



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

Área Académica de Química

**Determinación de parámetros fisicoquímicos,
estado eutrófico y metales pesados de la laguna de
Tecocomulco, Hidalgo; identificación de compuestos
quelantes de *Hydrocotyle ranunculoides L. f.***

Tesis para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

ANGÉLICA EVELIN DELGADILLO LÓPEZ

Director de tesis

DR. JOSÉ ROBERTO VILLAGÓMEZ IBARRA

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, Noviembre 2012.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Dirección

M. en A. Julio César Leines Medécigo

Director de Administración Escolar

PRESENTE

Por este conducto le comunico que el jurado asignado a la pasante del Doctorado en Ciencias Ambientales, **C. Angélica Evelin Delgadillo López**, quien presenta el trabajo de tesis titulado **Determinación de parámetros fisicoquímicos, estado eutrófico y metales pesados de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo; identificación de compuestos quelantes de *Hydrocotyle ranunculoides* L. f.**, después de revisar el trabajo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión del mismo una vez realizadas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado.

PRESIDENTE: Dr. Francisco Prieto García
SECRETARIO: Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval
VOCAL: Dr. José Roberto Villagómez Ibarra
SUPLENTE: Dr. César Abelardo González Ramírez

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE

"Amor, Orden y Progreso"

Mineral de la Reforma, Hgo. a 29 de octubre de 2012

Dr. Orlando Avila Pozos
Director del ICBI



Ciudad Universitaria Carretera Pachuca – Tulancingo
Km. 4.5. s/n Col. Carboneras C.P. 42184
Mineral de la Reforma, Hidalgo. México.
Tel: (771)7172000 ext. 2230, 2231



Parte de este trabajo se ha presentado en los siguientes congresos

1er. Foro Internacional y 8vo. Seminario Institucional en Ciencias Ambientales. Pachuca de Soto, Hidalgo, México. 18-21 de noviembre de 2008. Vegetación acuática de la laguna de Tecocomulco.

8° Congreso Internacional, 14° Nacional de Ciencias Ambientales, 3er. Congreso del Ambiente. Tlaxcala, México. 1-5 de junio de 2009. Análisis de la calidad del agua de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

1er. Foro Estudiantil UAEH. Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Agosto de 2009. Pruebas fitoquímicas en macrófitas acuáticas y análisis fisicoquímico del agua de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

2do. Foro Internacional y 9no. Seminario Institucional en Ciencias Ambientales. Pachuca de Soto, Hidalgo, México. 17-20 de noviembre de 2009. Determinación de metales pesados y compuestos orgánicos quelantes en macrófita acuáticas de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

45° Congreso Mexicano de Química y 29° Congreso Nacional de Educación Química. Riviera Maya, Quinta Roo, México. 18-22 de septiembre de 2010. Evaluación del estado trófico y calidad del agua de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

3er. Foro Ambiental y 10° Seminario de Investigaciones en Ciencias Ambientales. Pachuca de Soto, Hidalgo, México. 19-23 de noviembre de 2010. Determinación de metales pesados y compuestos orgánicos quelantes en macrófita acuáticas de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

VIII Encuentro de Participación de la Mujer en la Ciencia. León, Guanajuato, México. 18-20 de mayo de 2011. Determinación de metales pesados y evaluación de la actividad quelante de compuestos del *Hydrocotyle Ranunculoides L. f.*

VIII Encuentro de Participación de la Mujer en la Ciencia. León, Guanajuato, México. 18-20 de mayo de 2011. Evaluación del estado trófico de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

3er. Congreso Internacional de Energías Alternativas. Querétaro, Querétaro, México. 31 de mayo-03 de junio de 2011. Aprovechamiento de plantas acuáticas como fuente de biomasa para la producción de energía.

Publicaciones relacionadas

A. E. Delgadillo López, C. A. González Ramírez, J. R. Villagómez Ibarra, O. Acevedo Sandoval. 2009. Capítulo de libro. Determinación de la calidad del agua de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo. En: *Estudios ambientales realizados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Ciencia al día. 1era. Edición. ISBN 978-607-482-079-9.

A. E. Delgadillo López, C. A. González Ramírez, J. R. Villagómez Ibarra, O. Acevedo Sandoval. 2011. Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14, 597-612.

A. E. Delgadillo López, C. A. González Ramírez, J. R. Villagómez Ibarra, O. Acevedo Sandoval, C. Velázquez González, H. Hernández Contreras. 2012. Artículo enviado y en proceso de revisión. Determinación del estado trófico de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.

