los antes descritos.

Además el Ni puede estar asociado a resistatos tipo ilmenita (FeTiO_3) y a la litología cercana a la zona, ya que como se dijo anteriormente en la misma hay presencia de rocas máficas y minerales de tipo serpentinita como la garnierita $(\text{Ni,Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ^[47,53].

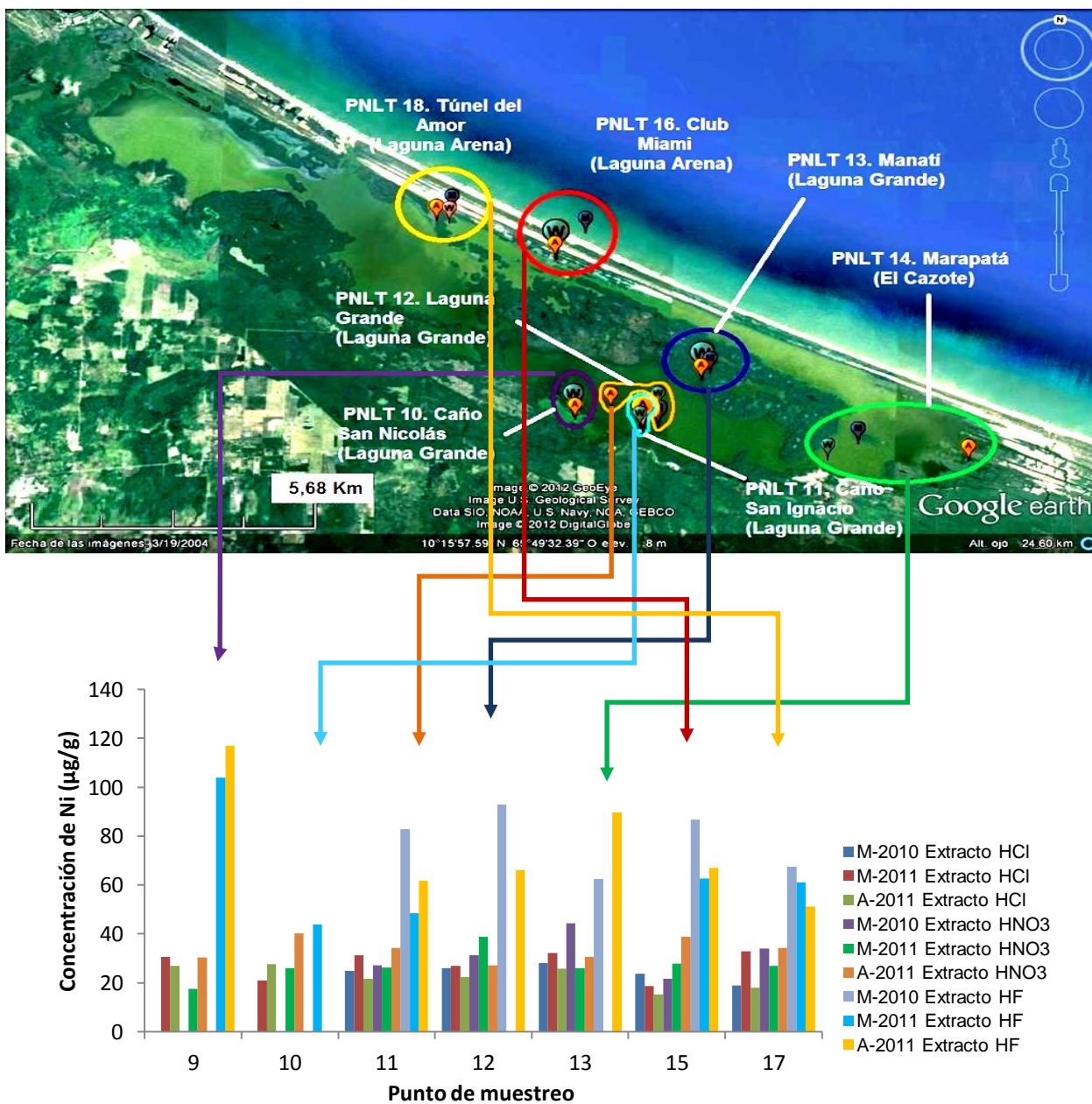


Figura 69. Distribución espacial de Ni en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

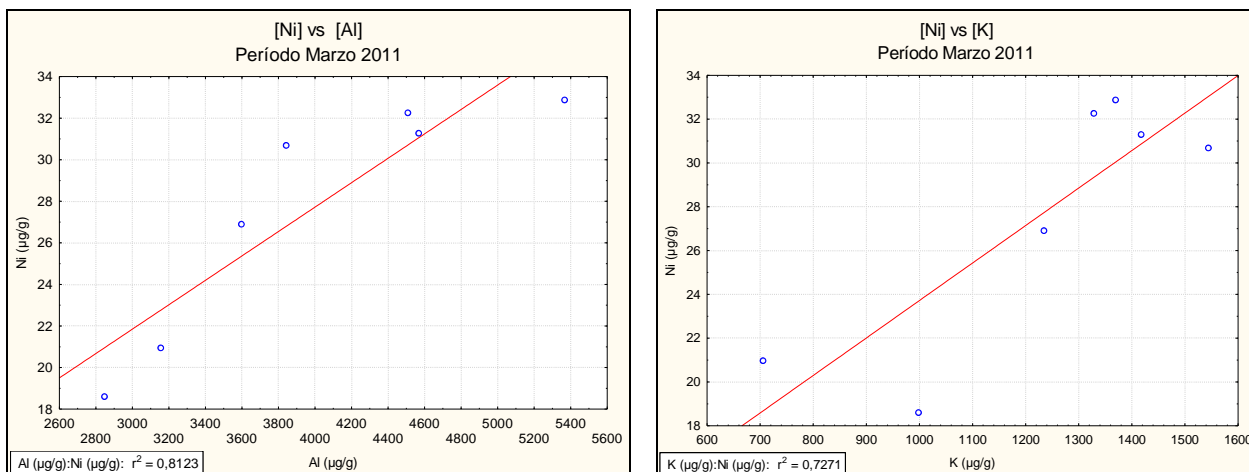


Figura 70. Correlaciones de Ni/K y Ni/Al en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2011.

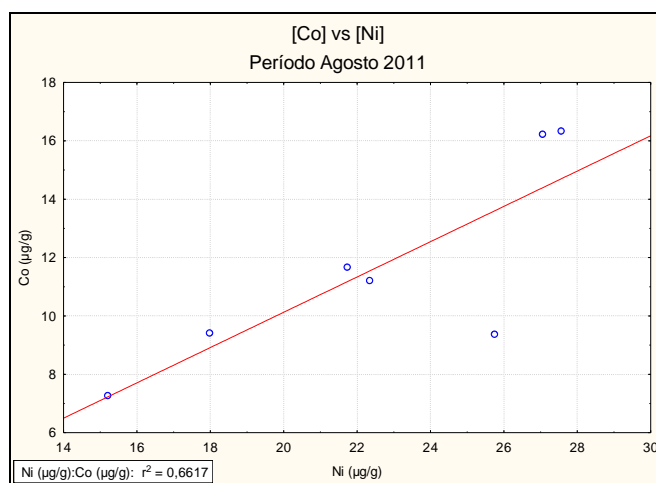


Figura 71. Correlación de Co/Ni en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011.

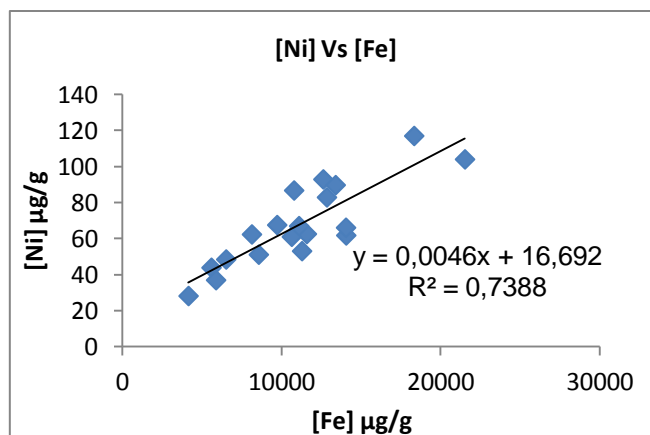


Figura 72. Correlación de Ni/Fe en el extracto de HCl 1M para todos los períodos muestreados.

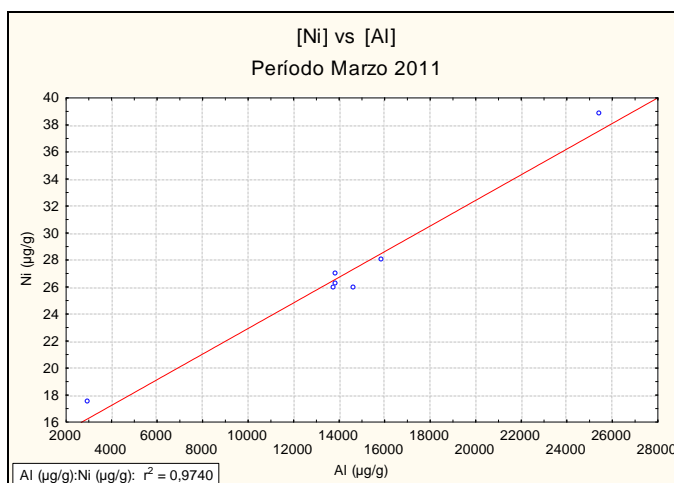


Figura 73. Correlación de Ni/Al en el extracto $\text{HNO}_3(c)$ para el período de marzo de 2011.

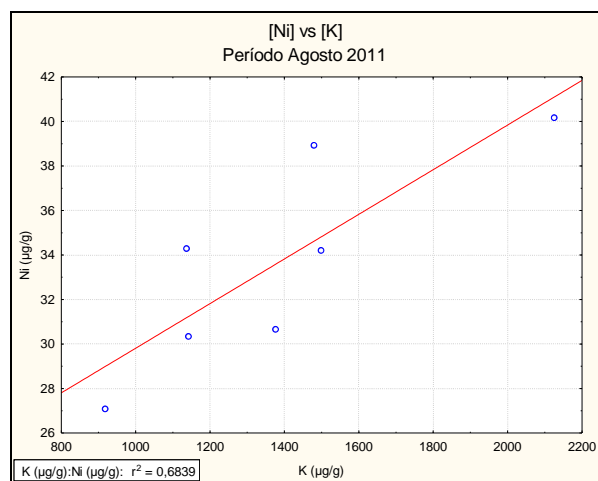
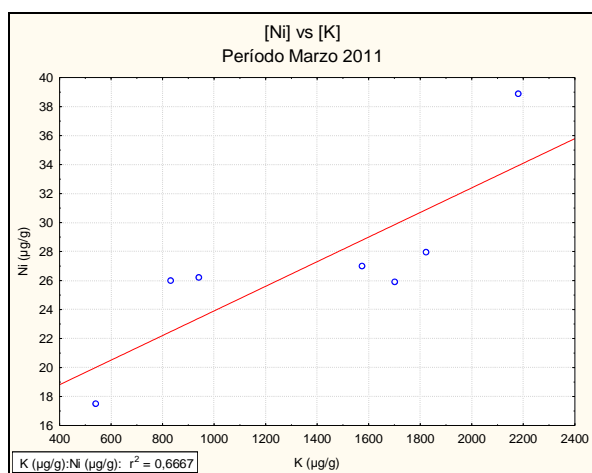
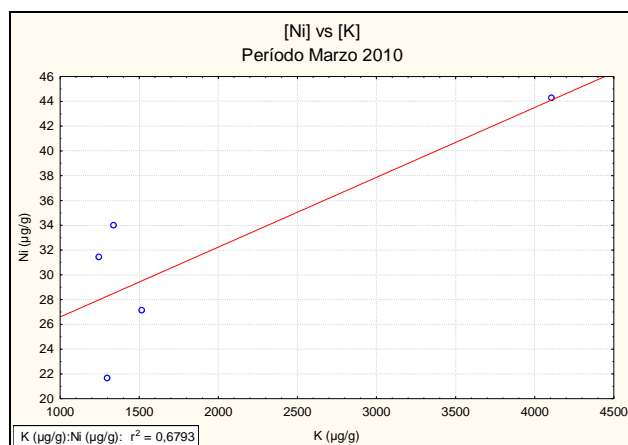


Figura 74. Correlaciones de Ni/K en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.

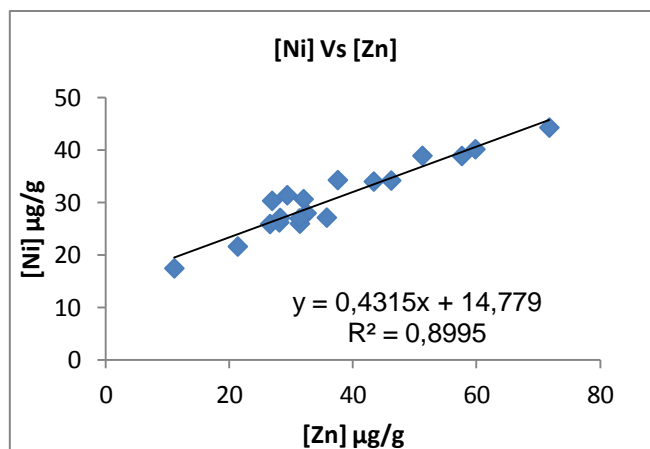


Figura 75. Correlación de Zn/Ni en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.

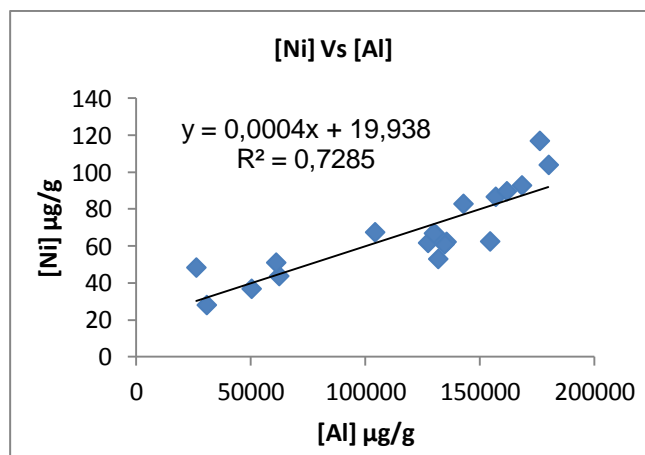


Figura 76. Correlación de Ni/Al en el extracto $\text{HF}_{(c)}$ para todos los períodos muestreados.

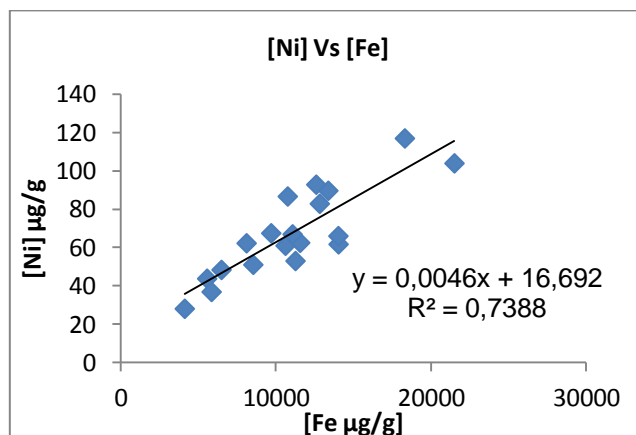


Figura 77. Correlaciones de Ni/Fe en el extracto de HF_(c) para todos los períodos muestreados

7.3.3.10. Cobalto (Co)

Para el elemento Co, las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo, indica que los valores circularon entre 13 y 21 µg/g para el período de marzo de 2010; además, en el período de marzo de 2011 se encontraron valores entre 15 y 27 µg/g; por su parte, los valores encontrados en el período de agosto 2011 se encontraban entre 18 y 32 µg/g, esto puede ser observa con más a detalle en la figura 77, la cual muestra que este elemento presenta un aumento en sus concentraciones hacia la zona de Laguna Grande, caso contrario ocurre hacia la zona de Laguna Arena, ya que esta presenta los menores valores de concentración de este elemento, aunque también podría decirse que se presenta una homogeneidad en las concentraciones de este elemento en la zona de estudio. Estos valores en general, son un poco más elevados en comparación al valor base en sedimentos (19 µg/g ^[56]) no afectados por factores antrópicos, lo que podría indicar una pequeña contaminación por parte de este elemento debido a actividad humana.

Se puede decir también que hacia la zona de Laguna Grande hay un mayor aporte litológico en los sedimentos que contienen arcillas o aluminosilicatos como los

antes indicados, producto del aumento de las aguas de los afluentes cercanos a dicha parte de la zona de estudio, además del transporte de materia orgánica, la cual puede atrapar a dicho elemento al igual que al Ni por procesos fisicoquímicos de quelatación.

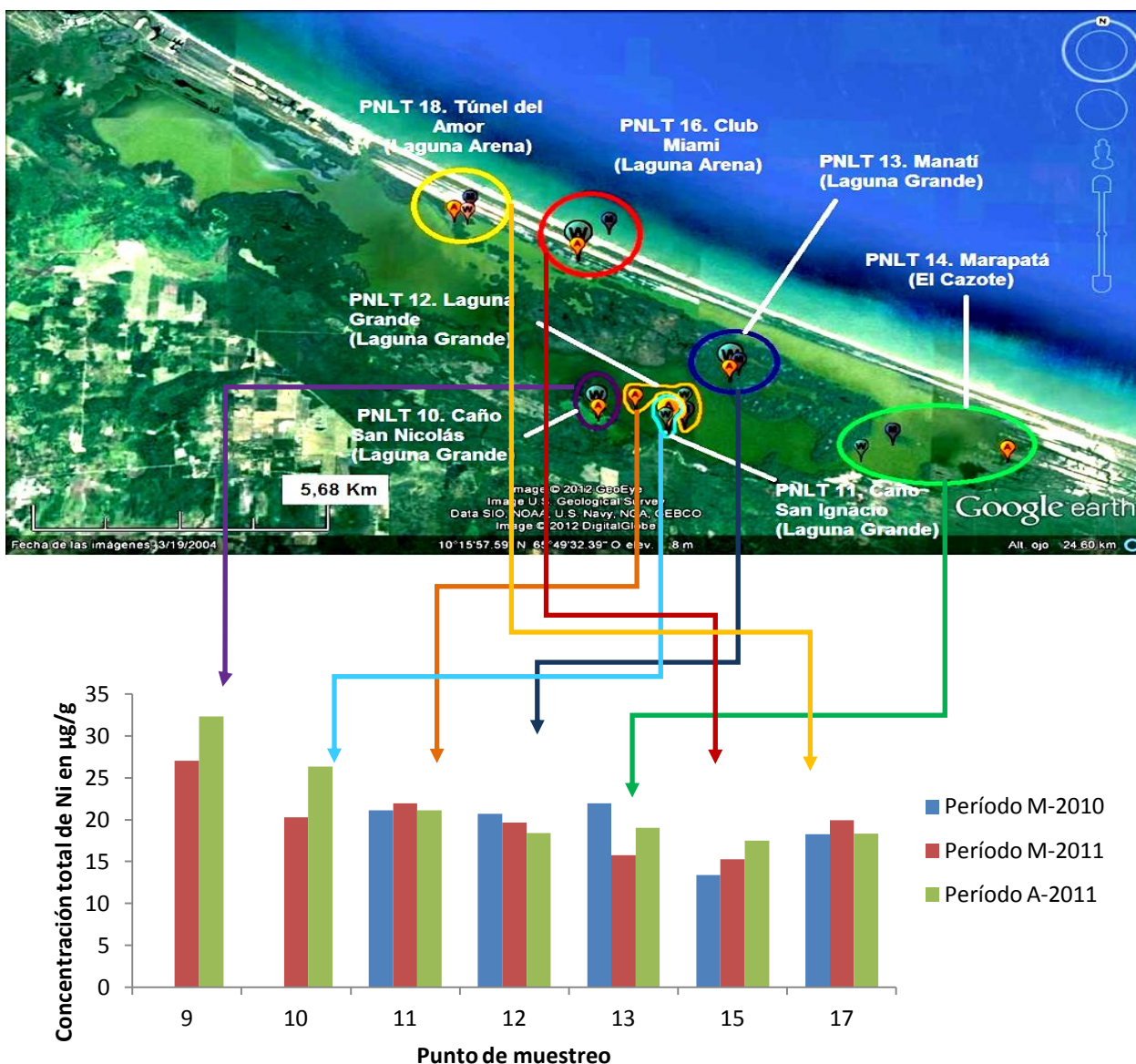


Figura 78. Distribución espacial y temporal total de Co en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

Las concentraciones de este elemento fueron muy bajas en los extractos obtenidos. Para el caso del extracto de HCl 1M se obtuvieron concentraciones entre 7 y 17 $\mu\text{g/g}$, mientras que en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ estas concentraciones estuvieron comprendidas entre 6 y 16 $\mu\text{g/g}$ (figura 79). No se obtuvieron valores de concentración de este elemento en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia, indicativo de que este fue extraído en las fases anteriores.

Puede observarse también en la figura 78 un descenso en los valores de concentración de este elemento hacia la zona de Laguna Arena para el extracto de HCl 1M, mientras que los valores más elevados se encuentran hacia la zona de Laguna Grande al igual que el Ni, el Fe y el Mg lo que parece indicar y confirmar que estos junto con el Co provienen de una misma fuente. Una buena correlación obtenida en el extracto de HCl 1M, es la correlación Co/Ni mostrada en la figura 80, la cual se obtuvo en el período de agosto de 2011. En este caso, estas correlación parecen indicar que este elemento y el Ni se encuentran asociados a una misma fase mineral y/o a una misma fuente de origen, posiblemente a oxihidróxidos amorfos y arcillas amorfas como elemento sorbido en su superficie ^[7,36].

Por su parte, en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ se obtuvieron buenas correlaciones de tipo Ni/Co, Zn/Co para el período de marzo de 2010 mostradas en la figura 81, lo que parece indicar que al igual que en el caso anterior en el extracto de HCl 1M, estos elementos se encuentran asociados a una misma fase mineral, posiblemente sean oxihidróxidos de Fe. De Freitas (2008), Moreno (2009) obtuvieron correlaciones similares para dichos elementos, pero establecieron su asociación a minerales arcillosos ^[7,36].