Agradecimientos

Heme aquí, Padre Celestial, para agradecerte por haberme dado la vida y porque nunca me has dejado sola. Gracias, porque me amas tanto, que me diste un hijo, una familia y amigos que me acogen entre sus brazos y me apoyan en todo momento; porque me has dado los medios para acumular méritos y no llegar ante tu trono con las manos vacías. Gracias Señor, por enseñarme que todos los días representan grandes retos y que hay nuevas oportunidades para sonreír y seguir soñando.

A mi hijo Emmanuel, por su apoyo, valentía, alegría, ternura, paciencia y amor.

A mis padres y hermana, por su cariño y apoyo en las etapas buenas y difíciles de la vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por su apoyo para la realización del presente proyecto.

Al Dr. José Roberto Villagómez Ibarra y a la Dra. Claudia Velázquez González, por su constante y paciente seguimiento, sus apreciados y relevantes aportes, críticas, comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación.

A los miembros del comité tutorial: Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, Dr. Francisco Prieto García y al Dr. Cesar Abelardo González Ramírez; por su apoyo, valiosas aportaciones y guía.

Al Ing. Raúl Castillo Téllez, del Laboratorio de Pruebas del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por su constante espíritu de servicio, ayuda desinteresada y colaboración.

Al M. en C. Manuel González Ledesma, del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por su ayuda en la identificación taxonómica de las macrófitas acuáticas estudiadas en la presente investigación.

Al Dr. Juan Antonio Gayosso de Lucio, del Instituto de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por su asesoría en el planteamiento de la técnica de determinación de la actividad quelante de los compuestos orgánicos aislados.

Al Ing. Cruz Alejandro Martínez Rivera, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), por su asesoría en la realización de los mapas temáticos presentados en este trabajo.

Dedicatorias

A mi hijo Emmanuel...

Quien ha traído alegría y grandes momentos a mi vida, como una muestra de mi amor por ti y como un ejemplo de superación y de metas alcanzadas, con el deseo de que siempre te superes y de que avances con paso firme para conseguir tus objetivos. Recuerda amor, que para no ser arrancado por una tormenta, el árbol cuenta casi exclusivamente con sus raíces. Si ellas son fuertes y están bien hundidas en la tierra, el árbol tolerará sin problemas los embates del viento más fuerte.

Mi amor, me siento orgullosa de tu valentía, por ser una persona legítima, pura, buena, independiente, que ríe, sueña, toma decisiones y que está aprendiendo a vivir. Ten presente que todo lo que te propongas lo puedes lograr y que siempre cuentas conmigo.

Te agradezco por la paciencia que me tienes, porque cuando me dices “te amo” y me regalas un abrazo y un beso, se me olvida el cansancio y el enojo. Por hacerme mejor de lo que puedo ser. Te amo.

A mis padres...

Por su interminable apoyo en todo momento de mi vida, por sus enseñanzas, su tiempo, su amor, consejos y paciencia. Ahora comprendo que ser padre no es fácil, sin embargo, ustedes han sabido serlo de tal forma que no tengo nada que reprochar, mas sí agradecer.

Gracias, porque nos han dado todo lo que es suyo, incluyéndose a sí mismos, por prepararnos para enfrentar los retos del futuro, del cual, estamos tomando las riendas.

Gracias, porque su amor ha sido tan grande, que en los momentos más difíciles de la vida, nos han ayudado a superar los miedos, buscando siempre una solución. Ahora entiendo que cada consejo buscaba nuestro bien... y es cierto, el presente lo demuestra.

Quiero que sepan que todo lo que haga lleva su nombre y que siempre ocuparán una posición de honor en mi corazón, en mi mente y en mis triunfos. Los amo.

A mi hermana...

Quien fue mi compañera de juegos durante la infancia, y ahora, una gran mujer digna de admiración. Polita, te deseo plenitud en todos los ámbitos de tu vida, recuerda que cuentas conmigo y que te amo mucho.

Para quien con sus palabras, compañía y acciones; ha traído alegría y paz a mi vida. Porque a pesar de la inmensidad del Universo hemos coincidido. Para quien me ha enseñado que la palabra amigo se escribe con “E”.

*Todo tiene su tiempo y todo lo que se quiere debajo del cielo tiene su hora.
Tiempo de nacer y tiempo de morir;
tiempo de plantar y tiempo de cosechar;
tiempo de destruir y tiempo de edificar;
tiempo de llorar y tiempo de reír;
tiempo de endear y tiempo de bailar;
tiempo de esparcir piedras y tiempo de juntarlas;
tiempo de buscar y tiempo de perder;
tiempo de guardar y tiempo de desechar;
tiempo de callar y tiempo de hablar;
tiempo de amar y tiempo de aborrecer;
tiempo de guerra y tiempo de paz.
He entendido que todo lo que Dios hace será perpetuo.*

Eclesiastés 3:1-14

Lo que caracteriza a una persona de ciencia, no es la posesión del conocimiento o de verdades irrefutables, sino la búsqueda desinteresada e incesante de la verdad.