Además de las anteriores correlaciones mostradas, se presenta en las figura 82 buenas correlaciones de este elemento con Fe para todos los períodos de muestreo, mientras que para el período de marzo de 2010 se obtuvieron buenas correlaciones con Mn y Mg (figura 83), lo que corrobora que el Co se encuentra asociado a arcillas u

oxihidróxidos cristalinos de Fe y Mn principalmente, especialmente de Fe porque el Mn se encuentra en bajas concentraciones; estos resultados fueron similares a los reportados por De Freitas (2008) en los sedimentos de fondo del Golfete de Cuare [7,20].

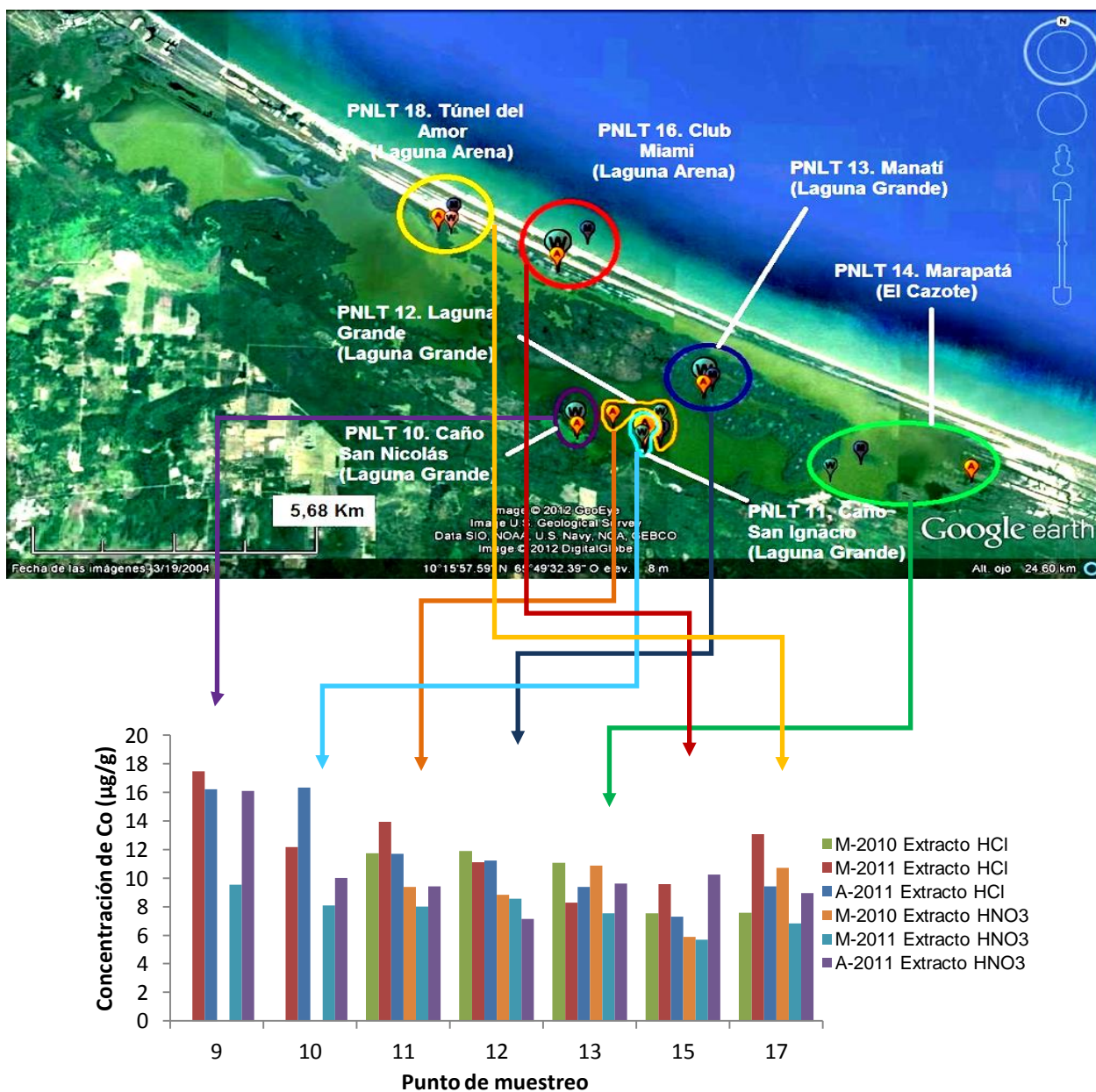


Figura 79. Distribución espacial de Co en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

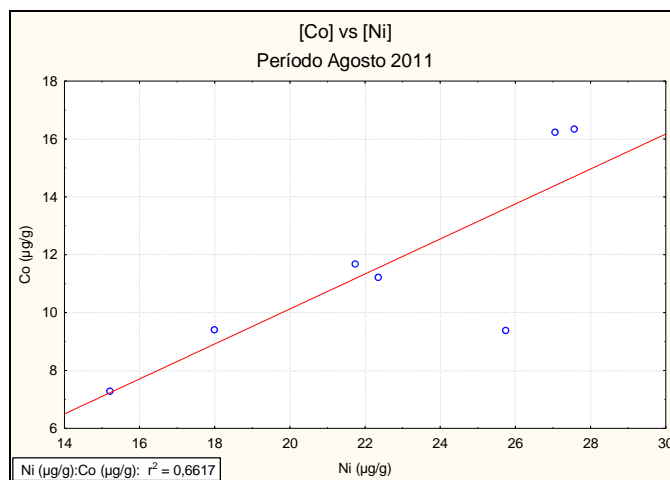


Figura 80. Correlación de Co/Ni en el extracto de HCl 1M para el período de agosto de 2011.

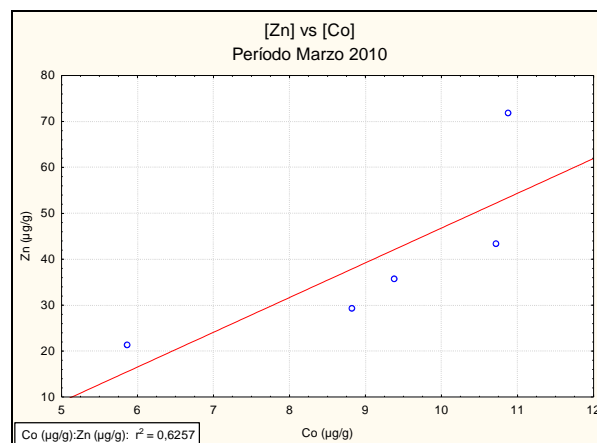
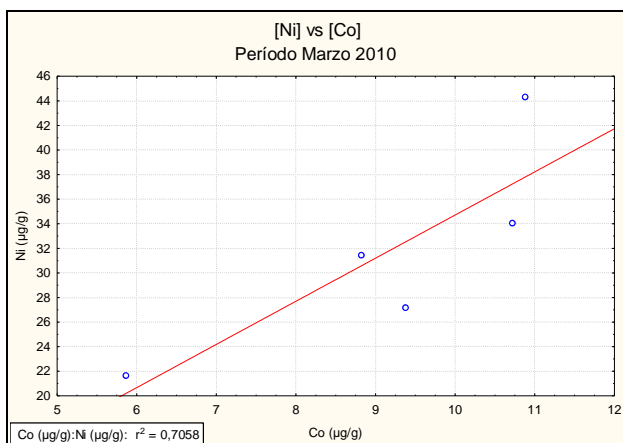


Figura 81. Correlación de Ni/Co y Zn/Co en el extracto de $\text{HNO}_3(\text{c})$ para el período de marzo de 2010.

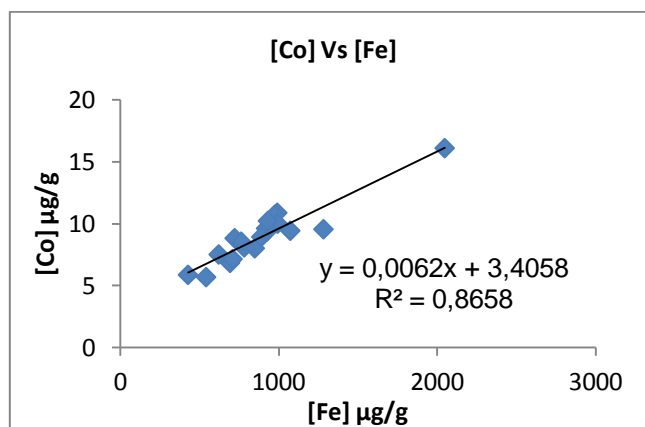


Figura 82. Correlación de Co/Fe en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.

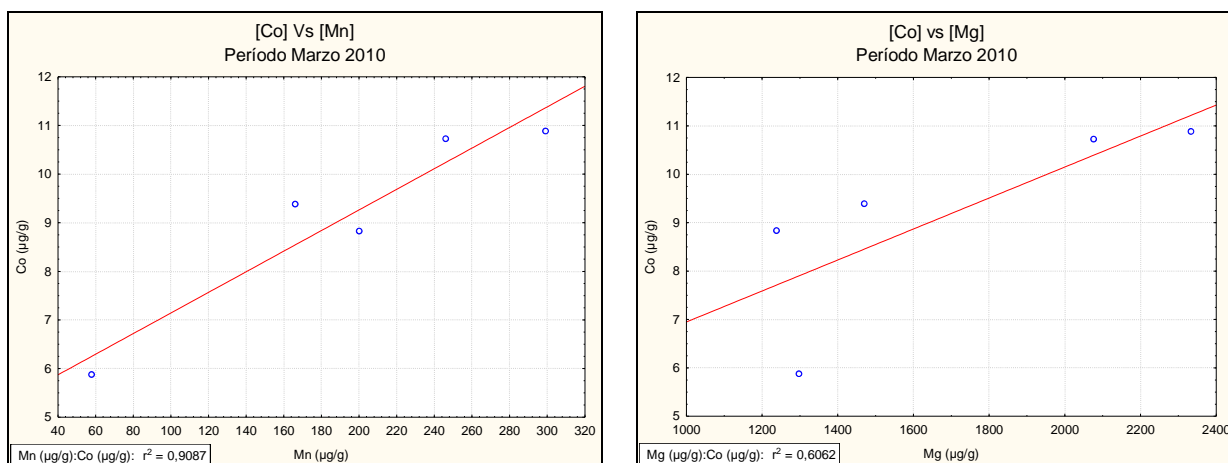


Figura 83. Correlaciones de Co/Mn y Co/Mg en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para el período de marzo de 2010.

7.3.3.11. Cobre (Cu)

Ahora para este elemento traza, el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo en la zona de estudio, mostró que los valores circularon entre 24 y 78 $\mu\text{g/g}$ para el período de marzo de 2010; mientras que en el período de marzo de 2011 se encontraron valores entre 37 y 61 $\mu\text{g/g}$; por su parte, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 circularon entre 40 y 78 $\mu\text{g/g}$.

Se puede evidenciar en los valores de concentración antes indicados y mostrados en la figura 84, que no hay una variación significativa de los mismos, por ende existe homogeneidad en las concentraciones de este elemento en la zona de estudio, aunque existe una ligera disminución de las mismas hacia la zona de Laguna Arena.

Aunado a ello, las concentraciones de Cu en las muestras de sedimentos de fondo de la zona de estudio sólo pudieron ser detectadas en los extractos de HCl 1M y $\text{HNO}_{3(c)}$, debido a que no se hallaron valores de concentración de este elemento en el extracto de $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia debido a que se encontraban por debajo del límite de detección (apéndice 7), lo que implica que dicho elemento se encuentra asociado a materia orgánica, o a oxihidróxidos amorfos y cristalinos.

Los valores en el extracto de HCl 1M oscilaron entre 4 y 40 $\mu\text{g/g}$, mientras que en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ estas concentraciones estuvieron comprendidas entre 17 y 58 $\mu\text{g/g}$, un poco más elevadas que las obtenidas en el primer extracto, esto puede ser observado en la figura 84, donde se muestra la distribución de este elemento por extracto en la zona de estudio.

El Cu en el extracto de HCl 1M presentó buenas correlaciones con Fe para todos los períodos de muestreo, además que para el período de marzo de 2010

presentó buena correlación con el Co, esto mostrado en las figuras 86 y 87, respectivamente.

La primera correlación indica que el Cu se encuentra asociado a oxihidróxidos y aluminosilicatos amorfos que pudieron incorporarlo en su estructura mientras cristalizaban. Asimismo, a pesar de no presentarse muy buena correlación con el Co, posiblemente puedan encontrarse asociados a una misma fase mineral y/o a una misma fuente de origen, posiblemente a oxihidróxidos de Fe ^[7,36].

De igual forma, al igual que en el extracto anterior, se obtuvo una buena correlación con el Fe para todos los períodos de muestreo y con el Co para los períodos de marzo y agosto de 2011 en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$, mostradas en las figuras 88 y 89 respectivamente, lo que indica que este elemento al igual que el elemento Co, puede estar posiblemente asociado a oxihidróxidos de Fe cristalinos y a arcillas tipo montmorillonita $((\text{Al},\text{Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_4(\text{OH})_8 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$ o vermiculita $((\text{Mg},\text{Ca})_{0,3}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_{3,0}(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$ ^[7,36].

Asimismo, en la figura 85 se puede observar que los mayores valores de concentración de este elemento se encuentran hacia la zona de Laguna Grande en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$, específicamente en el punto 9 (PNLT 10) al igual que otros elementos indicados anteriormente, lo que corrobora que en ese punto de muestreo hay un considerable transporte de carga sedimentaria por parte de los afluentes como el Caño San Nicolás y el Caño San Ignacio, y la cual está asociada a minerales como oxihidróxidos cristalinos que contienen este elemento en su estructura al momento de cristalizar.

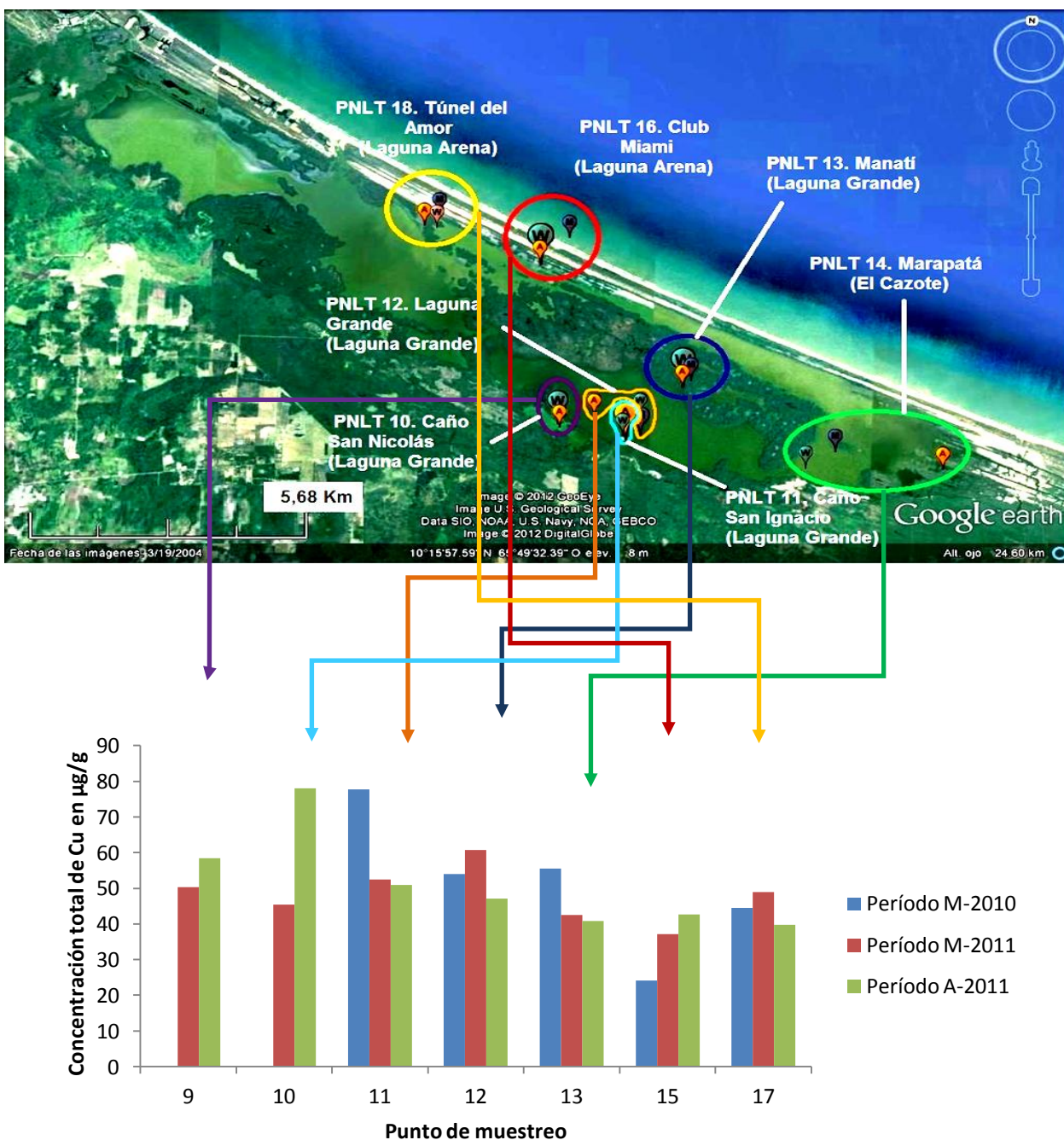


Figura 84. Distribución espacial y temporal total de Cu en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

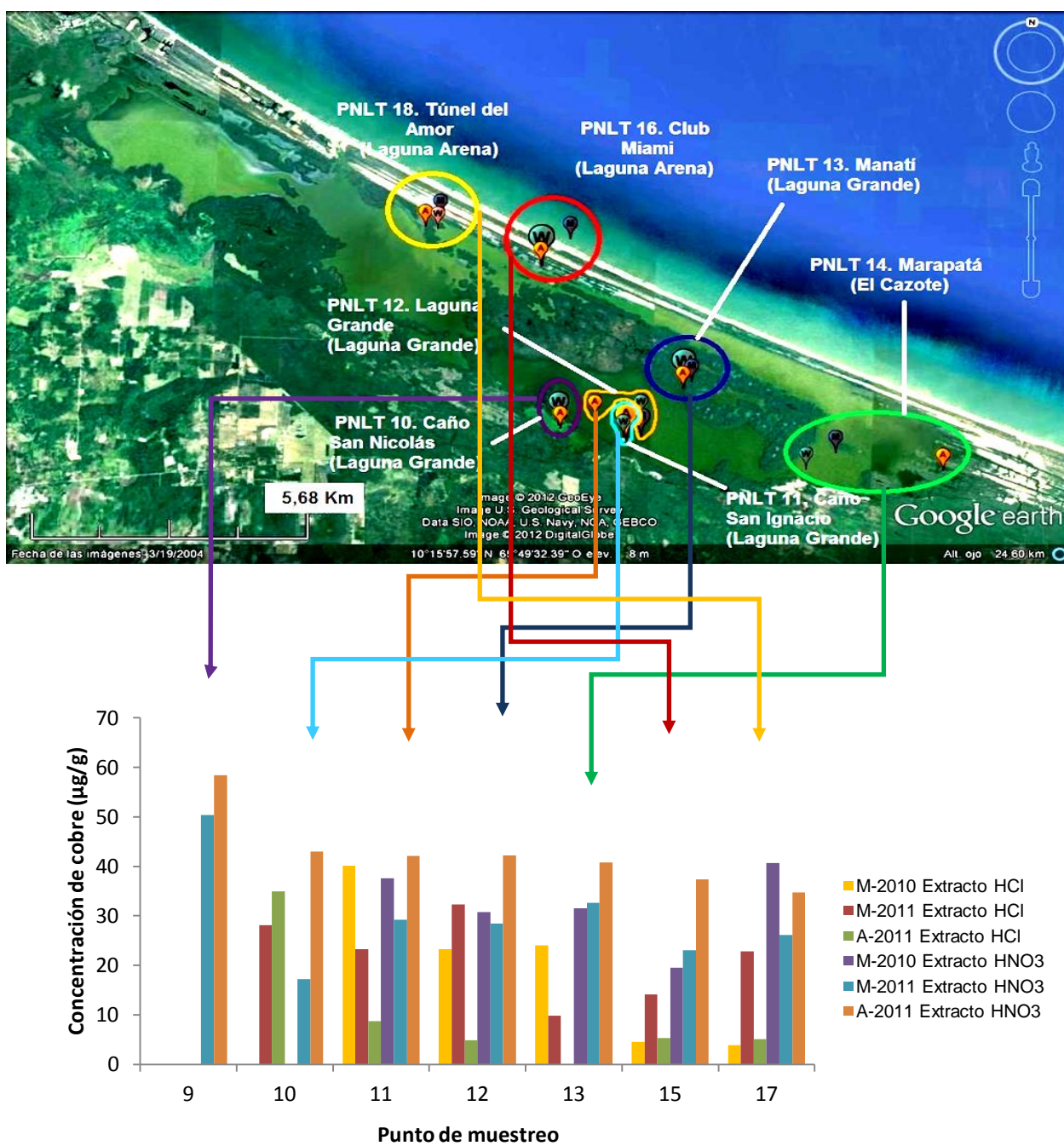


Figura 85. Distribución espacial de Co en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo.

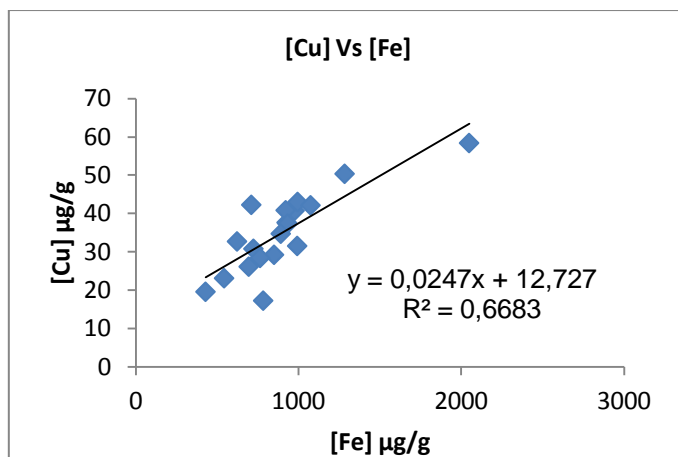


Figura 86. Correlación Cu/Fe en el extracto de HCl 1M para todos los períodos de muestreo.

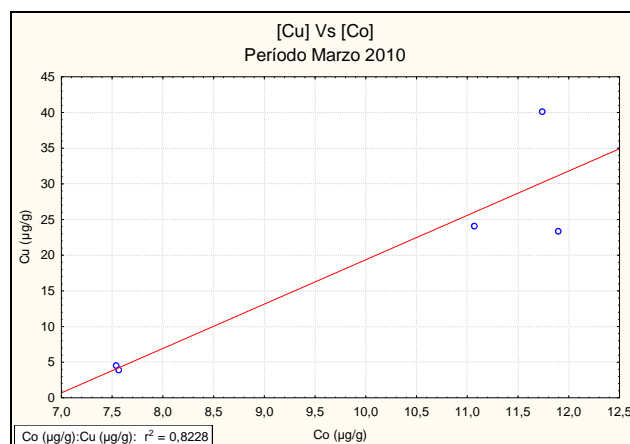


Figura 87. Correlación de Cu/Co en el extracto de HCl 1M para el período de marzo de 2010.

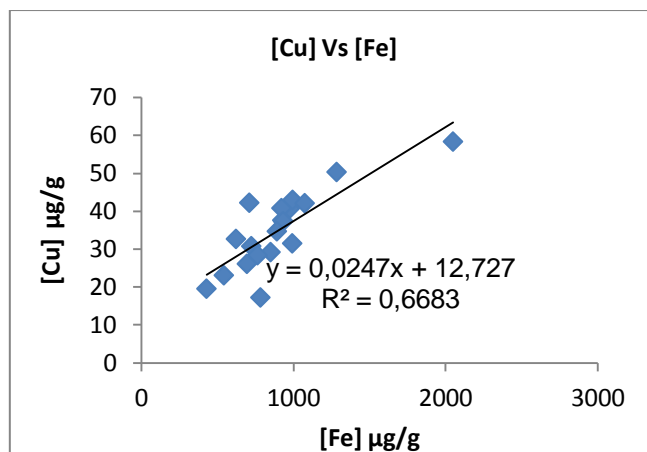


Figura 88. Correlación de Cu/Fe en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos de muestreo.

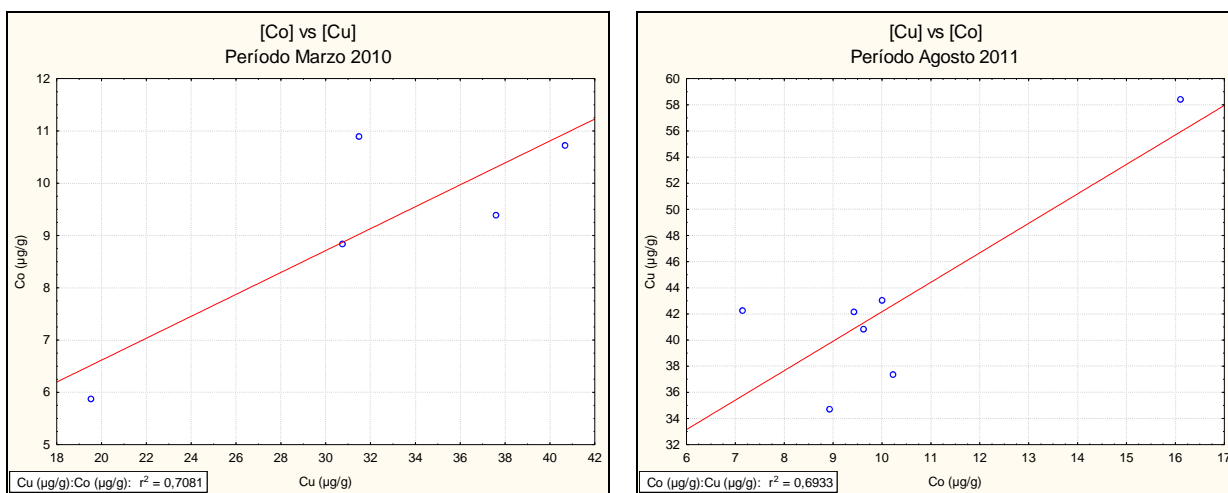


Figura 89. Correlación de Co/Cu en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$ para los períodos de marzo y agosto de 2011.

7.3.3.12. Cromo (Cr)

Por último, el análisis de las concentraciones totales contenidas en los sedimentos de fondo del elemento traza Cr, muestra que los valores oscilaron entre 15 y 62 $\mu\text{g/g}$ para período de marzo de 2010, mientras que para el período de marzo de 2011 se encontraron valores entre 11 y 38 $\mu\text{g/g}$; aunado a ello, los valores obtenidos en el período de agosto 2011 circularon entre 32 y 55 $\mu\text{g/g}$.

Se puede notar en la figura 90 que existe una homogeneidad en las concentraciones de Cr en la zona de estudio, aunque se observa que en la mayoría de los puntos de muestreo los valores más elevados se encuentran en el período de agosto de 2011 debido al aporte de carga sedimentaria a causa de las lluvias, por lo parece indicar la presencia de fases minerales como las antes nombradas, sin embargo, este elemento en particular por ser un indicador ambiental, podría estar también asociado a factores antrópicos en la zona como los antes indicados para el elemento Zn, este parámetro será corroborado con indicadores de contaminación como índice de geoacumulación (I_{GEO}) y factores de enriquecimiento (FE).

La presencia de este elemento pudo ser evidenciada solamente en el extracto de $\text{HNO}_{3(c)}$. Los valores de concentración obtenidos oscilaron entre 11 y 55 $\mu\text{g/g}$, esto puede observarse en la figura 91. Estos valores son algo similares a los valores obtenidos de Cu para el mismo extracto. Aunado a ello, no se presentaron correlaciones de este con ninguno de los otros elementos de estudio.

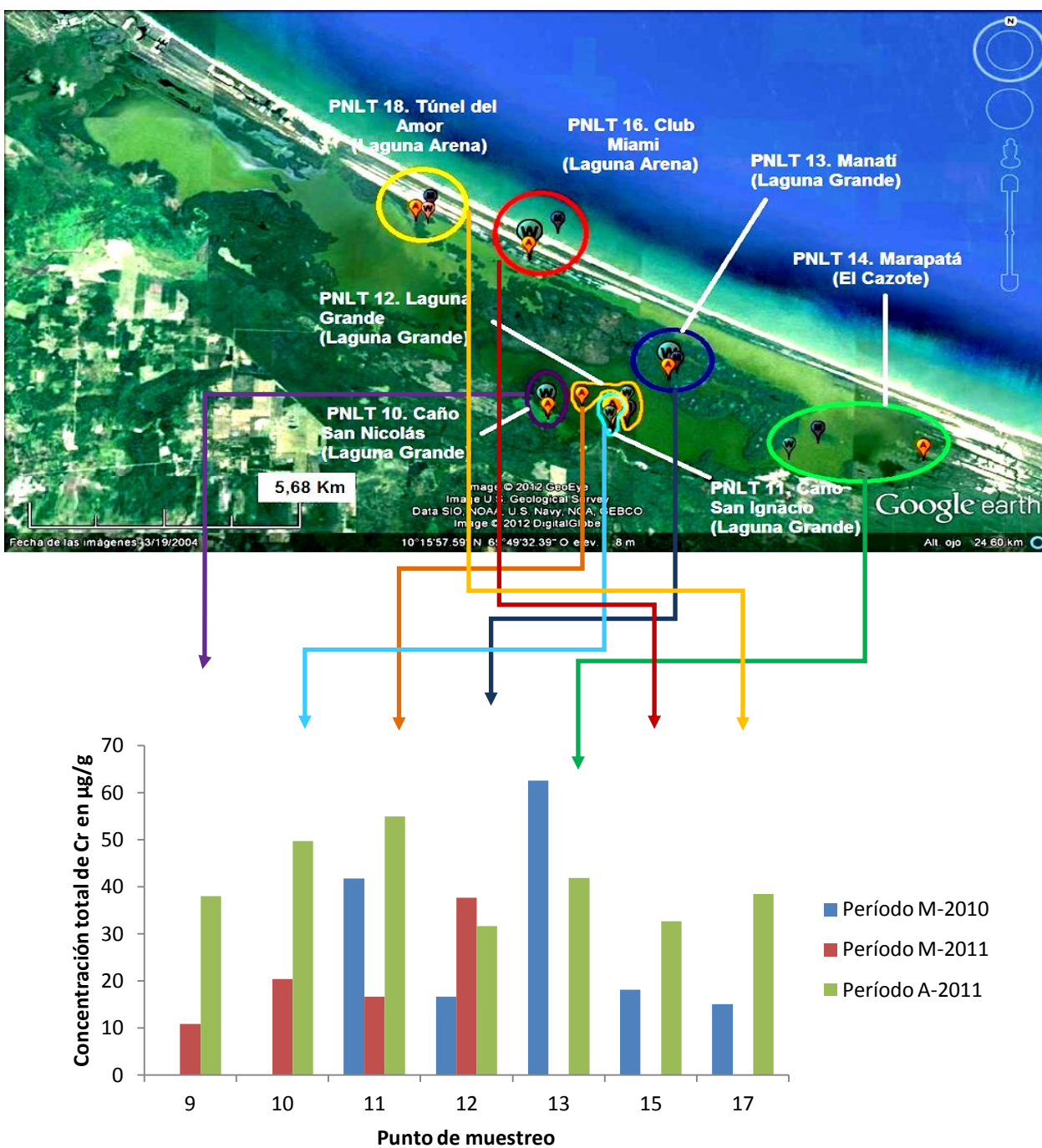


Figura 90. Distribución espacial y temporal total de Cr en la fracción lodo de los puntos de muestreo de la zona de estudio para todos los períodos.

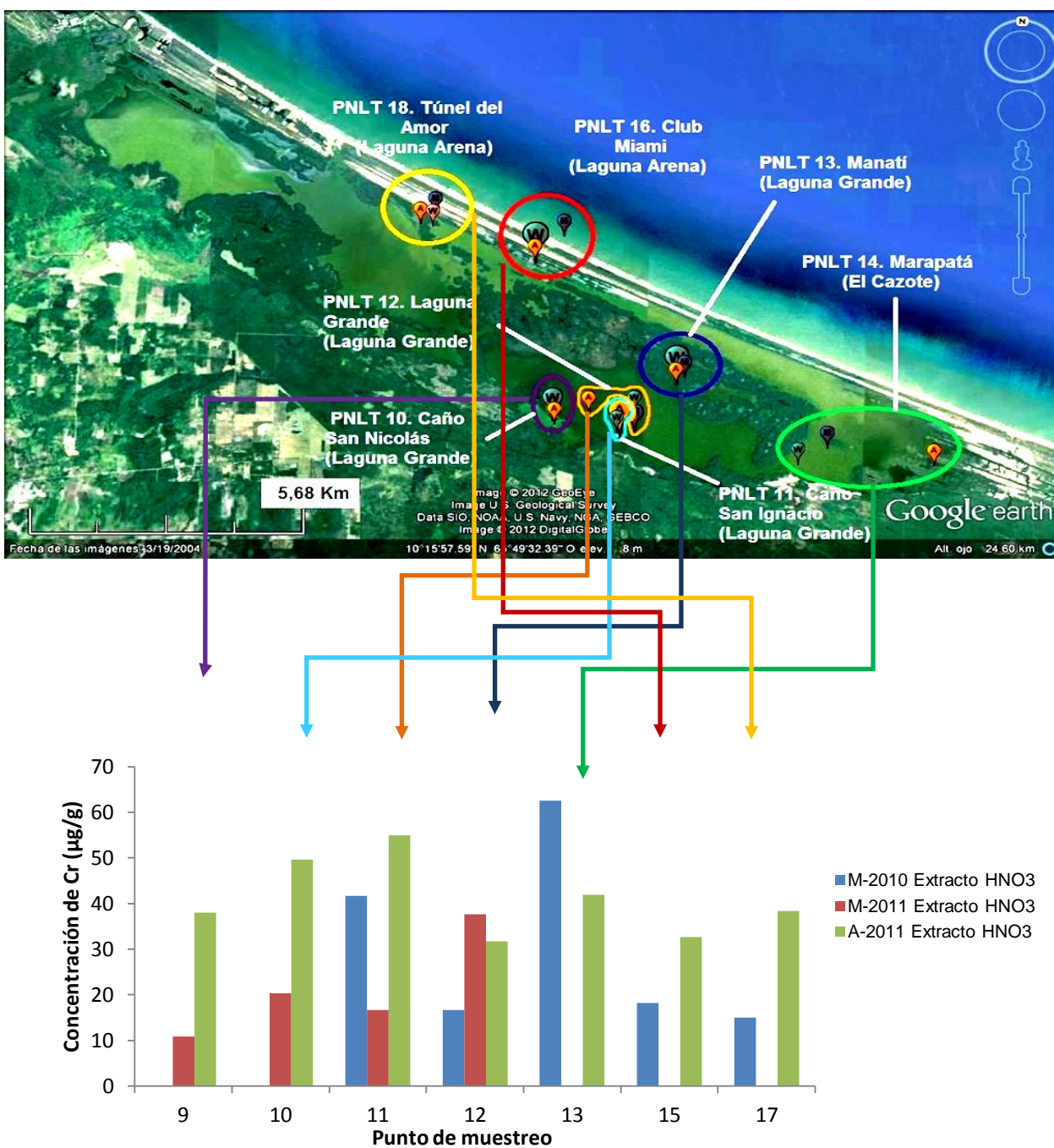


Figura 91. Distribución espacial de Cr en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio de todos los extractos y en todos los períodos de muestreo

7.3.4. Comparación de las concentraciones de Co, Cr, Cu, Ni y Zn con los valores base en sedimentos

Como se dijo anteriormente, un factor importante y primordial que debe ser tomado en cuenta en primera instancia para determinar el grado de contaminación en sedimentos en una zona determinada es el valor base, ya que se realizan comparaciones de concentración de elementos cualquiera contenidos en un sedimento que no ha sido afectado bajo la influencia antrópica con las concentraciones obtenidas en una zona de estudio, esto ayuda a la determinación de una posible contaminación en el sistema en cuestión. Los valores base de los elementos son obtenidos a partir de resultados obtenidos de varios estudios en una zona que no ha sido afectada por el hombre y estos finalmente son promediados; el valor final resultante es el que se toma como base o indicativo de libre contaminación y útil para la comparación con otras zonas de estudio.

En el mismo orden de ideas, para percatar la posible presencia de contaminación por parte de los elementos traza en la zona de estudio, se realizó una comparación de la concentración de los mismos con sus respectivos valores base. A continuación se presentan en la tabla 5 los valores de concentración base en sedimentos, estos encontrados por Turekian y Wedepohl (1961) ^[56].

Tabla 5 ^[38,56]. Valores base empleados en análisis de sedimentos para los elementos en estudio.

Elemento	Concentración en sedimentos en $\mu\text{g/g}$
Co	19
Cr	90
Cu	45
Ni	68
Zn	95

Para manifestar este criterio ambiental se realizaron gráficas comparativas. Cabe destacar que para esta sección sólo se tomaron en cuenta los elementos traza debido a que estos son los verdaderos indicadores de una posible contaminación ambiental a causa de la actividad antrópica.

En las figuras 92, 93, 94, 95 y 96 se aprecia una comparación de la concentración contenida en los sedimentos de los elementos traza con sus respectivos valores de concentración base, notándose que sólo el elemento Cr presenta todas las concentraciones en todos los puntos por debajo del valor de concentración base, mientras que la concentración de los elementos Co, Cu, Ni y Zn se encuentra por encima de sus respectivos valores base.

Primeramente, las concentraciones de Cr contenidas en el sedimento por encontrarse por debajo de valor de concentración base indican que este no se considera como un agente contaminante para la zona en estudio.

Por otro lado, las altas concentraciones de los elementos Co, Cu, Ni y Zn comparadas con sus valores de concentración base parecen indicar o dar indicios de que en la zona de estudio hay un aporte de los mismos por la actividad antrópica cercana a dicha zona ^[21,38]. Asimismo, las concentraciones superiores a las de la línea base de González (2010) en los sedimentos de fondo del Lago de Valencia observadas para los elementos Cu, Zn y Ni coincide con los valores antes reportados en este caso.

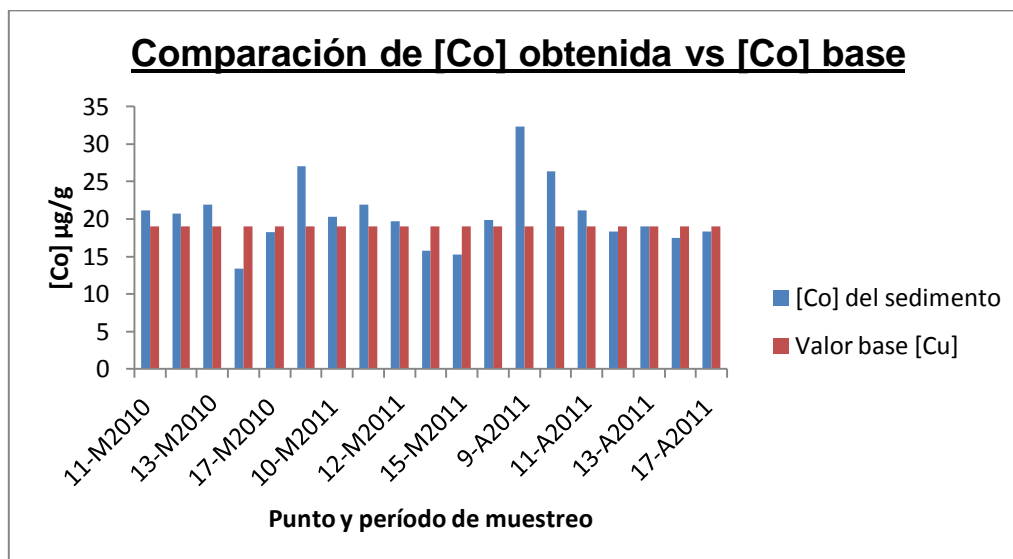


Figura 92. Comparación de los valores de concentración de Co en µg/g con el valor base reportado.

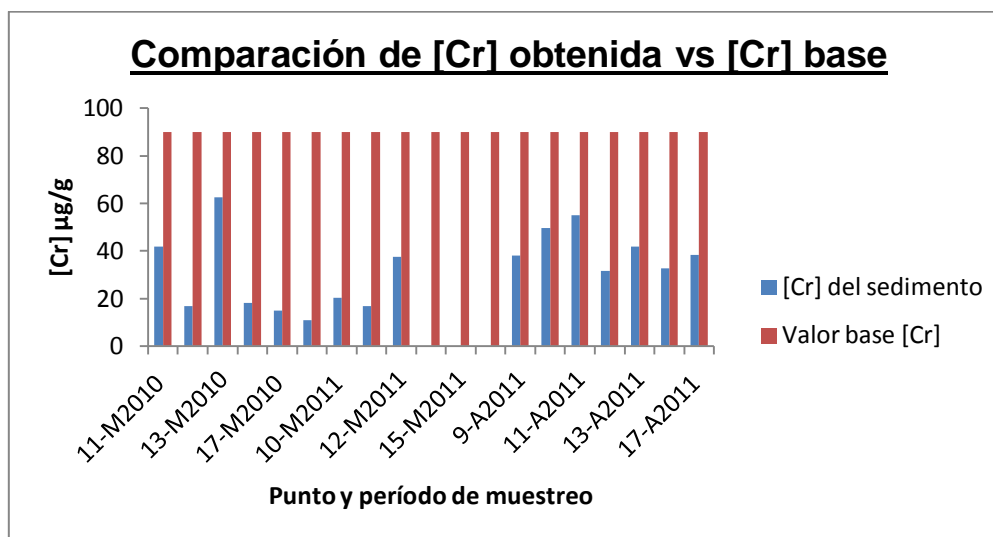


Figura 93. Comparación de los valores de concentración de Cr en µg/g con el valor base reportado.

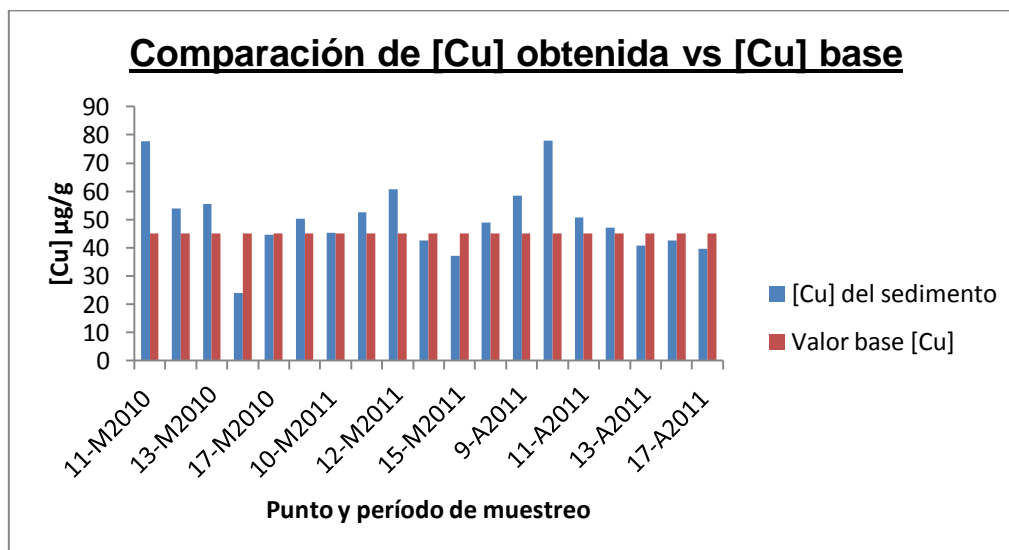


Figura 94. Comparación de los valores de concentración de Cu en µg/g con el valor base reportado.

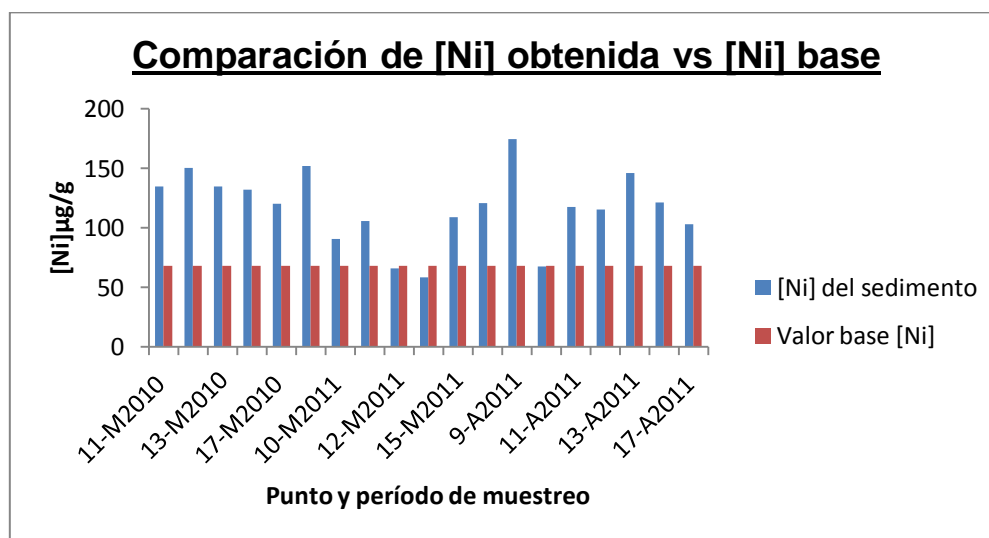


Figura 95. Comparación de los valores de concentración de Ni en µg/g con el valor base reportado.