Karl Raimund Popper (1902-1994)

<i>Índice general</i>	<i>Página</i>
Índice de tablas	iv
Índice de figuras	ix
Índice de fotografías	xi
Índice de mapas temáticos	xii
Lista de abreviaturas y siglas	xiv
Resumen	xviii
Abstract	xix
Justificación	1
Objetivos	2
Capítulo 1. Introducción	3
Capítulo 2. Marco teórico	5
2.1 Físicoquímica de las lagunas	5
2.2 Eutrofización	6
2.3 Metales pesados	10
2.3.1 Vías de entrada de los metales pesados en las lagunas	11
2.3.2 Origen de los metales pesados en las lagunas	11
2.3.2.1 Origen natural	11
2.3.2.2 Origen antropogénico	11
2.3.3 Importancia del análisis de los metales pesados	12
2.4 Fitorremediación	13
2.4.1 Tecnologías de fitorremediación	14
2.4.2 Fitorremediación acuática	16
2.5 Agentes quelantes	19
2.5.1 Complejos metálicos	19
2.5.2 Ligandos con más de un átomo donador	20
Capítulo 3. Área de estudio	21
3.1 Ubicación	21
3.2 Clima	21
3.3 Orografía	21
3.4 Hidrología	23

	<i>Página</i>
3.5 Geología	23
3.6 Geomorfología	23
3.7 Principales especies de flora	23
3.8 Principales especies de fauna	25
3.9 Humedales de Ramsar	25
3.10 Vías de acceso	27
3.11 Aspectos culturales	27
3.12 Fuentes de contaminación	28
3.13 Estudios relacionados con la laguna de Tecocomulco	28
 Capítulo 4. Metodología	 31
4.1 Muestreo de agua y sedimentos	31
4.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua	33
4.3 Determinación de dureza cálcica y magnésica	34
4.4 Determinación de fósforo reactivo soluble	34
4.5 Determinación de Clorofila- <i>a</i>	34
4.6 Índice de estado trófico-TSI	34
4.7 Estado eutrófico propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico-OECD	35
4.8 Estado trófico TRIX	35
4.9 Mapas temáticos	36
4.10 Determinación de parámetros fisicoquímicos en sedimento	37
4.11 Extracción secuencial de metales en sedimentos	37
4.12 Colecta de macrófitas acuáticas	37
4.13 Determinación de metales pesados en macrófitas acuáticas	38
4.14 Extracción de compuestos orgánicos	38
4.15 Determinación de la actividad quelante de compuestos orgánicos	38
4.16 Métodos cromatográficos	40
4.16.1 Cromatografía en columna	40
4.16.2 Cromatografía en capa fina	40
4.17 Resonancia magnética nuclear	40
 Capítulo 5. Resultados y discusión	 41
5.1 Muestreo	41
5.2 Parámetros fisicoquímicos del agua	41
5.3 Determinación del estado trófico	71
5.3.1 Índice de estado trófico de Carlson (TSI)	71
5.3.2 Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) y estado trófico TRIX	78
5.4 Determinación de metales pesados en el agua	87
5.5 Especiación de metales pesados en sedimentos	90
5.6 Colecta e identificación de macrófitas acuáticas	112

	<i>Página</i>
5.7 Determinación de metales pesados en macrófitas acuáticas	113
5.8 Compuestos con actividad quelante del <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f.	114
5.9 Identificación de metabolitos del <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f.	118
5.9.1 Estigmasterol	118
5.9.2 Quercetina	121
5.9.3 Ácido gálico	123
5.9.4 Ácido málico	128
Capítulo 6. Conclusiones y sugerencias de trabajos futuros a desarrollar	133
6.1 Conclusiones	133
6.2 Sugerencias de trabajos futuros a desarrollar	135
Referencias bibliográficas	136

<i>Índice de tablas</i>		<i>Página</i>
Tabla 1.	Principales orígenes industriales de metales.	13
Tabla 2.	Ejemplo de métodos de remediación. Comparación de costos.	14
Tabla 3.	Mecanismos de fitorremediación.	15
Tabla 4.	Compuestos orgánicos capaces de quelar metales pesados.	18
Tabla 5.	Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo.	31
Tabla 6.	Criterios de toma de muestras para parámetros fisicoquímicos del agua.	32
Tabla 7.	Escala de valores de estado eutrófico en los cuerpos de agua.	35
Tabla 8.	Escala de valores de estado eutrófico propuesto por la OECD.	35
Tabla 9.	Escala de índice de estado trófico TRIX y calidad del agua.	36
Tabla 10.	Etapas de procedimiento de extracción secuencial.	37
Tabla 11.	Parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna de Tecocomulco.	42
Tabla 12.	Determinación de PT y Clorofila- <i>a</i> .	72
Tabla 13.	Factores nutricionales en la laguna de Tecocomulco.	84
Tabla 14.	Determinación de PRS, %OD y estado trófico TRIX.	85
Tabla 15.	Contenido de metales en el agua de la laguna de Tecocomulco.	88
Tabla 16.	Parámetros fisicoquímicos de los sedimentos de la laguna de Tecocomulco.	91
Tabla 17.	Concentración promedio anual de metales pesados para la laguna de Tecocomulco en mg/kg de muestra seca.	91
Tabla 18.	Concentración de Zn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	93
Tabla 19.	Concentración de Zn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	93
Tabla 20.	Concentración de Zn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	93

	<i>Página</i>
Tabla 21. Concentración de Zn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	94
Tabla 22. Concentración de Cd por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	94
Tabla 23. Concentración de Cd por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	94
Tabla 24. Concentración de Cd por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	95
Tabla 25. Concentración de Cd por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	95
Tabla 26. Concentración de Cu por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	95
Tabla 27. Concentración de Cu por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	96
Tabla 28. Concentración de Cu por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	96
Tabla 29. Concentración de Cu por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	96
Tabla 30. Concentración de Ni por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	97
Tabla 31. Concentración de Ni por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	97
Tabla 32. Concentración de Ni por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	97
Tabla 33. Concentración de Ni por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	98
Tabla 34. Concentración de Co por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	98
Tabla 35. Concentración de Co por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	98
Tabla 36. Concentración de Co por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	99
Tabla 37. Concentración de Co por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	99
Tabla 38. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	99

	<i>Página</i>
Tabla 39. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	100
Tabla 40. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	100
Tabla 41. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	100
Tabla 42. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	101
Tabla 43. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	101
Tabla 44. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	101
Tabla 45. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	102
Tabla 46. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	102
Tabla 47. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	102
Tabla 48. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	103
Tabla 49. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	103
Tabla 50. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	103
Tabla 51. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	104
Tabla 52. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	104
Tabla 53. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	104
Tabla 54. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (marzo).	105
Tabla 55. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (junio).	105
Tabla 56. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (septiembre).	105

	<i>Página</i>
Tabla 57. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca (diciembre).	106
Tabla 58. Concentración de Zn promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	106
Tabla 59. Concentración de Cd promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	106
Tabla 60. Concentración de Cu promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	107
Tabla 61. Concentración de Ni promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	107
Tabla 62. Concentración de Co promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	107
Tabla 63. Concentración de Pb promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	108
Tabla 64. Concentración de Cr promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	108
Tabla 65. Concentración de Mn promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	108
Tabla 66. Concentración de Fe promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	109
Tabla 67. Concentración de As promedio anual por sitio de muestreo en mg/kg de muestra seca.	109
Tabla 68. Identificación taxonómica de macrófitas acuáticas.	112
Tabla 69. Concentración de metales pesados en macrófitas acuáticas.	115
Tabla 70. Absorbancia de extractos crudos a $\lambda = 214$ nm y a 30 ppm de Pb^{2+} .	117
Tabla 71. Datos de RMN de ^1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para el estigmasterol.	119
Tabla 72. Datos de RMN de ^1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para la quercetina.	121

	<i>Página</i>
Tabla 73. Datos de RMN de ^1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para el ácido gálico.	124
Tabla 74. Datos de RMN de ^{13}C (100 MHz) y desplazamiento químico (δ) para el ácido gálico.	124
Tabla 75. Datos de RMN de ^1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para el ácido málico.	128
Tabla 76. Datos de RMN de ^{13}C (100 MHz) y desplazamiento químico para el ácido málico.	131

<i>Índice de figuras</i>		<i>Página</i>
Figura 1.	Secuencia de eutrofización de una laguna.	7
Figura 2.	Factores que determinan el estado trófico de un cuerpo de agua.	9
Figura 3.	Geometrías de complejos metálicos.	19
Figura 4.	Estructuras de algunos ligandos bidentados. Los átomos que se coordinan se muestran en azul.	20
Figura 5.	Localización de la laguna de Tecocomulco.	22
Figura 6.	Laguna de Tecocomulco, Hidalgo, México. Estaciones de muestreo.	31
Figura 7.	Diagrama de flujo del proceso de extracción sucesiva a reflujo en orden ascendente de polaridad.	39
Figura 8.	Esquema de preparación de mezclas para determinación de actividad quelante.	39
Figura 9.	Distribución espacio-temporal de la temperatura del agua.	41
Figura 10.	Distribución espacio-temporal de la CE del agua.	45
Figura 11.	Distribución espacio-temporal de la concentración de SD del agua.	45
Figura 12.	Distribución espacio-temporal del pH.	46
Figura 13.	Efecto del pH en la composición de especies de carbono en agua.	47
Figura 14.	Distribución espacio-temporal de la dureza cálcica y magnésica.	53
Figura 15.	Distribución espacio-temporal del % SO.	59
Figura 16.	Distribución espacio-temporal del % GB de la materia orgánica.	65
Figura 17.	Distribución espacio-temporal de las especies de N ₂ .	86
Figura 18.	Curva de calibración EDTA a $\lambda=214$ nm.	116
Figura 19.	Esquema de fraccionamiento del <i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f.	118
Figura 20.	Estructura del estigmasterol.	119
Figura 21.	Espectro de RMN de ¹ H (400 MHz) de estigmasterol en CDCl ₃ .	120