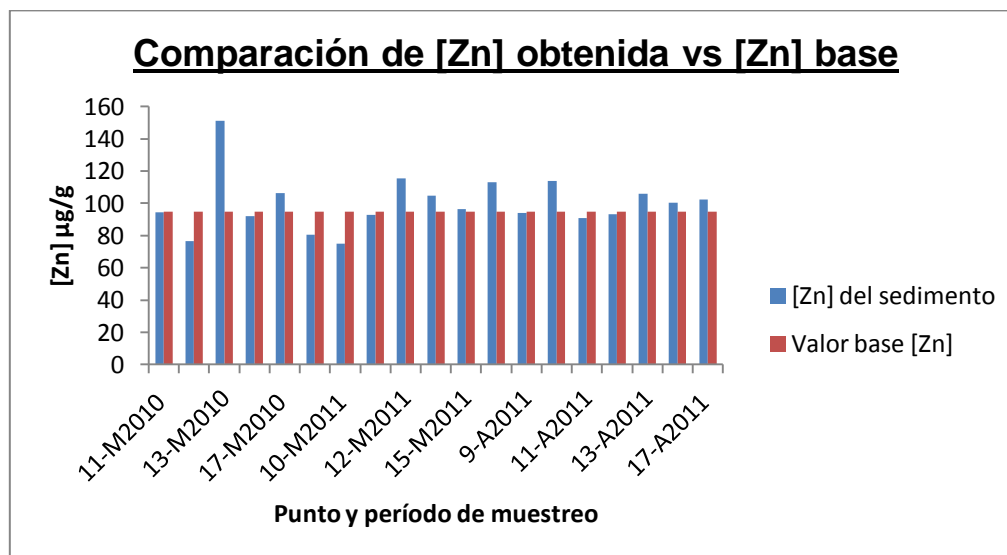


Figura 96. Comparación de los valores de concentración de Zn en µg/g con el valor base reportado.

Asimismo, a pesar de que la comparación de la concentración de estos elementos con la concentración de sus valores base puede dar indicios acerca de una posible contaminación, es bueno analizar y utilizar otros criterios ambientales e indicar si existe una verdadera contaminación, es por ello que se determinaron los factores de enriquecimiento (FE) e índice de geoacumulación (I_{GEO})^[38].

7.3.5. Determinación de los indicadores ambientales índices de contaminación FE e (I_{GEO}) en las muestras de sedimento de la zona de estudio

Los indicadores ambientales o índices de contaminación se basan en técnicas de normalización geoquímicas y son utilizados para determinar la acumulación o enriquecimiento de los elementos de estudio en los sedimentos. Es por ello, que se determinó el factor de enriquecimiento (FE) y el índice de geoacumulación (I_{GEO}).

Como se dijo anteriormente en la revisión bibliográfica, el factor de enriquecimiento (FE), consiste en la estandarización de la concentración de un elemento de prueba contra uno de referencia, para así identificar las concentraciones anómalas del elemento en cuestión. Está definido como:

$$FE = \frac{\left(\frac{C_n}{C_m}\right)_{muestra}}{\left(\frac{C_n}{C_m}\right)_{referencia}}$$

Donde C_n es la concentración del elemento a estudiar y C_m la concentración el elemento empleado como referencia. Como elemento de referencia han sido empleando el elemento Al ^[38]. Se han establecido cinco grados de contaminación del sedimento reconocidos en base al valor del factor de enriquecimiento, estos mostrados en la anterior tabla 2 (página 33).

Por otro lado, el índice de geoacumulación (I_{GEO}) es otro indicador ambiental que puede determinar el grado de contaminación si es que existe, en la zona de estudio. Este está definido como:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5B_n} \right)$$

Donde C_n es la concentración determinada del metal n en la fracción de sedimento, B_n es el valor de concentración base de ese elemento, mientras que la constante 1,5 es un factor de corrección de las fluctuaciones naturales de una determinada sustancia en el medio ambiente y pequeñas influencias antrópicas. Distingue seis clases de geoacumulación ^[38], estos mostrados en la anterior tabla 3 (página 34).

Además de la comparación de concentraciones estudiadas con valores base en sedimentos, es usual y útil para corroborar una posible contaminación en la zona de estudio, el uso de los factores de enriquecimiento (FE) e índices de geoacumulación (I_{GEO})^[38], ya que se utilizan estas ecuaciones que relacionan el elemento en estudio contra el de referencia o base, identificando cualquier anomalía ambiental en el sistema. Dependiendo del grado de contaminación obtenido, se puede realizar una clasificación cualitativa y cuantitativa de cuán contaminado o no se encuentra dicho sistema en estudio.

En el mismo orden de ideas, se observan las figuras 97 y 98 los FE y I_{GEO} para los elementos traza respectivamente, notándose que no hay ningún tipo de aporte contaminante por parte de dichos elementos, lo que implica que estos no representan una amenaza significativa para la zona en estudio, debido a que según escala de factor de enriquecimiento (FE) mostrada en la tabla 2, los sedimentos de fondo captados en los puntos de muestreo muestran una deficiencia de enriquecimiento y un enriquecimiento moderado, ya que la mayoría de los valores se encuentran por debajo de 2 ($FE < 2$) y sólo se presentan tres valores relativamente anómalos (FE entre 2 y 5) para los elementos Ni, Co y Cu; asimismo, la escala de índice de geoacumulación (I_{GEO}), los clasifica entre no contaminantes ($I_{GEO} < 0$) y moderadamente contaminantes ($0 < I_{GEO} < 1$).

Esto descarta totalmente los resultados obtenidos mediante la comparación de la concentración de dichos elementos con sus respectivos valores base, ya que este parámetro indicaba una posible contaminación por parte de los mismos debido a que sus concentraciones se encontraban por encima de dichos valores base, a pesar de ello, no hay que descartar los resultados obtenidos por este parámetro, ya que estos valores de concentración pudieron ser detectados a causa de factores antrópicos, pero sus concentraciones no son significativas como para representar un riesgo de contaminación en la zona de estudio; estos pudieron ser transportados a través de los

afuentes y el río Guapo que se conectan con el complejo lagunar y zona de estudio. Lo contrario reporta González (2010) en el Lago de Valencia, ya que esta autora determinó que los sedimentos de fondo que contenían estos elementos presentaban un orden creciente de no contaminados a moderadamente contaminados ^[38].

Aunado a ello, Adoo *et al* (2011) reportaron para los sedimentos de fondo de la Laguna de Kpeshie en Ghana, que estos no se encontraban contaminados por Zn y que su posible fuente era de tipo natural, y a su vez resaltó un resultado contrario al obtenido en este trabajo de investigación, ya que los sedimentos en su zona de estudio en encontraban enriquecidos en metales pesados como Ni y Cr ^[41].

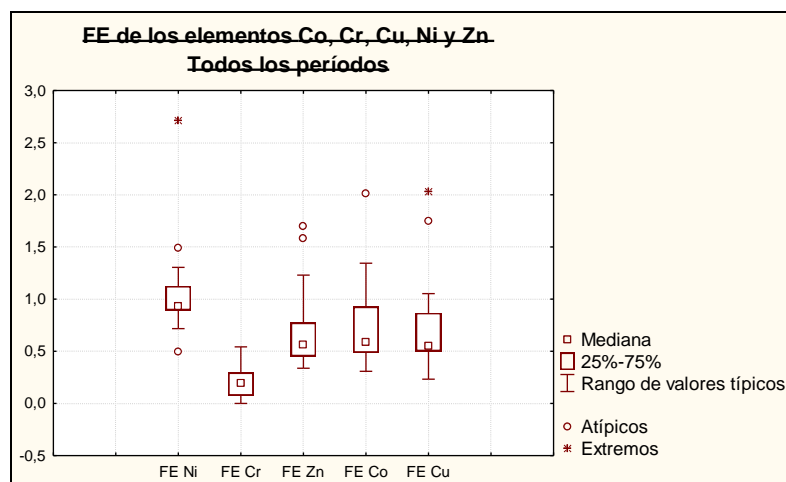


Figura 97. Factores de enriquecimiento (FE) de los elementos trazas para todos los períodos de muestreo.

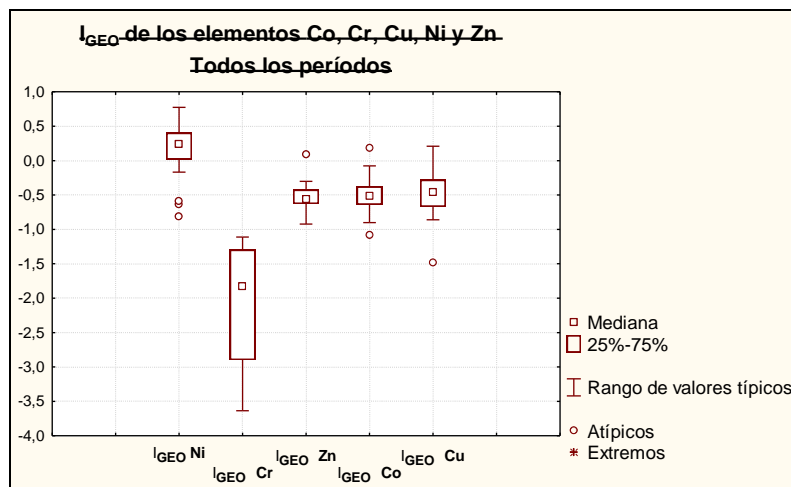


Figura 98. Índice de geoacumulación (I_{GEO}) de los elementos trazas para todos los períodos de muestreo.

7.3.6. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico fue realizado con la finalidad de conocer, las distintas fases que se encuentran en las muestras de sedimento de fondo de la zona de estudio, esto claramente relacionándolo con los análisis químicos elementales antes realizados. Para ello se trabaja a diferentes temperaturas, desde 100°C, pasando por 450°C y 550°C hasta 900°C y a cada una de ellas se le atribuye la destrucción de una fase en específico, es decir, agua adsorbida u oxihidróxidos amorfos, materia orgánica, oxihidróxidos cristalinos y carbonatos, respectivamente [37].

Al obtener los porcentajes de pérdidas a las diferentes temperaturas de trabajo, se puede apreciar mediante la figura 99, tomando los datos de todos los períodos de muestreo que no existe linealidad entre ellos, notándose también que los mayores porcentajes de pérdidas obtenidos durante la realización de la termogravimetría fueron a 450°C lo que implica que la fase que predomina en los sedimentos de fondo de la zona de estudio, específicamente en la fracción limo-arcilla (lodo) es la materia orgánica

(M.O.), ya que dichos valores oscilaron entre 38 y 65 % en pérdidas para todos los períodos de muestreo, lo que corrobora la asociación de los elementos Ni, Cu, Co y Zn encontradas mediante los análisis químicos a esta fase. Esto concuerda con los valores de pH obtenidos en el período de agosto de 2011.

Sin embargo, hay que hacer notar que las fases correspondientes a las temperaturas de 100°C y 900°C, es decir, los oxihidróxidos amorfos y humedad y los carbonatos respectivamente, presentaron valores de pérdidas parecidos entre sí, por lo que podría decirse entonces que se encuentran en una proporción similar en la fracción lodo de los sedimentos, ya que los valores a 100°C oscilaron entre 12 y 34%, mientras que los valores obtenidos a 900°C se encontraron entre 11 y 26% en pérdidas para todos los períodos de muestreo, estas últimas confirmando la presencia de conchas marinas en el sistema.

Además, hay que destacar que a pesar de que los porcentajes de pérdidas obtenidos a estas temperaturas son bajos en comparación con los encontrados a 900°C, representan una porción significativa en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio y por lo tanto corroboran la asociación de estas fases con elementos como Mn, Al y Ca obtenidas también a partir de los análisis químicos.

En contraste con los resultados antes obtenidos, los valores de pérdidas a 550°C correspondientes a los oxihidróxidos cristalinos y a algunas arcillas fueron bajos en comparación con los encontrados a las otras temperaturas de trabajo, ya que estos oscilaron entre 3 y 12% en pérdidas para todos los períodos de muestreo, lo que indica que la presencia de las fases minerales de tipo oxihidróxido cristalino y arcilla son pequeñas en comparación al otro grupo de fases minerales presentes en la fracción lodo de los sedimentos, pero eso no implica que las asociaciones de estas fases con elementos como Fe, Al, K, Na y Mn mediante las correlaciones obtenidas por los análisis químicos no sean ciertas, ya que dichas correlaciones muestran esta clara asociación.

Los resultados obtenidos por termogravimetría pueden ser también observados en las figuras 100, 101 y 102, en donde fueron tomados los datos de los períodos de muestreo de forma separada.

En general, estos resultados obtenidos corroboran la existencia o presencia en los sedimentos de fases tipo oxihidróxidos amorfos y cristalinos, minerales de arcilla, materia orgánica y carbonatos que fue supuesta mediante los análisis químicos.

Dichos resultados son similares a los reportados por Marcano (2010) para los sedimentos superficiales del Lago de Valencia, ya que este encontró que a 750°C la pérdida presentó porcentajes >10 %, con porcentajes intermedios entre 4 y 10%, y los menores valores <4%; sin embargo, encontró que la mayor fuentes de sedimentos es de tipos siliclásticos.

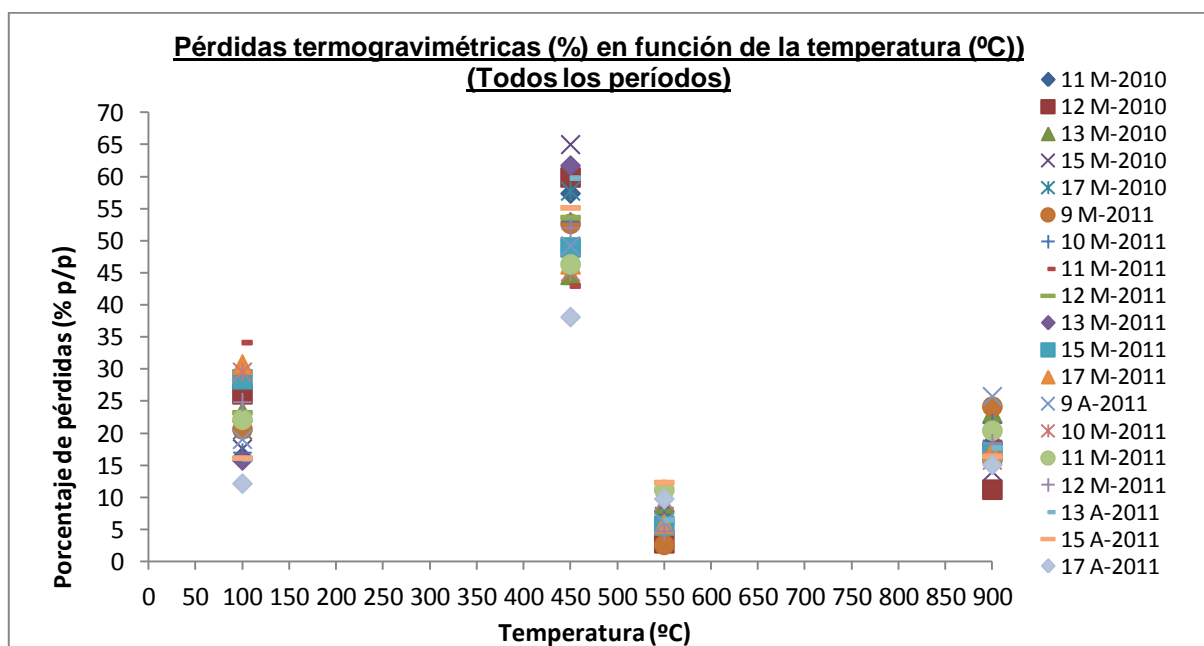


Figura 99. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para todos los períodos

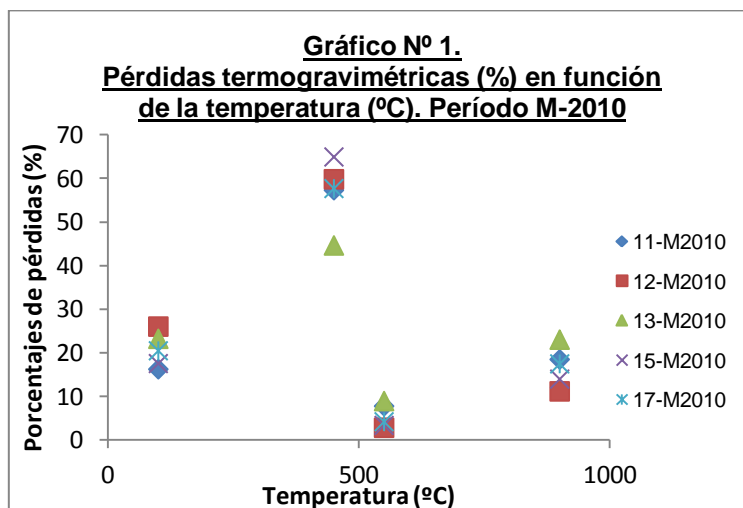


Figura 100. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para marzo de 2010.

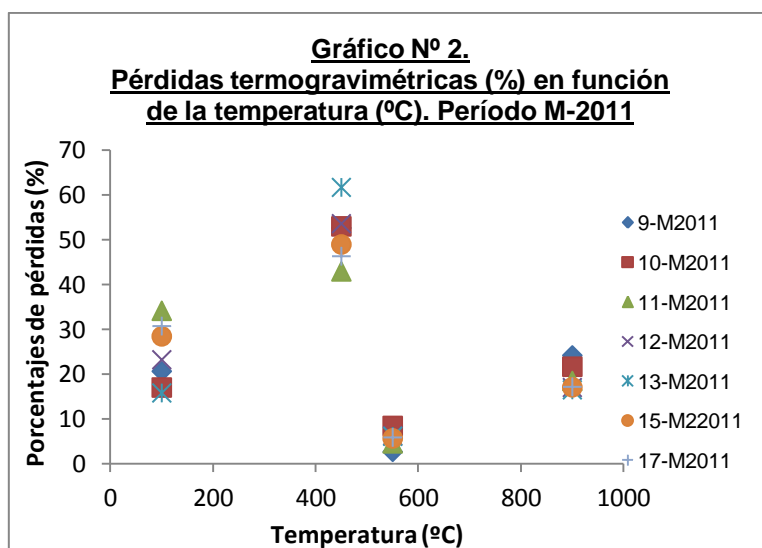


Figura 101. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para marzo de 2011.

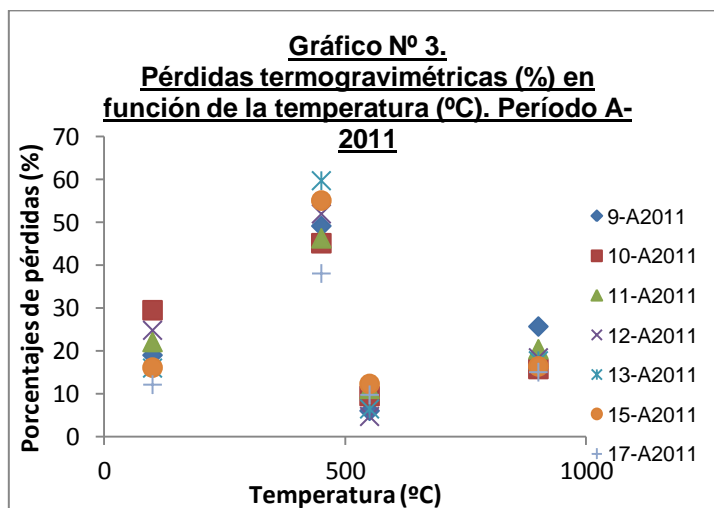


Figura 102. Porcentaje de pérdidas termogravimétricas en función de las temperaturas de trabajo en la fracción lodo de los sedimentos de fondo de la zona de estudio para agosto de 2011.

8. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se plantearon las siguientes conclusiones:

En el período de marzo de 2010 los valores de pH se encuentran entre 7,5 y 8,3; mientras que en el período de marzo de 2011 el valor más bajo es de 7,3 y el más alto de 8,5; estos dos períodos presentan sus valores más elevados se encuentran hacia la zona de Laguna Arena, por influencia del agua de mar; en el período de agosto de 2011 se encontraron los valores más bajos de pH, debido a gran depositación de materia orgánica.

La conductividad en marzo de 2010 comprendió valores desde 18870 hasta 41200 $\mu\text{s}/\text{cm}$, mientras que en el período marzo de 2011 se obtuvieron valores que oscilaron entre 11040 y 32720 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y en el período agosto de 2011 estos valores circularon entre 6060 y 31500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, más bajos en comparación con los períodos anteriores, debido a los ríos, arroyos y caños se encuentran abundantes de agua dulce de escorrentía. Los valores de salinidad en marzo de 2010 oscilaron entre 1,50 y 2,40 ‰, mientras que en el período de marzo de 2011 entre 0,55 y 2,01 ‰ y en agosto de 2011 desde 0,33 hasta 1,98 ‰, debido a procesos naturales de evaporación que disminuyen la cantidad de agua en la columna.

Los elementos Al, Fe, K, Na, Ca, Mg, Zn, Co, Ni y Cu indican la presencia de arcillas, micas o aluminosilicatos en los sedimentos de fondo, además, el Fe y el Mg también están asociados a la litología de la zona, el Na a la influencia del mar, el Ca a la presencia de conchas marinas, el Zn a actividades antrópicas y junto con Ni, Co y Cu se encuentran fuertemente asociados a la materia orgánica. El Mn se encuentra asociado a oxihidróxidos de Mn amorfos y cristalinos como manganita ($\text{MnO}(\text{OH})$). Por otro lado, el Cr parece estar asociado al igual que el Zn a actividad humana.

Asimismo, el análisis realizado mediante termogravimetría indicó que la fase predominante en los sedimentos de fondo es la materia orgánica; además, las fases tipo oxihidróxidos amorfos y carbonatos representan una porción significativa, mientras que las de fases como oxihidróxidos cristalinos y arcillas son bajas en comparación con las otras fases.