	<i>Página</i>
Figura 22. Estructura de la quercetina.	121
Figura 23. Espectro de RMN de ^1H (400 MHz) de quercetina en DMSO- d_6 .	122
Figura 24. Modelo estructural de quelatos quercetina-metal (Dusan y Vesna, 2007).	123
Figura 25. Estructura del ácido gálico.	123
Figura 26. Espectro de RMN de ^1H (400 MHz) de ácido gálico en DMSO- d_6 .	125
Figura 27. Espectro de RMN de ^{13}C (100 MHz) de ácido gálico en DMSO- d_6 .	126
Figura 28. Modelos estructurales de quelatos ácido gálico-metal.	127
Figura 29. Modelo estructural de pirogalatos.	128
Figura 30. Estructura del ácido málico.	128
Figura 31. Espectro de RMN de ^1H (400 MHz) de ácido málico en D_2O .	129
Figura 32. Espectro de RMN de ^{13}C (100 MHz) de ácido málico en D_2O .	130
Figura 33. Modelos estructurales de quelatos ácido málico-metal (Montargés <i>et al.</i> , 2008).	132

	<i>Índice de fotografías</i>	<i>Página</i>
Fotografía 1.	Pesca de carpa.	3
Fotografía 2.	Inundación de zonas de cultivo.	3
Fotografía 3.	Acumulación de Tule en orillas de laguna de Tecocomulco.	4
Fotografía 4.	Cosecha manual de Tule.	4
Fotografía 5.	Canales entre el tular.	4
Fotografía 6.	Macrófitas acuáticas.	4
Fotografía 7.	<i>Schoenoplectus californicus</i>	112
Fotografía 8.	<i>Marsilea mollis B. L.</i>	112
Fotografía 9.	<i>Hydrocotyle ranunculoides L. f.</i>	113
Fotografía 10.	<i>Ricciocarpus natans</i>	113
Fotografía 11.	<i>Nymphoides fallax</i>	113
Fotografía 12.	<i>Azolla mexicana</i>	113

<i>Índice de mapas temáticos</i>		<i>Página</i>
Mapa 1.	Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-MARZO	48
Mapa 2.	Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-JUNIO	49
Mapa 3.	Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-SEPTIEMBRE	50
Mapa 4.	Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-DICIEMBRE	51
Mapa 5.	Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-ANUAL (2009)	52
Mapa 6.	Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-MARZO	54
Mapa 7.	Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-JUNIO	55
Mapa 8.	Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-SEPTIEMBRE	56
Mapa 9.	Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-DICIEMBRE	57
Mapa 10.	Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-ANUAL (2009)	58
Mapa 11.	Mapa temático [lagunaseccion] O2 DISUELTO-MARZO	60
Mapa 12.	Mapa temático [lagunaseccion] O2 DISUELTO-JUNIO	61
Mapa 13.	Mapa temático [lagunaseccion] O2 DISUELTO-SEPTIEMBRE	62
Mapa 14.	Mapa temático [lagunaseccion] O2 DISUELTO-DICIEMBRE	63
Mapa 15.	Mapa temático [lagunaseccion] O2 DISUELTO-ANUAL (2009)	64
Mapa 16.	Mapa temático [lagunaseccion] DBO5/DQO-MARZO	66
Mapa 17.	Mapa temático [lagunaseccion] DBO5/DQO-JUNIO	67
Mapa 18.	Mapa temático [lagunaseccion] DBO5/DQO-SEPTIEMBRE	68
Mapa 19.	Mapa temático [lagunaseccion] DBO5/DQO-DICIEMBRE	69
Mapa 20.	Mapa temático [lagunaseccion] DBO5/DQO-ANUAL (2009)	70
Mapa 21.	Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-MARZO	73
Mapa 22.	Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-JUNIO	74

	<i>Página</i>
Mapa 23. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-SEPTIEMBRE	75
Mapa 24. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-DICIEMBRE	76
Mapa 25. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-ANUAL (2009)	77
Mapa 26. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-MARZO	79
Mapa 27. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-JUNIO	80
Mapa 28. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-SEPTIEMBRE	81
Mapa 29. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-DICIEMBRE	82
Mapa 30. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-ANUAL (2009)	83

Lista de abreviaturas y siglas

%	Por ciento
% GB	Porcentaje del grado de biodegradabilidad
% OD	Porcentaje de oxígeno disuelto
% C _{orgánico}	Porcentaje de carbono orgánico
% SO	Porcentaje de saturación de oxígeno
'	Minutos
''	Segundos
°	Grados
°C	Grados centígrados
µg/g	Microgramo por gramo
µg/L	Microgramo por litro
µS/cm	MicroSiemens por centímetro
¹³ C	Carbono
¹ H	Protón
AcOET	Acetato de etilo
Ag	Plata
Al	Aluminio
Al ³⁺	Ion aluminio
As	Arsénico
ASTM	American Society for Testing and Materials
Au	Oro
<i>b</i>	Ancha
B	Boro
Ba	Bario
Bi	Bismuto
C	Carbono
C.	Ciencias
C ₆ H ₈ O ₆	Ácido ascórbico
C ₆ H ₁₄	Hexano
C ₈ H ₄ K ₂ O ₁₂ Sb ₂ .3H ₂ O	Tartrato de potasio y antimonio
Ca	Calcio
Ca ²⁺	Ion calcio
CaCO ₃	Carbonato de calcio
CCLT	Comisión de Cuenca de la Laguna de Tecocomulco
Cd	Cadmio
CDCl ₃	Cloroformo deuterado
CE	Conductividad electrolítica
CH ₃ OH	Metanol
CH ₃ COCH ₃	Acetona
CH ₄	Metano
CHCl ₃	Cloroformo
Cl ⁻	Ion cloruro
cm	Centímetros
Co	Cobalto

CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃ ²⁻	Ion carbonato
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
Cr	Cromo
Cu	Cobre
<i>d</i>	Doble
D ₂ O	Agua deuterada
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
<i>dd</i>	Doble de dobles
DDE	Dicloro difenildicloro etileno
DDT	Dicloro difenil tricloroetano
DMSO- <i>d</i> ₆	Dimetilsulfóxido deuterado
DQO	Demanda química de oxígeno
EAA	Espectrometría de absorción atómica
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
EEA	European Environment Agency
EPA	Environmental Protection Agency
et al.	Y otros
etc.	Etcétera
EtOH	Alcohol etílico
Fe	Hierro
Fe ³⁺	Ion hierro
g	Gramos
g/cm ³	Gramos por centímetro cúbico
Ga	Galio
GEH	Gobierno del Estado de Hidalgo
hr.	Hora
hrs.	Horas
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
ha.	Hectárea
HCl	Ácido clorhídrico
HClO ₄	Ácido perclórico
HCO ₃ ⁻	Ion bicarbonato
Hg	Mercurio
HNO ₃	Ácido nítrico
HOAc	Ácido acético
I	<i>in situ</i>
I ₂	Yodo
IC	Índice de confianza
<i>J</i>	Constante de acoplamiento
K ⁺	Ion potasio
K ₂ HPO ₄	Fosfato diácido de potasio
KClO ₃	Clorato de potasio
km	Kilómetros

km ²	Kilómetros cuadrados
L	Litro
Ln	Logaritmo natural
Log	Logaritmo base 10
m	Metro
M	Molar
M.	Maestro
<i>m</i>	Múltiple
mg CaCO ₃ /L	Miligramos de carbonato de calcio por litro
Mg	Magnesio
mg	Miligramos
mg/kg	Miligramos por kilogramo
mg/L	Miligramos por litro
Mg ²⁺	Ion magnesio
MgCl ₂	Cloruro de magnesio
MHz	Megahertz
min	Minutos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
Mn	Manganeso
Mo	Molibdeno
msnm	Metros sobre el nivel del mar
Mult	Multiplicidad
N	North
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	Molibdato de amonio tetrahidratado
N ₂	Nitrógeno
Na ⁺	Ion sodio
NaOAc	Acetato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
ND	No detectado
NH ₂ OH.HCl	Hidrocloruro de hidroxilamina
NH ₄ OH	Hidróxido de amonio
(NH ₄) ₄ Ce(SO ₄) ₄ ·2H ₂ O	Sulfato cérico (IV) amoniacal
Ni	Níquel
NID	Nitrógeno inorgánico disuelto
nm	Nanómetros
NMX	Norma Mexicana
N-NH ₄ ⁺	Amonio
N-NO ₂ ⁻	Nitritos
N-NO ₃ ⁻	Nitratos
NO ₂ ⁻	Ion nitrito
NO ₃ ⁻	Ion nitrato
NOM	Norma Oficial Mexicana
N _{org}	Nitrógeno orgánico
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
Núm.	Número