Aunado a ello, el FE e I_{GEO} indicaron que las concentraciones de los elementos traza Zn, Ni, Cr, Cu y Co no son significativas como para representar un riesgo de contaminación en la zona de estudio.

9. RECOMENDACIONES

Realizar un análisis de difracción rayos X a las muestras de sedimento de fondo estudiadas con el fin de conocer y corroborar la composición exacta de minerales contenidos en las mismas.

Determinar la concentración de C, S, N y P en los sedimentos de la zona de estudio, con la finalidad de confirmar la presencia de materia orgánica.

Determinar la concentración de Si en los sedimentos de la zona de estudio, ya que esto podría corroborar la presencia de aluminosilicatos.

Para la determinación de los elementos traza como Pb y Cd se debe utilizar una técnica mucho sensible y que pueda medir bajas concentraciones, como por el ejemplo el ICP-OES.

Con los resultados obtenidos en este Trabajo Especial de Grado, realizar un informe que indique las posibles contaminaciones por parte de elementos traza mediante factores antrópicos, con el fin de prever o alertar a los entes correspondientes que se encargan del cuidado de este complejo lagunar.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Méndez, J. (2006): Geología física. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de ciencias, Universidad Central de Venezuela., Caracas. Páginas 199.

[2] Tarbuck E. y Lutgens, F. (1999): Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física. Illinois Central College, sexta edición. Editorial Prentice Hall. Páginas 540.

[3] Aznar, J. (2002): Recursos Mundiales, la guía global del planeta. La gente y los Ecosistemas: se deteriora el tejido de la vida. Instituto de Recursos Mundiales. Editorial Ecoespaña. Madrid, Páginas 407.

[4] Gómez, L. (2003): Identidad y medio ambiente. Enfoques para la sustentabilidad de un bien común. Universidad de Quintana Roo. Editorial Siglo XXI. Páginas 156.

[5] Definiciónabc. <http://www.definicionabc.com/geografia/laguna.php> (Consultada el 19 de noviembre de 2011).

[6] Parra J. y Espinosa, L. (2007): Acumulación De Pb, Cd Y Zn En Sedimentos Asociados a *Rhizophora Mangle*, en el río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Páginas 8. http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_31/120/347-354.pdf

[7] De Freitas, F. (2008): Distribución de Al, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Zn y Hg en los sedimentos de fondo del Golfete de Cuare, Chichiriviche, estado Falcón. Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Octubre. Páginas 112.

[8] Venezuela: Parque Nacional Laguna de Tacarigua. www.parkswatch.org. (Consultada el 29 de diciembre de 2011).

[9] <http://www.parkswatch.org/parkprofile.php?l=spa&country=ven&park=tlnp&page=thr>. (Consultada el 19 de noviembre de 2011).

[10] González, M. y Henríquez J. (2002): Distribución espacial de la concentración de metales en sedimentos superficiales de la laguna Carén. Departamento de Ingeniería Geográfica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Santiago. Páginas 105.

[11] Méndez, J. (2006): Petrología. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de ciencias, Universidad Central de Venezuela, Editorial PDVSA-INTEVEP Caracas. Páginas 363.

[12] Apuntes de geología general. Rocas sedimentarias clásticas 2. Propiedades de los clastos. <http://www.geovirtual.cl/geologiageneral/ggcap05b-2.htm> (Consultada el 19 de noviembre de 2011).

[13] Portal de los siete mares. Mar de Chile. Capítulo 8.3. Clasificación de sedimentos de mar profundo.

http://www.mardechile.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=349&Itemid=31 (Consultada el 19 de noviembre de 2011).

[14] Casanova, E. (2005): Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela, Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas. Páginas 482.

[15] Lo Mónaco, S. (2008): Guía de Geoquímica. Tema 6. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Páginas 28.

[16] Uribe, C. (2002): Los Colores del Aire. Aves de Colombia y del Trópico Americano. Editorial Cristina Uribe, Colombia. Páginas 244.

[17] Baird, C. (2001): Química Ambiental. Departamento de química, Universidad Autónoma de Barcelona. Editorial Reverté, Barcelona. Páginas 622.

- [18] Val, Rafael; Rivera, F.; Gutiérrez A.; Mejía, R.; Sánchez, P.; Aparicio, J y Díaz, L. (2005): La medición de sedimentos en México. Universidad Autónoma de Tabasco. Editorial UNESCO, México. Páginas 113.
- [19] Wild, A. (1992): Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell. Editorial Mundi-prensa, Madrid. Páginas 1045.
- [20] Cox, P.A. (1995): The elements on earth, Inorganic Chemistry in the Environment. Fellow of New College and Lecturer in Inorganic Chemistry. University of Oxford. New York,. Páginas 287.
- [21] Rivas, A. (2008): Estudio de la distribución y abundancia de Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Sr, V, Zn, Hg y P en los sólidos suspendidos de la cuenca baja del río Tocuyo y en los sedimentos de sus zonas de influencia, estado Falcón. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Junio. Páginas 80.
- [22] <http://fi.uaemex.mx/hsalinas/cursos%20/rios/clase4.pdf> (Consultada el 19 de noviembre de 2011).
- [23] Ibarz, A. y Barbosa-Cánovas, G. (2005): Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Editorial Mundi- Prensa Libros. Madrid,. Páginas 865.
- [24] Glasstone, S. (1972): Tratado de Química – Física. Editorial Aguilar S.A. Segunda Edición, España. Páginas 1180
- [25] Bueno, H. (1977): Química Analítica y Análisis Agrícola. Cuarta Edición. Universidad de Guayaquil. Páginas 368.
- [26] Luque de Castro, M. (1993): Extracción con fluidos supercríticos en el proceso analítico. Editorial Reverté S. A., Barcelona. Páginas 480.

- [27] Área de Ingeniería Química (2006), Universidad Autónoma de Madrid. http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/intercambioionico2006.pdf.
- [28] Burriel, F.; Lucena, F.; Arribas, S. y Hernández, J. (2007): Química Analítica Cualitativa. Editorial Paraninfo. Páginas 1072.
- [29] Laitinen, H. y Harris, W. (1982): Análisis Químico. Editorial Reverté. Páginas 638.
- [30] Herbello, P. (2002): Especiación de metales pesados mediante la formación de quelatos. Distribución de las especies inorgánicas de As y Cr en el río de Arousa. Páginas 26.
- [31] Skoog, D. y West, D. (1986): Introducción a la Química Analítica. Editorial Reverté. Páginas 386.
- [32] Finck, A. (1988): Fertilizantes y fertilización. Editorial Reverté. Barcelona. Páginas 439.
- [33] Mason, B. (1960): Principios de Geoquímica. Editorial Omega. Segunda Edición, Barcelona. Páginas 333.
- [34] Camargo, J. (2002): Hidráulica de canales. Facultad de Ingeniería, UNAM.. Páginas 836.
- [35] Isava, F. (1995): Caracterización de la comunidad bacteriana asociada a la interfase agua-sedimentos, niveles de sedimentación y su importancia ecológica, en la laguna de Tacarigua-Edo. Miranda. Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Agosto. Páginas 57.

[36] Moreno, R. (2009): Caracterización geoquímica de los sedimentos de fondo de la zona este del Golfo de Cuare y su zona próxima costera, estado Falcón. Trabajo Especial de Grado. Departamento de Geoquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas. Páginas 73.

[37] Marcano, E. (2010): Distribución espacial de fósforo en sedimentos superficiales del Lago de Valencia. Departamento de Geoquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Octubre. Páginas 70.

[38] González, A. (2010): Composición química y disponibilidad ambiental de los elementos en los sedimentos del lago de Valencia, Edo. Aragua y Edo. Carabobo. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Noviembre. Páginas 116.

[39] Urrutia, R.; Barra, R. y Yevenes, M. (2002): Determinación de los niveles basales de metales traza en sedimentos de tres lagos andinos de Chile: lagos Chungará, Iaja y Castor. Boletín de la Sociedad Chilena de Química. Unidad de Sistemas acuáticos, Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE, Universidad de Concepción, casilla 160-C. Concepción, Chile. Bol. Soc. Chil. Quím. v.47 n.4. Páginas 11.

[40] Turki, J. (2007): Metal Speciation (Cd, Cu, Pb and Zn) in Sediments from Al Shabab Lagoon, Jeddah, Saudi Arabia. Faculty of Marine Science, King Abdulaziz University. Vol. 18, pp: 191-210.

[41] Adoo, M. A.; Okley, G.M.; Affum, H.A.; Acquah, S. y Gbadago, J.K. (2011): Water Quality and Level of Some Heavy Metals in Water and sediments of Kpeshie Lagoon, La-Accra, Ghana. Department of Oceanography, University of Ghana, Legon the Kpeshie. Research Journal of Environmental and Earth Sciences 3(5): 487-497.

- [42] Álvarez, J. (1996). Ubicación, origen características y problemática ambiental del Parque Nacional Laguna de Tacarigua. Coordinación PNLT, informe técnico INPARQUES, Venezuela. Páginas 17. www.parkwatch.org.
- [43] Conde, J. (1996): A profile of Laguna de Tacarigua, Venezuela: A Tropical Estuarine Coastal Lagoon. Centro de Ecología, IVIC, Caracas 1020-A. Venezuela. http://www.interciencia.org/v21_05/art03/ Consultada el 19 de noviembre de 2011).
- [44] Malaver, N., Del Pino M. y Diaz, S. (2011): Informe de Avance de 1° Salida de Campo del Proyecto PNUD en los días del 1 al 3 de marzo de 2011 a la Laguna de Tacarigua de estado Miranda, Caracas. Páginas 10.
- [45] Google Earth (2012). Sistema de Información Geográfica Satelital. Disponible: <http://earth.google.com/intl/es/>. (Consultada el 3 de octubre de 2012).
- [46] Skoog, D. y West, D. (2001): Química Analítica. Editorial Macgraw- Hill. Séptima Edición, México. Páginas 1038.
- [47] Dana, J. D.: Manual de mineralogía. Editorial Reverté. Cuarta edición, México. Páginas 679.
- [48] Roldán, G. (2003): Bioindicación de la calidad del agua en Colombia, propuesta para el uso del método BMWP/Col. Universidad de Antioquia. Editorial Universidad de Antioquia. Primera edición, Colombia. Páginas 170.
- [49] Cognetti, G; Sarà, M. y Magazzù, G. (2001): Biología marina. Editorial Ariel. Primera edición, España. Páginas 624.
- [50] Miller J. y Miller J. (2002): Estadística y quimiometría para química analítica. Editorial Prentice Hall. Cuarta edición, España. Páginas 286.
- [51] Wedepohl, K. (1995): The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 59, No 7. pp 1217-1232.

[52] Tessier, A., Campbell, P. G. C. y Bisson, M. (1979): Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Université du Québec, INRS-Eau, , Sainte-Foy, Québec G1, Canada.

[53] Urbani, Franco (2002): El río Miguelena de Camurí Grande, estado Vargas: Una ventana a la geología de la Cordillera de la Costa. Guía de Excursiones Geológicas No. 02-1, Universidad Central de Venezuela (UCV) y FUNVISIS. Ediciones Sociedad Venezolana de Geólogos. Enlace: http://www.pdv.com/lexico/excursio/2002_vargas_urbani.pdf (Consultado el 16 de octubre de 2012).

[54] Alvarado, A. (1985): El origen de los suelos. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza. Editorial CATIE. Páginas 58.

[55] <http://www.minamb.gob.ve> (Consultado el 20 de octubre de 2012)

[56] Turekian K., Wedepohl K. (1961). Geological Society of America Bulletin. Páginas 17.

11. APÉNDICE

Apéndice 1.

Ubicación de los puntos de muestreo

Tabla 1. Coordenadas geográficas de cada una de las estaciones de muestreo, período Marzo 2010

Fecha de muestreo	Nº puntos	Nomenclatura	Nombre de los puntos	Laguna Interna	Coordenadas G.
02-mar	11	PNLT 12	Laguna Grande	Laguna Grande	N: 10°13'32.1" W: 65°47'59.2"
03-mar	12	PNLT 13	Manatí	Laguna Grande	N: 10°14'28.2" W: 65°47'16.5"
03-mar	13	PNLT 14	Marapatá	El Cazote	N: 10°13'21.0" W: 65°45'08.4"
03-mar	15	PNLT 16	Club Miami	Laguna Arena	N: 10°16'46.50" W: 65°49'06.9"
03-mar	17	PNLT 18	Túnel del Amor	Laguna Arena	N:10°17'05.70" W: 65°51'01.1"

Tabla 2. Coordenadas geográficas de cada una de las estaciones de muestreo, período Marzo 2011

Fecha de muestreo	N° puntos	Nomenclatura	Nombre de los puntos	Laguna Interna	Coordenadas G.
02-marzo	9	PNLT 10	Caño San Nicolás	Laguna Grande	N: 10°13'42.0"
					W:65°49'11.6"
02-marzo	10	PNLT 11	Caño San Ignacio	Laguna Grande	N: 10°13'31.3"
					W:65°48'14.6"
02-marzo	11	PNLT 12	Laguna grande	Laguna Grande	N: 10°13'51.7"
					W:65°47'59.8"
03-marzo	12	PNLT 13	Manatí	Laguna Grande	N: 10°14'21.7"
					W:65°47'23.2"
03-marzo	13	PNLT 14	Marapatá	El Cazote	N: 10°13'03.8"
					W:65°45'33.8"
03-marzo	15	PNLT 16	Club Miami	Laguna Arena	N: 10°16'19.4"
					W:65°49'31.3"
03-marzo	17	PNLT 18	Túnel del Amor	Laguna Arena	N: 10°16'53.4"
					W:65°51'03.0"

Tabla 3. Coordenadas geográficas de cada una de las estaciones de muestreo, período Agosto 2011

Fecha de muestreo	N° puntos	Nomenclatura	Nombre de los puntos	Laguna Interna	Coordenadas G.
03 Agosto	9	PNLT 10	Caño San Nicolás	Laguna Grande	N: 10°13'38.0"
					W:65°49'10.0"
03 Agosto	10	PNLT 11	Caño San Ignacio	Laguna Grande	N: 10°13'28.0"
					W:65°48'12.0"
03 Agosto	11	PNLT 12	Laguna Grande	Laguna Grande	N: 10°13'50.0"
					W:65°48'40.0"
03 Agosto	12	PNLT 13	Manatí	Laguna Grande	N: 10°14'21.0"
					W:65°47'24.0"
03 Agosto	13	PNLT 14	Marapatá	El Cazote	N: 10°13'06.0"
					W:65°43'34.0"
03 Agosto	15	PNLT 16	Club Miami	Laguna Arena	N: 10°16'21.0"
					W:65°49'32.0"
03 Agosto	17	PNLT 18	Túnel del Amor	Laguna Arena	N: 10°16'55.0"
					W:65°51'14.0"

Apéndice 2.

Concentración de los patrones y curvas de
calibración

Tabla 4. Valores de Absorbancia e intensidad y concentración de los patrones utilizados para las curvas de calibración para los elementos Al, Cd, Ca y Pb

Elemento	Para extracto (s) HNO _{3(c)} y HCl 1M	Elemento	Para extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento	Para extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento	Para extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total
Al		Cd		Ca		Pb	
Concentración (mg/L)	Absorbancia	Concentración mg/L)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	Aborbancia	Concentración (mg/L)	Absorbancia
15,625	0,007	0,312	0,067	1	0,036	0,312	0,002
31,25	0,015	0,625	0,139	2	0,071	0,625	0,008
62,5	0,028	1,25	0,278	3	0,105	1,25	0,01
125	0,055	2,5	0,529	5	0,159	2,5	0,022
250	0,109	5	0,94	10	0,309	5	0,041
300	0,147						
400	0,194						
Elemento Al	Para extracto (s) total						
Concentración mg/L)	Absorbancia						
62,5	0,028						
125	0,051						
250	0,103						
300	0,127						
400	0,17						
500	0,217						

$$\text{Total} = \text{HCl}_{(c)} + \text{HNO}_{3(c)} + \text{HF}_{(c)}$$

Tabla 5. Valores de Absorbancia e intensidad y concentración de los patrones utilizados para las curvas de calibración para los elementos Co, Cr, Cu y Ni

Elemento Co	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento Cr	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento Cu	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento Ni	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total
Concentración mg/L)	Absorbancia	Concentración mg/L)	Absorbancia	Concentración mg/L)	Absorbancia	Concentración mg/L)	Absorbancia
0,312	0,012	0,625	0,004	0,312	0,013	0,312	0,011
0,625	0,025	1,25	0,006	0,625	0,025	0,625	0,021
1,25	0,046	2,5	0,01	1,25	0,051	1,25	0,042
2,5	0,085	5	0,02	2,5	0,101	2,5	0,081
5	0,161	10	0,039	5	0,193	5	0,156

Total = HCl_(c) + HNO_{3(c)} + HF_(c)

Tabla 6. Valores de Absorbancia e intensidad y concentración de los patrones utilizados para las curvas de calibración para los elementos Mg, Mn, Na y Zn

Elemento Mg	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento Mn	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento Na	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento Zn	Extracto (s) HCl 1M y HNO _{3(c)}
Concentración (mg/L)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	Intensidad	Concentración (mg/L)	Absorbancia
1	0,096	0,625	0,037	1	8589	0,625	0,023
2	0,195	1,25	0,069	2	15508	1,25	0,049
3	0,294	2,5	0,131	3	21609	2,5	0,097
4	0,382	5	0,259	4	26808	5	0,187
5	0,478	10	0,503	5	32207	10	0,361
				Elemento Na	Extracto (s) total	Elemento Zn	Extracto (s) total
				Concentración (mg/L)	Intensidad	Concentración (mg/L)	Absorbancia
				0,5	9010	0,0625	0,07
				1	18657	0,625	0,156
				2	33305	1,25	0,289
						2,5	0,562
						5	0,961

Total = HCl_(c) + HNO_{3(c)} + HF_(c)

Tabla 7. Valores de Absorbancia e intensidad y concentración de los patrones utilizados para las curvas de calibración para los elementos Fe y K

Elemento Fe	Extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total	Elemento K	Para extracto (s) HCl 1M, HNO _{3(c)} y total
Concentración (mg/L)	Absorbancia	Concentración (mg/L)	Intensidad
7,812	0,041	1	4233
15,625	0,079	2	9444
31,25	0,152	3	15336
62,5	0,287	4	21445
125	0,516	5	27238