O ₂	Oxígeno
OD	Oxígeno disuelto
OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
P	Fósforo
P	Polietileno
PAH's	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
Pb	Plomo
Pb(NO ₃) ₂	Nitrato de plomo (II)
Pb ²⁺	Ion plomo
Pd	Paladio
pH	Potencial de hidrógeno
PO ₄ ⁻³	Fosfatos
ppm	Partes por millón
PRS	Fosforo reactivo soluble
PT	Fosforo total
Pt	Platino
R	Refrigeración
RMN	Resonancia magnética nuclear
s	Simple
Sb	Antimonio
SD	Sólidos disueltos
SDT	Sólidos disueltos totales
Se	Selenio
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SO ₄ ²⁻	Ion sulfato
Sr	Estroncio
SVM	Sistema Volcánico Mexicano
t	Triple
TMS	Tetrametilsilano
TNT	Trinitrotolueno
TRIX	Índice trófico
TSI	Índice de estado eutrófico
U	Uranio
UAEH	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNT	Unidades nefelométricas de turbiedad
UTM	Universal Transverse Mercator
UV/Vis	Ultravioleta/visible
V	Vidrio de borosilicato
V	Volumen
W	West
WGS84	World Geodetic System 84
Zn	Zinc
δ	Desplazamiento químico
λ	Longitud de onda

Resumen

Actualmente se reconoce que las fitotecnologías son alternativas prometedoras a las técnicas clásicas de limpieza de medios contaminados con metales pesados. Sin embargo, su avance requiere la realización de estudios biogeoquímicos, de la determinación de la calidad del medio y del estado eutrófico de los cuerpos de agua, la búsqueda de nuevas especies vegetales adecuadas para este propósito y la identificación de aquellas sustancias orgánicas responsables de los procesos de acumulación de metales.

La disponibilidad de los metales en los organismos acuáticos, se halla en función de las propiedades fisicoquímicas del medio. Por lo que, las hidrófitas son fundamentales en el transporte y eliminación de contaminantes dentro de un ecosistema.

El presente trabajo muestra el estudio fisicoquímico del agua y sedimento de la laguna de Tecocomulco, el estado de eutrofización, el fraccionamiento y biodisponibilidad de metales pesados, su acumulación en seis hidrófitas y la identificación de dos compuestos quelantes en el *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. Para ello, se recogieron muestras de agua, sedimento y macrófitas acuáticas en cinco sitios de muestreo.

Los resultados obtenidos indican que la laguna se encuentra en estado eutrófico, es decir, el agua tiene poca calidad y es altamente productiva; y que las variaciones espaciales y temporales de los parámetros fisicoquímicos favorecen la movilidad de metales pesados en dicha laguna. En el sedimento y en el agua se detectó Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, As, Cd y Co; del total de metales encontrados el 60.22% son de origen litogénico; mientras que el 39.78% deben su presencia a factores antropogénicos.

Se realizó un estudio químico dirigido, por el que se identificó que el *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. emplea el ácido gálico y el ácido málico como compuestos responsables de la quelación de metales pesados. Se muestra que la especie estudiada tiene la capacidad de acumular en su raíz Zn, Mn, Fe, Pb, Ni y As; lo que sugiere que puede ser considerada para su uso en rizofiltración de aguas contaminadas con metales pesados.

Abstract

Nowadays is admitted that the phytotechnologies are promising alternatives to the classic technologies of cleanliness of means contaminated with heavy metals. Nevertheless, it advances needs the accomplishment of biogeochemist studies, of the determination of quality of the environment and the trophic state of water bodies, the search of new vegetable species appropriate for this purpose and the identification of the organic substances responsible of the metal accumulation processes.

The availability of the metals in the aquatic organisms, it is found in function of the physicochemical properties of the environment. Therefore, hydrophytes are fundamental in the transport and elimination of pollutants inside an ecosystem.

The present work shows the physicochemical study of water and sediment of Tecocomulco's lake, the trophic state, the fractionation and bioavailability of heavy metals, their accumulation in six hydrophytes and the identification of two chelate compounds in the *Hydrocotyle ranunculoides L. f.* For it, samples of water, sediment and aquatic macrophytes were taken in five sampling sites.

The obtained results indicate that the lake is in eutrophic state, that is to say, the quality of water is poor and is highly productive; and that the spatial and temporary variations of the physicochemical parameters favor the mobility of heavy metals in the above mentioned lake. In sediment and water samples were detected the following elements: Fe, Mn, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, As, Cd and Co; from the total metals, 60.22 % are of lithogenic origin; whereas 39.78 % owes their presence to anthropogenic factors.