$$\text{Total} = \text{HCl}_{(c)} + \text{HNO}_{3(c)} + \text{HF}_{(c)}$$

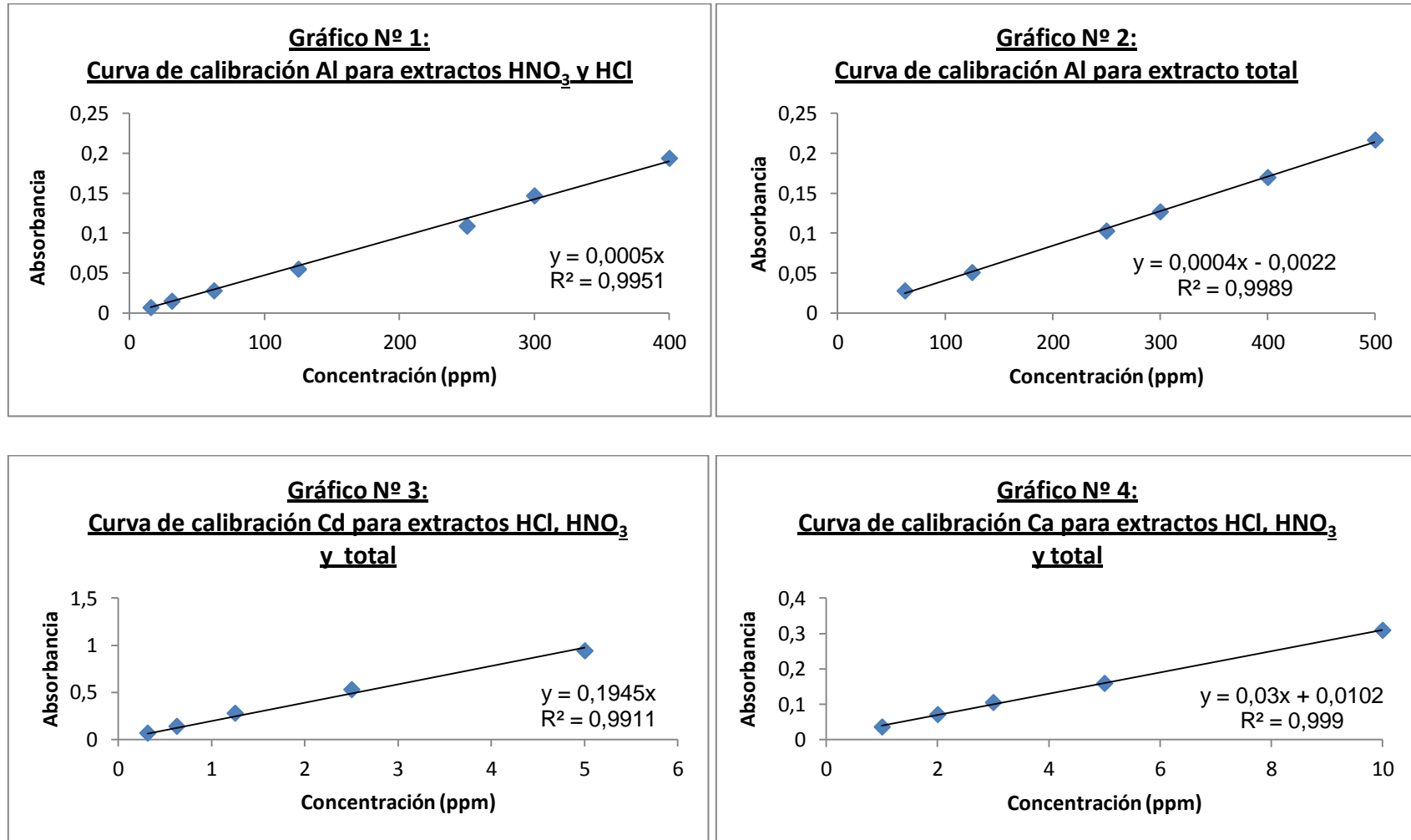


Figura 1. Curvas de calibración de Al, Cd y Ca

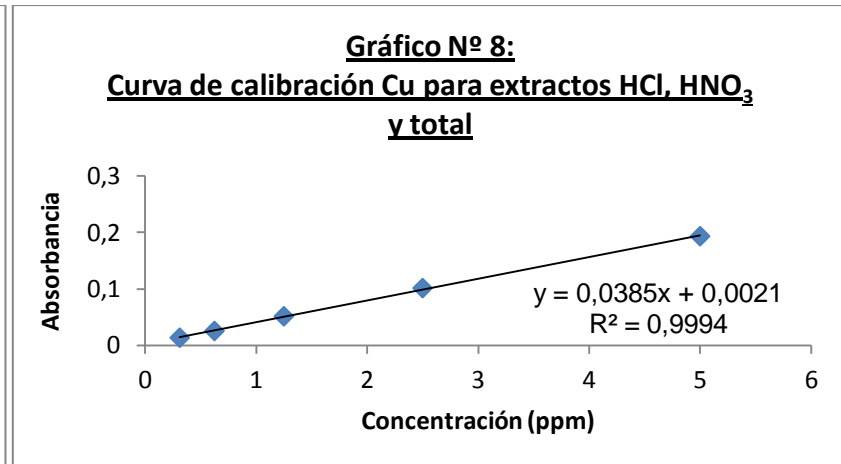
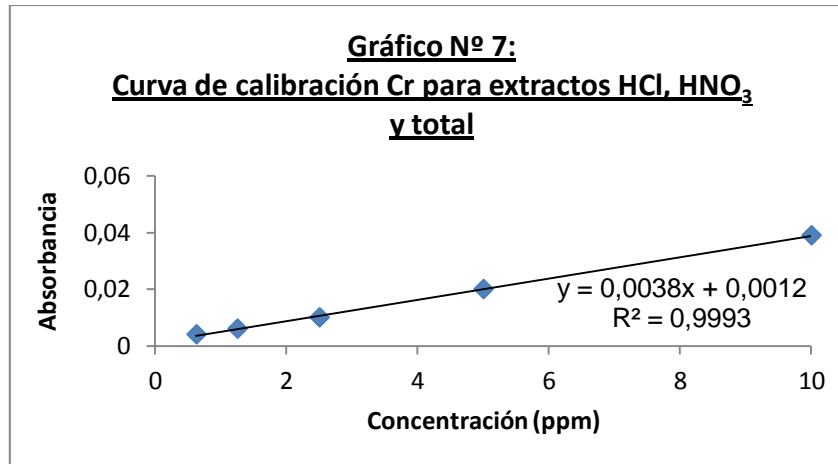
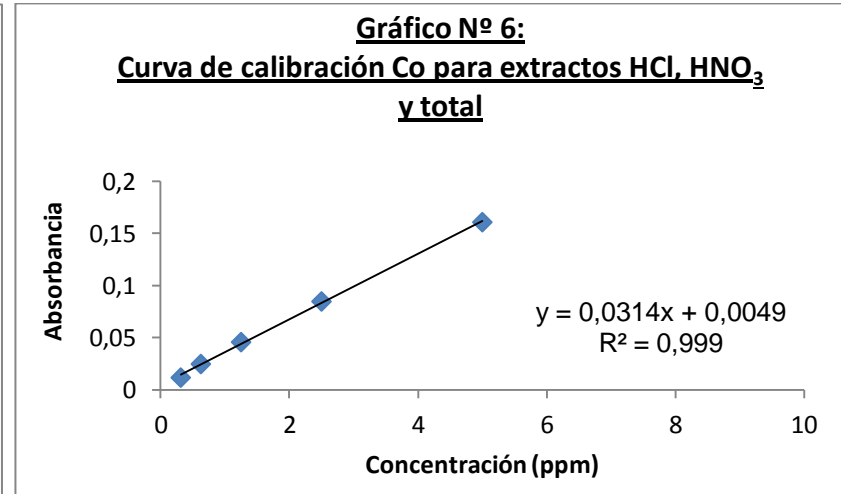
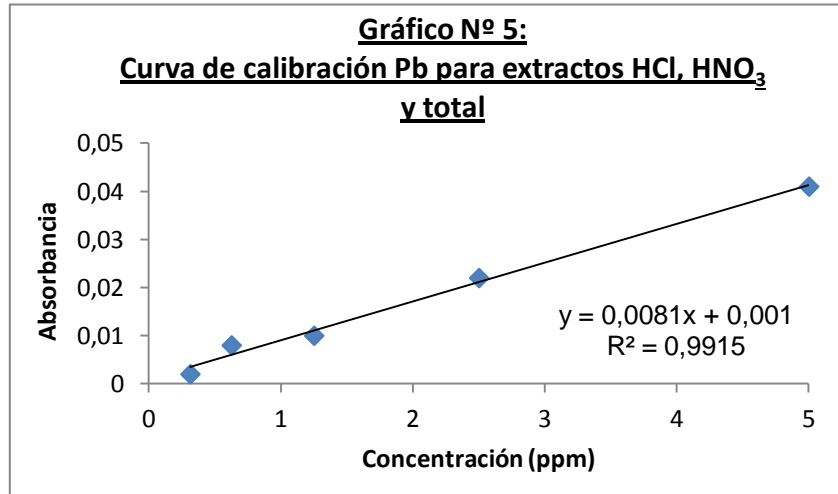


Figura 2. Curvas de calibración de Co, Cr, Cu y Pb

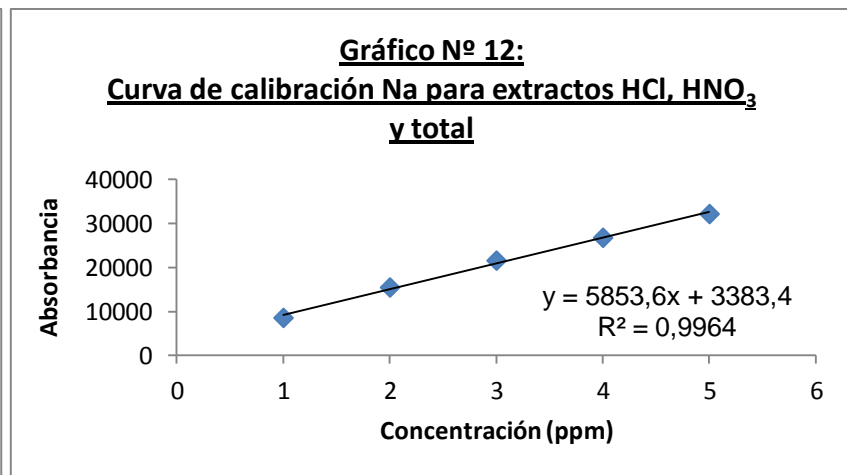
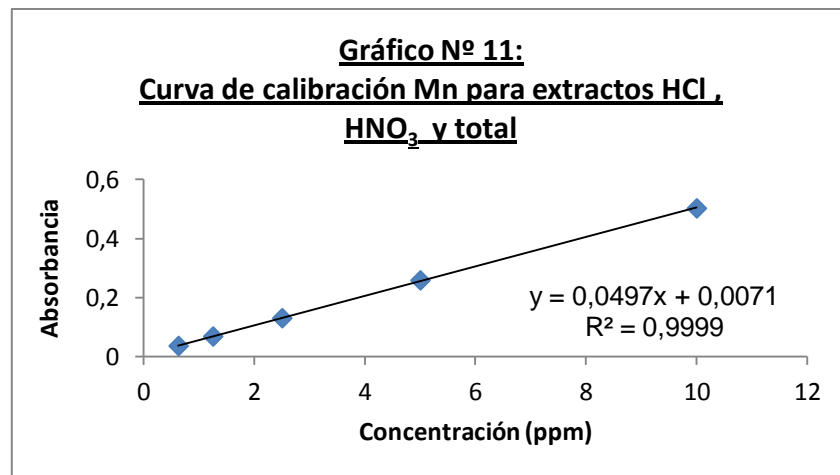
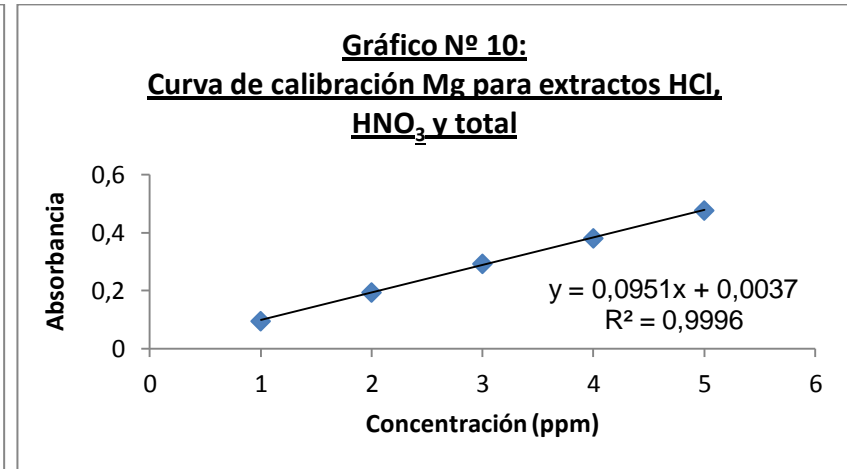
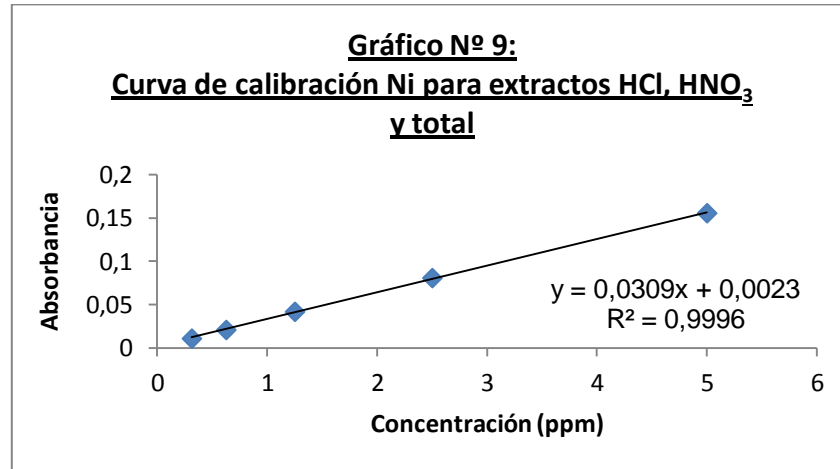


Figura 3. Curvas de calibración de Ni, Mg, Mn y Na

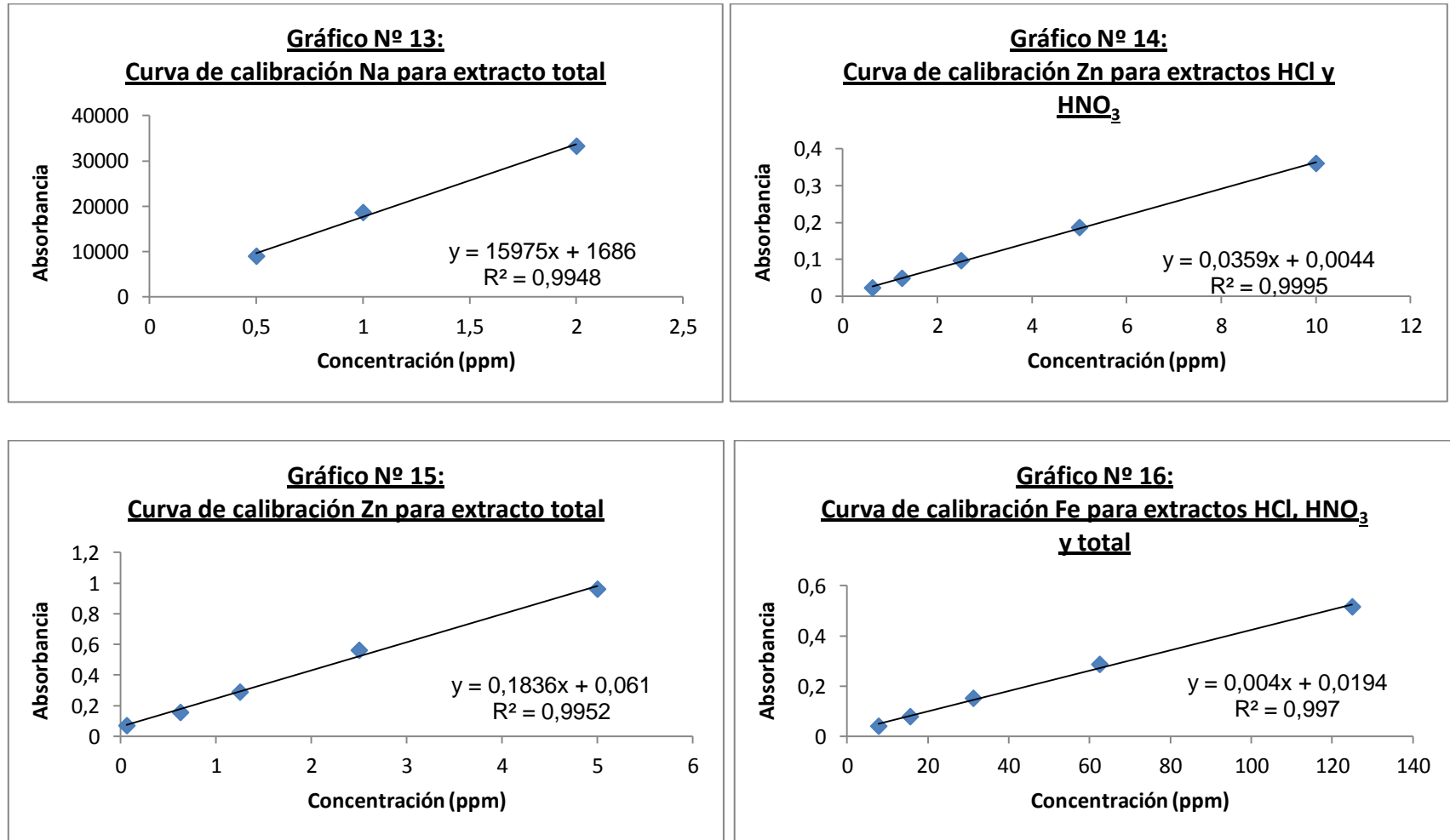


Figura 4. Curvas de calibración de Na, Zn y Fe

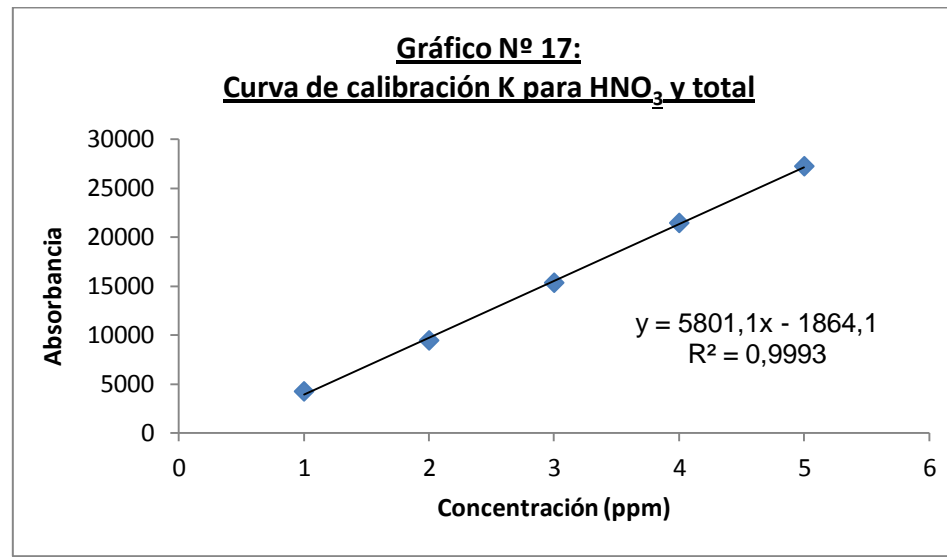


Figura 5. Curva de calibración de K

Apéndice 3.

Parámetros fisicoquímicos medidos a la
columna de agua

Tabla 8. Resultados de temperatura, pH, turbidez, salinidad, conductividad y profundidad de la columna de agua en el período Marzo 2010

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	Temperatura °C ± 0,01	pH	O ₂ (mg/L)	Turbidez	Salinidad (‰ ± 0,01)	Conductividad (mg/cm)	Profundidad (cm)
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	----	----	----	----	----	----	----
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	28,3	7,5	4,5	70	1,5	18870	112
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	30,2	8,3	5,5	52	2,4	41200	168
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	30,7	8,1	6,6	96	1,8	28740	96
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	31,5	8,3	8,8	72	1,6	26870	94

Tabla 9. Resultados de temperatura, pH, turbidez, salinidad, conductividad y profundidad de la columna de agua en los períodos Marzo y Agosto 2011.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	Temperatura (°C ± 0,01)	pH	Turbidez	Salinidad (‰ ± 0,01)	Conductividad (µs/cm)	Profundidad (cm)
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	31,5	7,7	15,1	0,55	11040	11
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	29,2	8,3	11,9	1,93	29050	14
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	29,2	8,3	10,0	2,01	32720	25
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	27,8	7,3	21,2	1,80	27192	44
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	29,8	8,5	11,1	1,50	25052	74
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	31,2	8,2	8,3	1,73	28620	49
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	30,2	8,2	33,6	1,66	18726	37
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	32,5	5,4	15,1	0,33	6060	76
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	33,6	5,8	35,6	1,56	25540	13
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	33,0	5,3	10,4	1,59	25760	23
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	31,9	5,8	20,9	1,46	25010	96
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	32,6	5,8	72,0	1,38	22630	99
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	30,2	3,9	9,2	1,85	30060	58
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	31,2	5,6	4,8	1,98	31500	97

Apéndice 4.

Características físicas de los sedimentos de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua.

Tabla 10. Descripción física de las muestras de sedimentos de fondo del período Marzo 2010

Nº puntos	Nomenclatura	Nombre del punto	Laguna Interna	Característica	
11	PNLT 12	Laguna Grande	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
12	PNLT 13	Manatí	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Desagradable	Olor
13	PNLT 14	Marapatá	El Cazote	Marrón ligeramente oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
15	PNLT 16	Club Miami	Laguna Arena	Marrón oscuro	Color
				Desagradable	Olor
17	PNLT 18	Túnel del Amor	Laguna Arena	Marrón oscuro	Color
				Desagradable y putrefacto	Olor

Tabla 11. Descripción física de las muestras de sedimentos de fondo del período Marzo 2011

Nº puntos	Nomenclatura	Nombre del punto	Laguna Interna	Característica	
9	PNLT 10	Caño San Nicolás	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
10	PNLT 11	Caño San Ignacio	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
11	PNLT 12	Laguna Grande	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
12	PNLT 13	Manatí	Laguna Grande	Marrón ligeramente claro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
13	PNLT 14	Marapatá	El Cazote	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
15	PNLT 16	Club Miami	Laguna Arena	Marrón ligeramente claro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
17	PNLT 18	Túnel del Amor	Laguna Arena	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor

Tabla 12. Descripción física de las muestras de sedimentos de fondo del período Agosto 2011

Nº puntos	Nomenclatura	Nombre del punto	Laguna Interna	Característica	
9	PNLT 10	Caño San Nicolás	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
10	PNLT 11	Caño San Ignacio	Laguna Grande	Marrón ligeramente claro	Color
				Desagradable	Olor
11	PNLT 12	Laguna Grande	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
12	PNLT 13	Manatí	Laguna Grande	Marrón oscuro	Color
				Desagradable	Olor
13	PNLT 14	Marapatá	El Cazote	Marrón oscuro	Color
				Sin olor desagradable	Olor
15	PNLT 16	Club Miami	Laguna Arena	Marrón oscuro	Color
				Desagradable	Olor
17	PNLT 18	Túnel del Amor	Laguna Arena	Marrón oscuro	Color
				Desagradable	Olor

Tabla 13. Porcentaje y pesos de fracción > 63 µm (arena) y < 63 µm (lodo) en los períodos Marzo 2010

Nº punto	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	Peso (± 0,1)g		% Lodo (< 63µm)	%Arena (>63µm)
				>63 µm	<63 µm		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	88,1	15,2	14,71	85,29
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	59,5	26,6	30,89	69,11
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	6,3	128,2	95,32	4,68
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	138,1	22,8	14,17	85,83
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	4,9	57,7	92,17	7,83

Tabla 14. Porcentaje y pesos de fracción > 63 µm (arena) y < 63 µm (lodo) en los períodos Marzo 2011

Nº punto	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	Peso (± 0,1)g		% Lodo (< 63µm)	%Arena (>63µm)
				>63 µm	<63 µm		
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	64,8	18,8	22,49	77,51
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	153,7	141,6	47,95	52,05
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	10,4	70	87,06	12,94
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	33,6	45,5	57,52	42,48
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	28,5	50	63,69	36,31
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	84,1	106,2	55,81	44,19
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	44,7	72,2	61,76	38,24

Tabla 15. Porcentaje y pesos de fracción > 63 µm (arena) y < 63 µm (lodo) en el período Agosto 2011

Nº punto	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	Peso ($\pm 0,1$)g		% Lodo (< 63µm)	%Arena (>63µm)
				>63 µm	<63 µm		
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	109,9	54,9	33,3	66,7
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	899,2	284,6	24,0	76,0
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	110,5	143,3	56,5	43,5
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	110,5	73,3	39,9	60,1
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	93,3	126,8	57,6	42,4
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	436,7	39,2	8,2	91,8
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	87,6	191,7	68,6	31,4

Apéndice 5.

Concentración de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn en los extractos de HCl 1M, HNO_{3(c)} y total

Tabla 16. Valores de concentración de Al y Co en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio, extraídos con HCl 1M, $\text{HNO}_3(\text{c})$ y $\text{HF}(\text{c})$ y agua regia.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total
				Al ($\mu\text{g/g}$)			Co ($\mu\text{g/g}$)		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	4358	19416	142757	12	9	N.D.
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	3451	12683	168317	12	9	N.D.
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	5779	41306	135369	11	11	N.D.
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	4787	15731	156866	8	6	N.D.
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	4294	13534	104160	8	11	N.D.
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	3846	2999	179996	17	10	N.D.
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	3159	13779	62275	12	8	N.D.
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	4568	13821	26077	14	8	N.D.
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	3599	25425	30637	11	9	N.D.
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	4511	14689	50230	8	8	N.D.
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	2851	15879	154412	10	6	N.D.
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	5370	13850	134475	13	7	N.D.
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	3342	13110	176116	16	16	N.D.
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	4315	19737	131727	16	10	N.D.
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	3596	15479	127287	12	9	N.D.
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	4420	11094	130890	11	7	N.D.
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	4564	9086	161719	9	10	N.D.
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	3514	12362	129853	7	10	N.D.
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	2970	14982	60956	9	9	N.D.

Tabla 17. Valores de concentración de Zn y Cu en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio, extraídos con HCl 1M, $\text{HNO}_3(c)$ y $\text{HF}(c)$ y agua regia.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	HCl 1M	$\text{HNO}_3(c)$	total	HCl 1M	$\text{HNO}_3(c)$	total
				Zn ($\mu\text{g/g}$)			Cu ($\mu\text{g/g}$)		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	59	36	N.D.	40	38	N.D.
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	47	29	N.D.	23	31	N.D.
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	79	72	N.D.	24	32	N.D.
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	71	21	N.D.	5	20	N.D.
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	63	43	N.D.	4	41	N.D.
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	70	11	N.D.	N.D.	50	N.D.
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	44	31	N.D.	28	17	N.D.
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	65	28	N.D.	23	29	N.D.
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	58	58	N.D.	32	28	N.D.
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	78	27	N.D.	10	33	N.D.
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	64	32	N.D.	14	23	N.D.
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	82	31	N.D.	23	26	N.D.
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	67	27	N.D.	N.D.	58	N.D.
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	54	60	N.D.	35	43	N.D.
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	53	38	N.D.	9	42	N.D.
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	65	28	N.D.	5	42	N.D.
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	74	32	N.D.	N.D.	41	N.D.
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	49	51	N.D.	5	37	N.D.
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	56	46	N.D.	5	35	N.D.

Tabla 18. Valores de concentración de Ni y Mn en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio, extraídos con HCl 1M, $\text{HNO}_3(\text{c})$ y $\text{HF}(\text{c})$ y agua regia.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total
				Ni ($\mu\text{g/g}$)			Mn ($\mu\text{g/g}$)		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	25	27	83	124	166	N.D.
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	26	31	93	165	200	N.D.
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	28	44	62	217	299	N.D.
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	24	22	87	136	58	N.D.
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	19	34	68	162	246	N.D.
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	31	17	104	278	180	N.D.
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	21	26	44	155	88	N.D.
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	31	26	48	184	168	N.D.
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	27	39	N.D.	173	131	N.D.
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	32	26	N.D.	437	208	N.D.
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	19	28	63	271	110	N.D.
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	33	27	61	357	179	N.D.
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	27	30	117	245	294	N.D.
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	28	40	N.D.	220	182	N.D.
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	22	34	62	235	216	N.D.
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	22	27	66	206	145	N.D.
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	26	31	90	325	324	N.D.
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	15	39	67	169	210	N.D.
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	18	34	51	219	127	N.D.

Tabla 19. Valores de concentración de Mg y K en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio, extraídos con HCl 1M, $\text{HNO}_3(\text{c})$ y $\text{HF}(\text{c})$ y agua regia.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total
				Mg ($\mu\text{g/g}$)			K ($\mu\text{g/g}$)		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	2118	1471	834	2196	1519	28012
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	6045	1238	3318	1961	1248	31744
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	5831	2334	2594	1268	4106	31570
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	6454	1298	3004	1462	1298	32163
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	6517	2077	1512	1453	1341	23323
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	7433	280	4877	1545	541	26299
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	3719	1680	1505	706	832	9567
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	5924	1663	787	1418	941	14438
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	4398	2082	306	1236	2182	17204
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	8325	1513	130	1329	1703	18711
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	5198	1445	6491	998	1824	29862
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	5675	1384	2714	1370	1575	26907
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	5221	1044	4852	734	1144	27824
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	4249	2799	910	948	2126	27720
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	7233	1839	3958	1840	1137	21596
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	5414	1336	3231	1461	918	22680
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	8205	1489	2827	1495	1377	34607
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	5598	2501	4074	1436	1481	29343
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	6032	2181	228	1527	1500	16634

Tabla 20. Valores de concentración de Ca y Na en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio, extraídos con HCl 1M, $\text{HNO}_{3(c)}$ y $\text{HF}_{(c)}$ y agua regia.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	HCl 1M	$\text{HNO}_{3(c)}$	total	HCl 1M	$\text{HNO}_{3(c)}$	total
				Ca ($\mu\text{g/g}$)			Na ($\mu\text{g/g}$)		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	123	17	N.D.	1060	119	8209
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	223	15	N.D.	19999	1055	12315
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	29	N.D.	N.D.	5363	993	6414
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	69	10	N.D.	10603	2177	6547
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	43	14	N.D.	10517	1357	6092
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	1851	N.D.	N.D.	13485	165	11748
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	240	18	N.D.	1489	191	14385
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	167	16	N.D.	9392	1031	3988
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	997	12	N.D.	10278	1396	2688
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	4839	49	N.D.	9813	1279	2536
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	189	4	N.D.	5426	256	7412
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	211	11	N.D.	8357	882	6888
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	2291	N.D.	N.D.	8152	530	11758
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	225	22	N.D.	3195	1882	6218
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	1072	11	N.D.	17523	405	9875
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	197	8	N.D.	10876	648	7735
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	6485	37	N.D.	10524	1088	5152
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	1572	21	N.D.	10864	1600	5240
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	3138	14	N.D.	12806	893	5780

Tabla 21. Valores de concentración de Fe y Cr en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio, extraídos con HCl 1M, $\text{HNO}_3(\text{c})$ y $\text{HF}(\text{c})$ y agua regia.

Nº puntos	Nomenclatura	Muestra	Nombre del punto	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total	HCl 1M	$\text{HNO}_3(\text{c})$	total
				Fe ($\mu\text{g/g}$)			Cr ($\mu\text{g/g}$)		
11	PNLT 12	11-M2010	Laguna Grande	48461	926	12834	N.D.	42	N.D.
12	PNLT 13	12-M2010	Manatí	19920	723	12607	N.D.	17	N.D.
13	PNLT 14	13-M2010	Marapatá	20263	992	8117	N.D.	62	N.D.
15	PNLT 16	15-M2010	Club Miami	11967	428	10770	N.D.	18	N.D.
17	PNLT 18	17-M2010	Túnel del Amor	12675	976	9705	N.D.	15	N.D.
9	PNLT 10	9-M2011	Caño San Nicolás	55943	1283	21513	N.D.	11	N.D.
10	PNLT 11	10-M2011	Caño San Ignacio	11958	783	5575	N.D.	20	N.D.
11	PNLT 12	11-M2011	Laguna Grande	24015	849	6500	N.D.	17	N.D.
12	PNLT 13	12-M2011	Manatí	20582	763	4132	N.D.	38	N.D.
13	PNLT 14	13-M2011	Marapatá	23843	622	5863	N.D.	N.D.	N.D.
15	PNLT 16	15-M2011	Club Miami	22279	542	11571	N.D.	N.D.	N.D.
17	PNLT 18	17-M2011	Túnel del Amor	28020	694	10624	N.D.	N.D.	N.D.
9	PNLT 10	9-A2011	Caño San Nicolás	42493	2048	18318	N.D.	38	N.D.
10	PNLT 11	10-A2011	Caño San Ignacio	16466	994	11269	N.D.	50	N.D.
11	PNLT 12	11-A2011	Laguna Grande	19012	1074	14045	N.D.	55	N.D.
12	PNLT 13	12-A2011	Manatí	21637	709	14033	N.D.	32	N.D.
13	PNLT 14	13-A2011	Marapatá	16735	921	13383	N.D.	42	N.D.
15	PNLT 16	15-A2011	Club Miami	13355	933	11082	N.D.	33	N.D.
17	PNLT 18	17-A2011	Túnel del Amor	19592	891	8550	N.D.	38	N.D.

Apéndice 6.

Concentración total de los elementos Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb y Zn en los sedimentos de fondo del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua

Tabla 22. Valores de concentración total de los elementos mayoritarios en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio.

Muestra	Nomenclatura	Al ($\mu\text{g/g}$)	Na ($\mu\text{g/g}$)	Fe ($\mu\text{g/g}$)	Ca ($\mu\text{g/g}$)	K ($\mu\text{g/g}$)	Mg ($\mu\text{g/g}$)
11-M2010	PNLT 12	166532	9388	62222	140	31727	4423
12-M2010	PNLT 13	184451	33369	33250	238	34953	10601
13-M2010	PNLT 14	182454	12770	29372	29	36945	10758
15-M2010	PNLT 16	177385	19327	23165	78	34924	10756
17-M2010	PNLT 18	121988	17966	23356	57	26117	10107
9-M2011	PNLT 10	186841	25399	78740	1851	28384	12590
10-M2011	PNLT 11	79213	16064	18315	258	11105	6904
11-M2011	PNLT 12	44465	14410	31364	183	16797	8374
12-M2011	PNLT 13	59660	14362	25477	1009	20622	6785
13-M2011	PNLT 14	69430	13629	30328	4887	21742	9969
15-M2011	PNLT 16	173142	13094	34392	193	32685	13133
17-M2011	PNLT 18	153695	16128	39338	221	29851	9773
9-A2011	PNLT 10	192569	20440	62860	2291	29702	11116
10-A2011	PNLT 11	155779	11294	28729	247	30794	7958
11-A2011	PNLT 12	146362	27803	34131	1083	24573	13030
12-A2011	PNLT 13	146403	19259	36379	206	25060	9981
13-A2011	PNLT 14	175369	16764	31039	6522	37478	12522
15-A2011	PNLT 16	145728	17703	25369	1593	32259	12173
17-A2011	PNLT 18	78908	19478	29032	3152	19660	8440

Tabla 23. Valores de concentración total de los elementos traza en $\mu\text{g/g}$ en los sedimentos de fondo de Laguna Grande, El Cazote y Laguna Arena del Complejo Lagunar Laguna de Tacarigua en los períodos de estudio.

Muestra	Nomenclatura	Mn ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)
11-M2010	PNLT 12	290	94	135	21	78	42
12-M2010	PNLT 13	365	76	150	21	54	17
13-M2010	PNLT 14	516	151	135	22	56	62
15-M2010	PNLT 16	194	92	132	13	24	18
17-M2010	PNLT 18	409	106	121	18	45	15
9-M2011	PNLT 10	458	81	152	27	50	11
10-M2011	PNLT 11	243	75	91	20	45	20
11-M2011	PNLT 12	352	93	106	22	52	17
12-M2011	PNLT 13	305	116	66	20	61	38
13-M2011	PNLT 14	644	105	58	16	42	0
15-M2011	PNLT 16	381	97	109	15	37	0
17-M2011	PNLT 18	536	113	121	20	49	0
9-A2011	PNLT 10	539	94	174	32	58	38
10-A2011	PNLT 11	402	114	68	26	78	50
11-A2011	PNLT 12	451	91	118	21	51	55
12-A2011	PNLT 13	351	93	116	18	47	32
13-A2011	PNLT 14	649	106	146	19	41	42
15-A2011	PNLT 16	379	100	121	18	43	33
17-A2011	PNLT 18	346	103	103	18	40	38

Apéndice 7.

Variabilidad del método

Tabla 24. Variabilidad de los elementos bajo estudio en HCl 1M mediante el tratamiento de 3 réplicas para muestra 10-M-2011.

Elemento	Promedio ($\mu\text{g/g}$)	Des. Est. (S)	L.C.	C.V. (%)	L.O.D. (mg/L)
Al	3159	791	457	25	20,12
Co	12,17	1	1	12	0,21
Zn	44	11	6	25	0,30
Cu	28	3	2	11	0,16
Ni	21	6	4	30	0,13
Mn	155	18	11	12	0,13
Mg	3719	743	429	20	0,12
K	706	60	35	9	0,14
Ca	8054	319	184	4	0,38
Na	1489	38	22	3	0,23
Fe	12114	439	253	4	9,19
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,61
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,35
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,43

L.C. = Límite de Confianza; C.V.= Coeficiente de varianza; L.O.D.= Límite de Detección; N.D. = No detecta

Tabla 25. Variabilidad de los elementos bajo estudio en HCl 1M mediante el tratamiento de 3 réplicas para muestra 17-M-2011.

Elemento	Promedio ($\mu\text{g/g}$)	Des. Est. (S)	L.C.	C.V. (%)	L.O.D. (mg/L)
Al	5370	1840	1062	34	20,12
Co	13	1	1	7	0,21
Zn	82	8	5	10	0,30
Cu	23	5	3	24	0,16
Ni	33	5	3	14	0,13
Mn	357	16	9	4	0,13
Mg	5675	330	191	6	0,12
K	1370	20	12	1	0,14
Ca	211	4	2	2	0,38
Na	8357	160	92	2	0,23
Fe	28020	1950	1126	7	9,19
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,61
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,35
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,43

L.C. = Límite de Confianza; C.V.= Coeficiente de varianza; L.O.D.= Límite de Detección; N.D. = No detecta

Tabla 26. Variabilidad de los elementos bajo estudio en HNO_3 (c) mediante el tratamiento de 3 réplicas para muestra 10-M-2011.

Elemento	Promedio ($\mu\text{g/g}$)	Des. Est. (S)	L.C.	C.V. (%)	L.O.D. (mg/L)
Al	13779	3574	2063	26	20,12
Co	8	2	1	24	0,21
Zn	31	11	7	36	0,30
Cu	17	3	2	15	0,16
Ni	26	7	4	28	0,13
Mn	88	23	13	26	0,13
Mg	1680	750	433	45	0,12
K	832	279	161	34	0,14
Ca	18	3	2	19	0,38
Na	191	41	24	22	0,23
Fe	783	120	69	15	9,19
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,61
Cr	20	7	4	32	0,35
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,43

L.C. = Límite de Confianza; C.V.= Coeficiente de varianza; L.O.D.= Límite de Detección; N.D. = No detecta

Tabla 27. Variabilidad de los elementos bajo estudio en HNO₃ (c) mediante el tratamiento de 3 réplicas para muestra 17-M-2011.

Elemento	Promedio (µg/g)	Des. Est. (S)	L.C.	C.V. (%)	L.O.D. (mg/L)
Al	13850	4378	2527	32	20,12
Co	7	1	0	12	0,21
Zn	31	10	6	31	0,30
Cu	26	5	3	20	0,16
Ni	27	4	2	16	0,13
Mn	179	12	7	7	0,13
Mg	1384	305	176	22	0,12
K	1575	557	322	35	0,14
Ca	11	2	1	20	0,38
Na	882	96	55	11	0,23
Fe	694	63	36	9	9,19
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,61
Cr	5	0	0	1	0,35
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,43

L.C. = Límite de Confianza; C.V.= Coeficiente de varianza; L.O.D.= Límite de Detección; N.D. = No detecta

Tabla 28. Variabilidad de los elementos bajo estudio en HF_(c) mediante el tratamiento de 3 réplicas para muestra 10-M-2011.

Elemento	Promedio (µg/g)	Des. Est. (S)	L.C.	C.V. (%)	L.O.D. (mg/L)
Al	52368	5763	3322	11	20,12
Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,21
Zn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,30
Cu	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,16
Ni	37	5,00	3	13	0,13
Mn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,13
Mg	1265	109	63	9	0,12
K	8054	319	184	4	0,14
Ca	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,38
Na	12114	439	253	4	0,23
Fe	4682	1247	720	27	9,19
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,61
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,35
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,43

L.C. = Límite de Confianza; C.V.= Coeficiente de varianza; L.O.D.= Límite de Detección; N.D. = No detecta

Tabla 29. Variabilidad de los elementos bajo estudio en HF_(c) mediante el tratamiento de 3 réplicas para muestra 17-M-2011.

Elemento	Promedio (µg/g)	Des. Est. (S)	L.C.	C.V. (%)	L.O.D. (mg/L)
Al	84499	12161	7021	14	20,12
Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,21
Zn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,30
Cu	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,16
Ni	38	6,00	4,00	17	0,13
Mn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,13
Mg	1716	753	435	44	0,12
K	16898	1407	812	8	0,14
Ca	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,38
Na	4338	850	491	20	0,23
Fe	6674	884	511	13	9,19
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,61
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,35
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,43

L.C. = Límite de Confianza; C.V.= Coeficiente de varianza; L.O.D.= Límite de Detección; N.D. = No detecta

Apéndice 8.

Tablas de correlaciones de los elementos de estudio

Tabla 30. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto HCl 1M para todos los períodos

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	-0,024748918	1									
Zn	0,70815222	-0,01840461	1								
Cu	0,150263614	0,249020876	-0,27012181	1							
Ni	0,565184794	0,547286553	0,587102676	0,25791347	1						
Mn	0,209334178	0,066785364	0,634266848	-0,30299615	0,492517769	1					
Mg	0,170258615	-0,23103455	0,452417283	-0,726430061	0,189102163	0,600927487	1				
K	0,16609847	-0,21770491	-0,05763414	0,036492355	-0,01137832	-0,17809197	0,11726356	1			
Ca	-0,076056977	-0,18147992	0,284932197	-0,491541304	0,117980135	0,627208428	0,599870766	-0,00493940	1		
Na	-0,190000248	-0,12321713	-0,09066509	-0,5081524	-0,03579447	0,089692726	0,645241997	0,47131839	0,206805718	1	
Fe	-0,010756418	0,620208778	0,254560242	0,006610931	0,441478078	0,169335845	-0,14038602	0,211118571	0,047600455	-0,08672200	1

Tabla 31. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto $\text{HNO}_{3(c)}$ para todos los períodos

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	0,093318022	1									
Zn	0,791644671	0,231602699	1								
Cu	-0,27236035	0,753249755	-0,06582917	1							
Ni	0,677417639	0,380133723	0,948421143	0,090407276	1						
Mn	0,136579588	0,702351202	0,235190098	0,618873604	0,401540634	1					
Mg	0,562047634	0,084411173	0,88576969	-0,16427921	0,851774891	0,076344698	1				
K	0,925138547	0,097061151	0,805243546	-0,18430087	0,711855819	0,297445142	0,560929274	1			
Ca	-0,20237569	-0,11228735	-0,04592601	-0,06160589	-0,00230381	0,184612171	0,20647589	-0,09337679	1		
Na	0,190955624	-0,09495163	0,345466054	-0,17703701	0,349168193	-0,01579423	0,498838188	0,274488537	0,315784818	1	
Fe	-0,09529236	0,930501892	-0,01070035	0,817484242	0,126918024	0,582997466	-0,16027704	-0,10404074	-0,24636046	-0,30356245	1

Tabla 32. Correlación de los elementos Al, Ni, Mg, K, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto $\text{HF}_{(c)}$ para todos los períodos

	Al	Ni	Mg	K	Na	Fe
Al	1					
Ni	0,853541391	1				
Mg	0,746070148	0,610745008	1			
K	0,850870073	0,659327634	0,535555748	1		
Na	0,482048208	0,529399812	0,468465733	0,020006727	1	
Fe	0,828211599	0,859512556	0,687327117	0,525627759	0,525868615	1

Tabla 33. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe $\mu\text{g/g}$ en el extracto HCl 1M para el período Marzo 2010

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	-0,141813546	1									
Zn	0,972575927	-0,362937737	1								
Cu	-0,040220859	0,907091334	-0,25845293	1							
Ni	0,32190455	0,749331159	0,15511253	0,608438381	1						
Mn	0,536545958	0,18676563	0,46764814	-0,069223361	0,41157648	1					
Mg	0,065693603	-0,567344986	0,21638090	-0,854625386	-0,21558568	0,46844625	1				
K	-0,684363616	0,596650805	-0,79019327	0,696035195	0,10769448	-0,64324050	-0,74893366	1			
Ca	-0,823825789	0,586359282	-0,89403877	0,407699462	0,27063795	-0,32410306	-0,20932699	0,77052872	1		
Na	-0,624339212	-0,069675232	-0,54279194	-0,429495952	-0,06839398	0,09695444	0,66633688	-0,01550302	0,58262521	1	
Fe	-0,095972298	0,660877967	-0,26511596	0,907917406	0,28703135	-0,39975427	-0,99249763	0,77461976	0,28020979	-0,61059464	1

Tabla 34. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto HCl 1M para el período Marzo 2011

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	0,1764194	1									
Zn	0,7522697	-0,0163649	1								
Cu	-0,0262582	-0,2677107	-0,4923954	1							
Ni	0,9012529	0,31995496	0,72163360	-0,2355814	1						
Mn	0,5232330	-0,3065948	0,86133390	-0,5777169	0,49245317	1					
Mg	0,4600861	0,06530238	0,75161031	-0,8120688	0,65965677	0,77698429	1				
K	0,6626333	0,44855030	0,74638940	-0,4725490	0,85269149	0,41597776	0,71605994	1			
Ca	0,2055000	-0,3412466	0,43696064	-0,5213029	0,43232525	0,69243456	0,78741536	0,32843001	1		
Na	0,4372542	0,41331840	0,60345777	-0,4975389	0,73127007	0,33017524	0,68294128	0,94357868	0,42187534	1	
Fe	0,1946476	0,71799806	0,45097134	-0,7816576	0,45273930	0,27577656	0,61021067	0,72903845	0,21040488	0,76872326	1

Tabla 35. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto HCl 1M para el período Agosto 2011

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	0,111592266	1									
Zn	0,447342587	0,144716895	1								
Cu	0,280674536	0,505517592	-0,4776709	1							
Ni	0,518125456	0,81346824	0,58665742	0,31514992	1						
Mn	0,401630849	0,107916373	0,78693753	-0,25212871	0,60961794	1					
Mg	0,126257517	-0,53539439	0,39735667	-0,56869926	-0,08896792	0,682065098	1				
K	-0,01217919	-0,74279846	-0,2144741	-0,28493624	-0,58444731	0,011221824	0,670940276	1			
Ca	0,076122061	-0,37431952	0,61631536	-0,52530113	0,095153163	0,792749832	0,739570289	0,140237628	1		
Na	-0,36814047	-0,57024256	-0,1288396	-0,57624724	-0,54110992	0,015881176	0,664659966	0,843567238	0,132822695	1	
Fe	-0,31716917	0,609049366	0,44009948	-0,33990204	0,457468296	0,149547204	-0,23311047	-0,63042671	-0,02182451	-0,14729750	1

Tabla 36. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto $\text{HNO}_3(\text{c})$ para período Marzo 2010

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	0,446601511	1									
Zn	0,883626862	0,791022005	1								
Cu	-0,02040935	0,841466102	0,373627509	1							
Ni	0,747836801	0,840107702	0,943566842	0,414940752	1						
Mn	0,567553506	0,953274262	0,866975679	0,653516803	0,955253258	1					
Mg	0,69701091	0,778597393	0,912913869	0,453513527	0,845052296	0,806376096	1				
K	0,988716851	0,503698482	0,919127796	0,005152339	0,824190873	0,64795125	0,746565669	1			
Ca	-0,86235369	-0,18005161	-0,72433913	0,356354736	-0,64902301	-0,39908368	-0,62702682	-0,89221244	1		
Na	-0,21953189	-0,58730866	-0,31435312	-0,68886346	-0,28354959	-0,43595229	-0,10575246	-0,17060056	-0,28675757	1	
Fe	0,440794527	0,975050072	0,751958782	0,886372346	0,744836975	0,874997702	0,733697381	0,466846438	-0,09094373	-0,70516001	1

Tabla 37. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto $\text{HNO}_3(\text{c})$ para período Marzo 2011

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	-0,30408865	1									
Zn	0,971913363	-0,17235257	1								
Cu	-0,61171660	0,620391796	-0,55173639	1							
Ni	0,98690574	-0,21396049	0,993651484	-0,53354830	1						
Mn	-0,34378264	0,202788737	-0,41698269	0,648792505	-0,34693242	1					
Mg	0,919028123	-0,34006347	0,852056488	-0,78886616	0,865513996	-0,38372156	1				
K	0,833665825	-0,52375517	0,772685038	-0,37259528	0,816529475	-0,04806831	0,630128814	1			
Ca	0,209971308	-0,07936018	0,036292027	-0,15663324	0,09229257	0,409794528	0,357667014	0,229261322	1		
Na	0,641376154	0,02979218	0,564941442	-0,05180574	0,628240886	0,466892583	0,589611009	0,608583843	0,556216673	1	
Fe	-0,67124764	0,850355971	-0,52247945	0,78448886	-0,56534728	0,229814932	-0,72701513	-0,73684756	-0,42732774	-0,34478998	1

Tabla 38. Correlación de los elementos Al, Co, Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, K, Ca, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto $\text{HNO}_{3(c)}$ para período Agosto 2011

	Al	Co	Zn	Cu	Ni	Mn	Mg	K	Ca	Na	Fe
Al	1										
Co	0,050863203	1									
Zn	0,709052997	-0,22074971	1								
Cu	-0,01066330	0,832661788	-0,50694509	1							
Ni	0,684886173	-0,00161637	0,945179606	-0,34760042	1						
Mn	-0,44588668	0,600139266	-0,42864205	0,540190158	-0,20455855	1					
Mg	0,658144691	-0,33149232	0,989983199	-0,60385136	0,929747532	-0,46634475	1				
K	0,675779606	-0,01415296	0,8844618	-0,26217503	0,826974747	-0,13360103	0,830406196	1			
Ca	-0,19329307	-0,39329679	0,346346801	-0,54313158	0,30325932	0,290782803	0,385964015	0,479702551	1		
Na	0,357504768	-0,14135553	0,829900853	-0,36201235	0,765816753	-0,10749486	0,805815027	0,865006623	0,592982368	1	
Fe	0,060524612	0,975233418	-0,34969908	0,897365541	-0,13988308	0,545196712	-0,45573867	-0,15328037	-0,53706021	-0,32583832	1

Tabla 39. Correlación de los elementos Al, Ni, Mg, K, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto HF_(c) para período Marzo 2010

	Al	Ni	Mg	K	Na	Fe
Al	1					
Ni	0,807633688	1				
Mg	0,624632356	0,327808666	1			
K	0,861929676	0,418075257	0,747954438	1		
Na	0,688962187	0,723769517	0,376042391	0,357205494	1	
Fe	0,555485432	0,872141224	-0,130858174	0,072369045	0,708967094	1

Tabla 40. Correlación de los elementos Al, Ni, Mg, K, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto HF_(c) para período Marzo 2011

	Al	Ni	Mg	K	Na	Fe
Al	1					
Ni	0,866656029	1				
Mg	0,904644273	0,745424185	1			
K	0,834990212	0,60888257	0,779651917	1		
Na	0,500546278	0,542153472	0,46039307	-0,046875514	1	
Fe	0,887479549	0,987497992	0,753896657	0,676751914	0,470335759	1

Tabla 41. Correlación de los elementos Al, Ni, Mg, K, Na y Fe en $\mu\text{g/g}$ en el extracto HF_(c) para período Agosto 2011

	Al	Ni	Mg	K	Na	Fe
Al	1					
Ni	0,797068368	1				
Mg	0,715819569	0,671624005	1			
K	0,79102119	0,536864866	0,374163085	1		
Na	0,420730866	0,547068078	0,594912287	-0,19373644	1	
Fe	0,834746354	0,840945773	0,7868537	0,340291162	0,819614342	1

Apéndice 9.

Cajas gráficas de los elementos en estudio para cada extracto obtenido y período muestreado

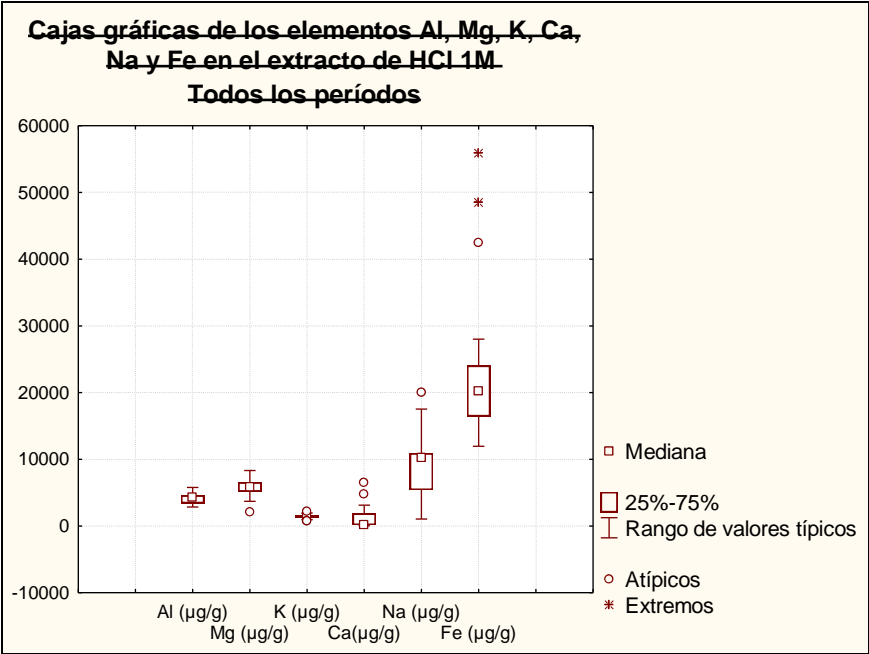


Figura 6. Cajas gráficas de los elementos mayoritarios en el extracto HCl 1M para todos los períodos de muestreo.

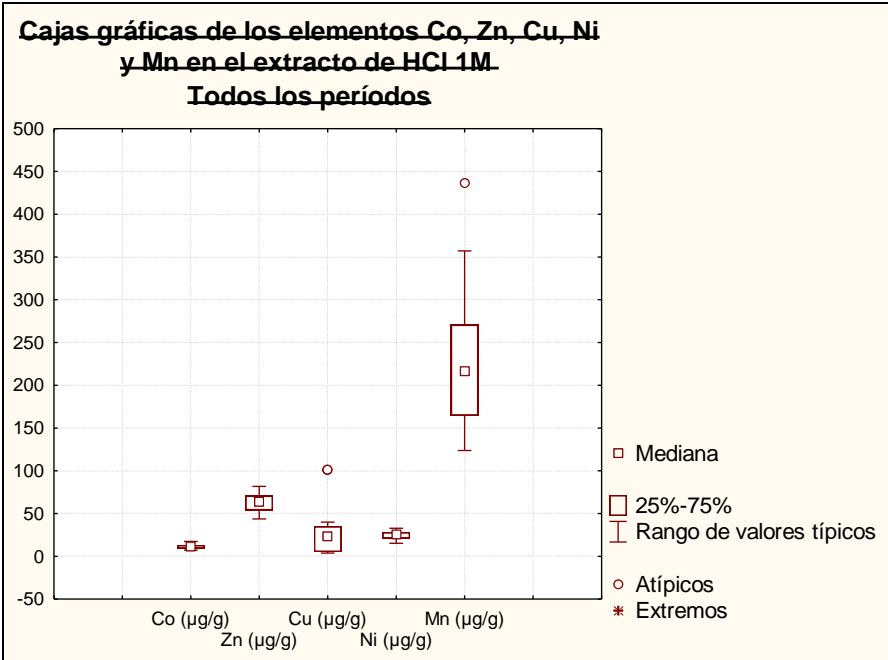


Figura 7. Cajas gráficas de los elementos traza en el extracto HCl 1M para todos los períodos de muestreo.

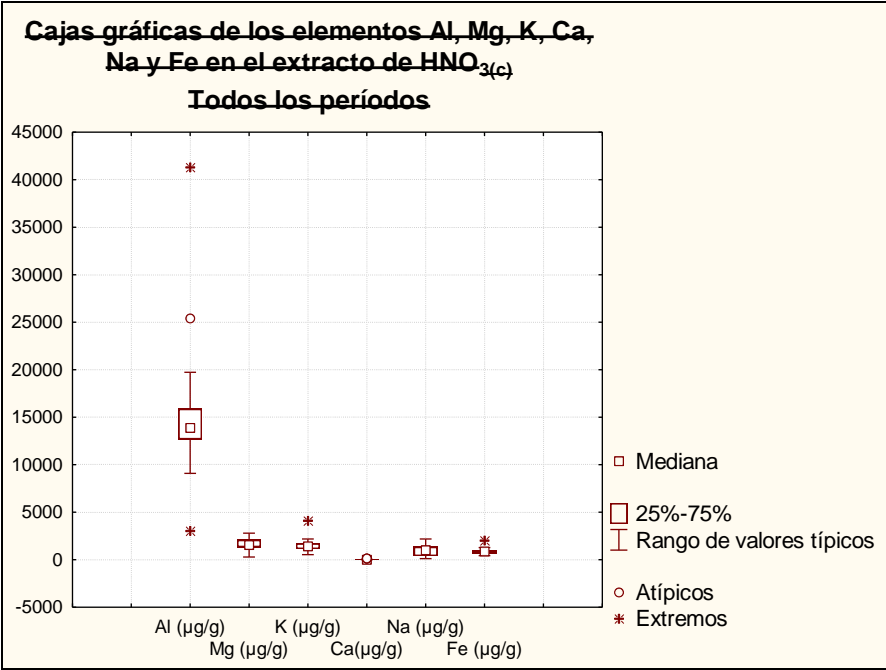


Figura 8. Cajas gráficas de los elementos mayoritarios en el extracto HNO_{3(c)} para todos los períodos de muestreo.

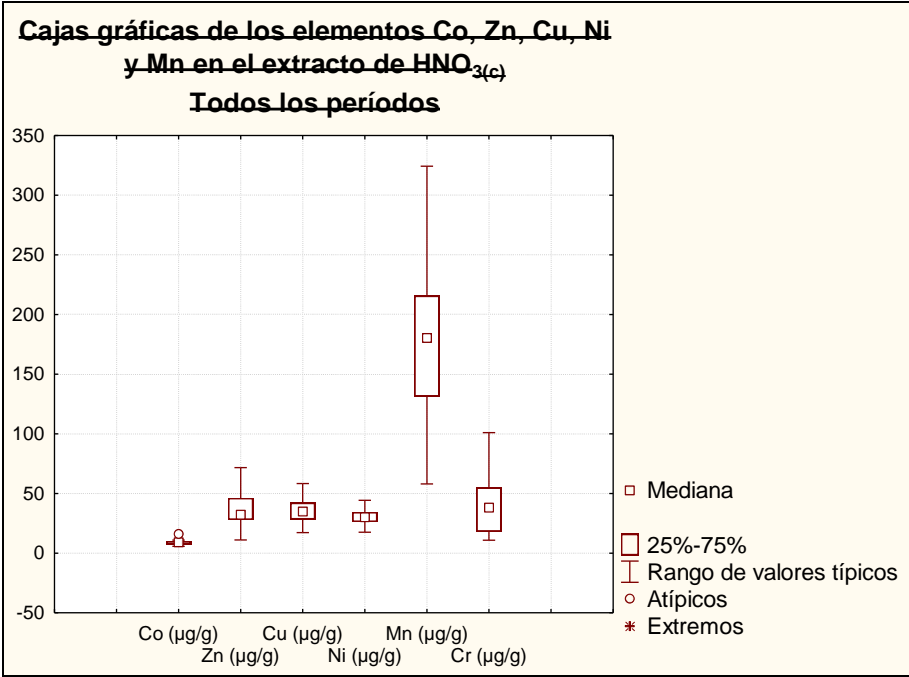


Figura 9. Cajas gráficas de los elementos traza en el extracto HNO_{3(c)} para todos los períodos de muestreo.

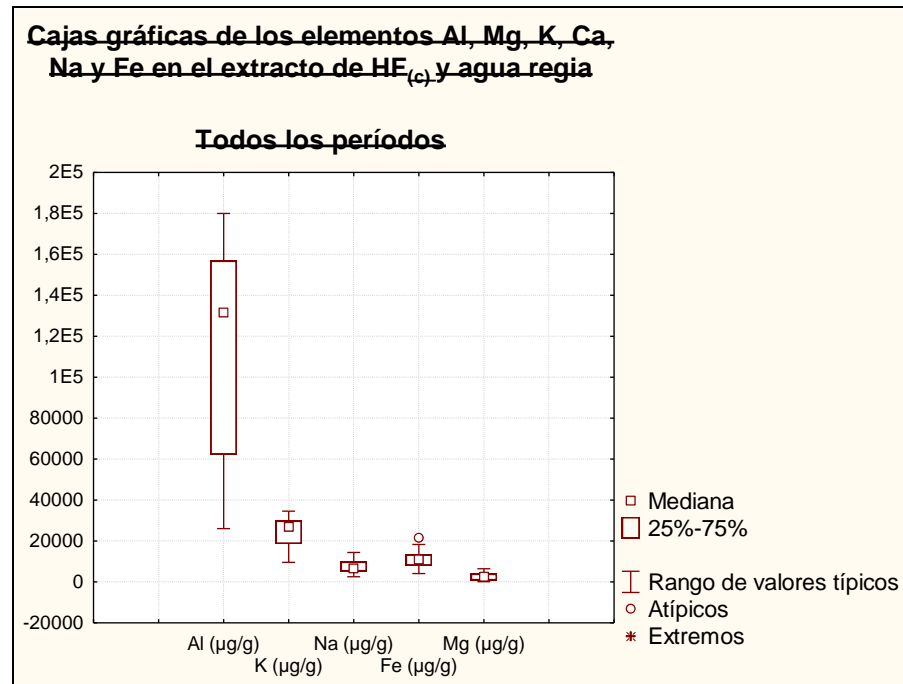


Figura 10. Cajas gráficas de los elementos mayoritarios en el extracto HF_(c) y agua regia para todos los períodos de muestreo.

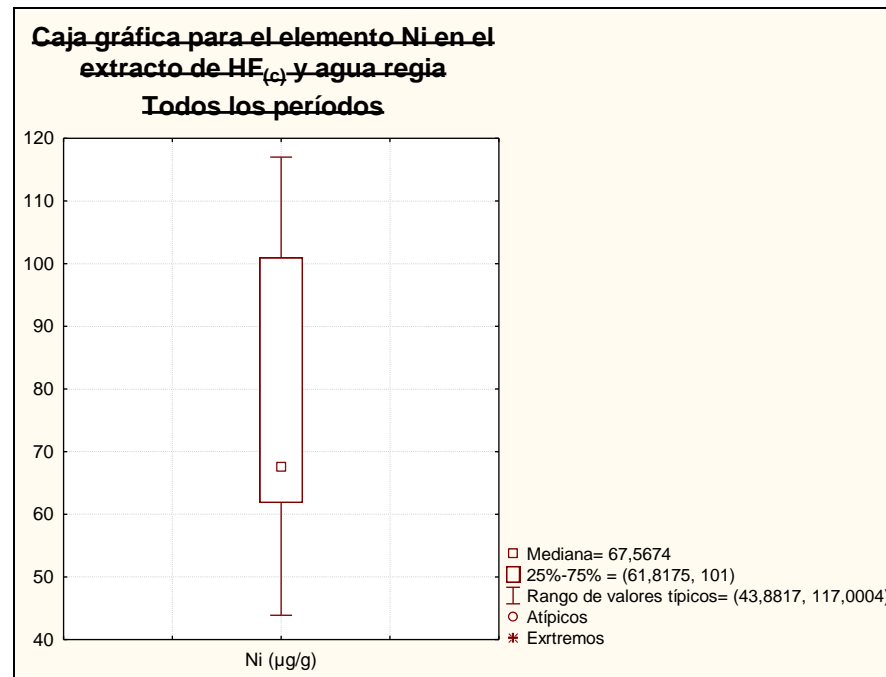


Figura 11. Cajas gráficas de los elementos traza en el extracto HF_(c) y agua regia para todos los períodos de muestreo.

Apéndice 10.

Datos termogravimétricos

Tabla 42. Porcentajes de pérdida a las diferentes temperaturas de trabajo.

Muestra	Nomenclatura	Nombre del punto	% Pérdida a 100°C	% Pérdida a 450°C	% Pérdida a 550°C	% Pérdida a 900°C
11-M2011	PNLT 12	Laguna Grande	16	57	8	19
12-M2011	PNLT 13	Manatí	26	60	3	11
13-M2011	PNLT 14	Marapatá	23	45	9	23
15-M2011	PNLT 16	Club Miami	18	65	3	14
17-M2011	PNLT 18	Túnel del Amor	21	58	4	18
9-M2011	PNLT 10	Caño San Nicolás	21	53	3	24
10-M2011	PNLT 11	Caño San Ignacio	17	53	8	22
11-M2011	PNLT 12	Laguna Grande	34	43	5	18
12-M2011	PNLT 13	Manatí	23	54	6	17
13-M2011	PNLT 14	Marapatá	16	62	6	16
15-M2011	PNLT 16	Club Miami	28	49	6	17
17-M2011	PNLT 18	Túnel del Amor	31	46	6	17
9-A2011	PNLT 10	Caño San Nicolás	19	49	6	26
10-A2011	PNLT 11	Caño San Ignacio	30	45	10	16
11-A2011	PNLT 12	Laguna Grande	22	46	11	20
12-A2011	PNLT 13	Manatí	25	52	5	18
13-A2011	PNLT 14	Marapatá	16	60	6	18
15-A2011	PNLT 16	Club Miami	16	55	12	16
17-A2011	PNLT 18	Túnel del Amor	12	38	10	15

Apéndice 11.

Índices de geoacumulación (IGEO) y factores de enriquecimiento (FE) en la zona de estudio

Tabla 43. Índices de geoacumulación (I_{GEO}) de los elementos trazas

Muestra	Nomenclatura	Nombre del punto	I_{GEO} Ni	I_{GEO} Cr	I_{GEO} Zn	I_{GEO} Co	I_{GEO} Cu
11-M2010	PNLT 12	Laguna Grande	0,40	-1,69	-0,60	-0,43	0,20
12-M2010	PNLT 13	Manatí	0,56	-3,02	-0,90	-0,46	-0,32
13-M2010	PNLT 14	Marapatá	0,40	-1,11	0,08	-0,38	-0,28
15-M2010	PNLT 16	Club Miami	0,37	-2,90	-0,63	-1,09	-1,49
17-M2010	PNLT 18	Túnel del Amor	0,24	-3,17	-0,42	-0,64	-0,60
9-M2011	PNLT 10	Caño San Nicolás	0,58	-3,64	-0,82	-0,08	-0,42
10-M2011	PNLT 11	Caño San Ignacio	-0,17	-2,73	-0,92	-0,49	-0,57
11-M2011	PNLT 12	Laguna Grande	0,05	-3,02	-0,62	-0,38	-0,36
12-M2011	PNLT 13	Manatí	-0,63	-1,84	-0,30	-0,53	-0,15
13-M2011	PNLT 14	Marapatá	-0,81	N.D.	-0,44	-0,85	-0,67
15-M2011	PNLT 16	Club Miami	0,10	N.D.	-0,56	-0,90	-0,86
17-M2011	PNLT 18	Túnel del Amor	0,25	N.D.	-0,33	-0,52	-0,46
9-A2011	PNLT 10	Caño San Nicolás	0,77	-1,83	-0,60	0,18	-0,21
10-A2011	PNLT 11	Caño San Ignacio	-0,59	-1,44	-0,33	-0,11	0,21
11-A2011	PNLT 12	Laguna Grande	0,21	-1,30	-0,65	-0,43	-0,41
12-A2011	PNLT 13	Manatí	0,18	-2,09	-0,61	-0,63	-0,52
13-A2011	PNLT 14	Marapatá	0,52	-1,69	-0,43	-0,58	-0,73
15-A2011	PNLT 16	Club Miami	0,25	-2,05	-0,51	-0,70	-0,66
17-A2011	PNLT 18	Túnel del Amor	0,02	-1,81	-0,47	-0,64	-0,76

Tabla 44. Factores de enriquecimiento (FE) de los elementos trazas

Muestra	Nomenclatura	Nombre del punto	FE Ni	FE Cr	FE Zn	FE Co	FE Cu
11-M2010	PNLT 12	Laguna Grande	0,92	0,22	0,46	0,52	0,80
12-M2010	PNLT 13	Manatí	0,93	0,08	0,34	0,46	0,50
13-M2010	PNLT 14	Marapatá	0,84	0,29	0,67	0,49	0,52
15-M2010	PNLT 16	Club Miami	0,85	0,09	0,42	0,31	0,23
17-M2010	PNLT 18	Túnel del Amor	1,13	0,11	0,71	0,61	0,63
9-M2011	PNLT 10	Caño San Nicolás	0,93	0,05	0,35	0,59	0,46
10-M2011	PNLT 11	Caño San Ignacio	1,31	0,22	0,77	1,04	0,99
11-M2011	PNLT 12	Laguna Grande	2,71	0,32	1,70	2,01	2,03
12-M2011	PNLT 13	Manatí	1,26	0,54	1,58	1,34	1,75
13-M2011	PNLT 14	Marapatá	0,95	N.D.	1,23	0,93	1,05
15-M2011	PNLT 16	Club Miami	0,72	N.D.	0,45	0,36	0,37
17-M2011	PNLT 18	Túnel del Amor	0,90	N.D.	0,60	0,53	0,55
9-A2011	PNLT 10	Caño San Nicolás	1,03	0,17	0,40	0,68	0,52
10-A2011	PNLT 11	Caño San Ignacio	0,49	0,27	0,60	0,69	0,86
11-A2011	PNLT 12	Laguna Grande	0,92	0,32	0,51	0,59	0,60
12-A2011	PNLT 13	Manatí	0,90	0,19	0,52	0,51	0,55
13-A2011	PNLT 14	Marapatá	0,95	0,21	0,49	0,44	0,40
15-A2011	PNLT 16	Club Miami	0,95	0,19	0,56	0,49	0,50
17-A2011	PNLT 18	Túnel del Amor	1,49	0,42	1,06	0,95	0,87