A chemical directed study was realized, for which was identified that the *Hydrocotyle ranunculoides L. f.* uses the gallic acid and malic acid as compounds responsible for the chelation of heavy metals. It shows that the studied specie has the capacity to accumulate in its root: Zn, Mn, Fe, Pb, Ni and As; what suggests that can be considered for its use in rhizofiltration of contaminated waters with heavy metals.

Justificación

Las principales afectaciones al ambiente a nivel global, se relacionan con el agotamiento de los recursos naturales, con el consumo desigual de energía entre países y con la disminución de la capacidad del sistema ambiental para asimilar los efectos producidos por las actividades antrópicas.

Dentro de los principales desafíos ambientales de la humanidad para este siglo, se encuentran: escasez de agua, deforestación, pérdida de biodiversidad, erosión de suelos, desertificación, desastres naturales, cambio climático, capa de ozono, contaminación, residuos urbanos y residuos tóxicos y nucleares.

La laguna de Tecocomulco es uno de los sitios ecológicos más importantes del estado de Hidalgo. Representa un área de recarga de agua subterránea de la Cuenca del Valle de México, es el hábitat natural de especies de vertebrados endémicos, constituye el lugar de descanso e hibernación de miles de aves acuáticas y terrestres migratorias, y es trascendental para las actividades económicas de la población.

Por la importancia que tiene esta laguna ha recibido la clasificación de sitio Ramsar, que la considera humedal de relevancia internacional para su conservación. A pesar de ello, presenta grave deterioro ecológico debido a la pérdida de almacenamiento, a la incorporación de diversas sustancias provenientes de las zonas de cultivo aledañas y a las descargas de drenaje sanitario y de granjas porcinas y ganaderas.

La presencia de grandes superficies erosionadas en las zonas adyacentes debido a la deforestación, han acelerado los procesos de degradación, con el consecuente incremento de los escurrimientos en la cuenca, lo que genera empobrecimiento de suelos en las partes altas, inundaciones de las superficies de cultivo en las partes bajas y el azolvamiento de los cauces de la laguna.

Por lo que, la identificación de un marco de medidas concretas para la utilización, conservación y restauración de los recursos, incluyendo la determinación de la calidad del agua y sedimento, del estado eutrófico, la relación agua-sedimento-planta; así como, el aprovechamiento de la flora acuática con fines ambientales y la introducción de nuevas tecnologías, son decisivas en la búsqueda de alternativas viables para el uso racional del agua y demás recursos naturales.

En este sentido, algunas hidrófitas consideradas malezas, tales como el *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. y el *Schoenoplectus californicus* (tule) presentes en la laguna de Tecocomulco, pueden ser empleadas en sistemas de fitorremediación acuática. Sin embargo, poco se conoce sobre los mecanismos fisiológicos involucrados en el proceso de detoxificación de metales pesados, debido a que la mayoría de las investigaciones relacionadas con ellas se limitan a la determinación de la capacidad de bioabsorción, acumulación y tolerancia, quedando interrogantes por resolver sobre los ligandos que participan en dichos mecanismos.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el estado eutrófico, los parámetros fisicoquímicos en el medio hídrico y la concentración de metales pesados en sedimento y agua; así como algunos posibles compuestos orgánicos responsables de la actividad quelante de una macrófita acuática de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo.

Objetivos Específicos

1. Determinar los parámetros fisicoquímicos y la concentración de metales pesados en agua.
2. Determinar el estado eutrófico de la laguna de Tecocomulco.
3. Determinar la concentración y especiación de metales pesados en sedimentos.
4. Identificar seis especies de macrófitas acuáticas con capacidad para acumular metales pesados.
5. Identificar posibles compuestos orgánicos, de una macrófita acuática, responsables de la quelación de metales pesados.

Capítulo 1. Introducción

Las actividades humanas están cambiando el uso del suelo, el hábitat, la química de la atmósfera y del agua, el balance de los ciclos biogeoquímicos y la diversidad de la vida en la Tierra.

En los últimos 20 años, científicos, gestores y autoridades públicas, han reconocido que los ecosistemas lagunares sufren complicaciones ambientales a causa de una compleja cadena de eventos que varían de un sitio a otro, y que pueden, en parte, ser atribuidos al enriquecimiento por nutrientes que provienen de la escorrentía de las tierras agrícolas, las actividades de engorda de los animales, el vertido de aguas residuales, entre otras. Aunado a esto, la introducción y movilidad de metales pesados en los cuerpos de agua, representan un grave problema para los organismos vivos, incluido el hombre.

Lo antes mencionado se pone de manifiesto en la laguna de Tecocomulco (fotografías 1-6), la cual presenta pérdida de almacenamiento, descargas de drenaje sanitario, de granjas porcinas y ganaderas. La presencia de grandes superficies erosionadas en las zonas adyacentes debido a la deforestación con fines de ampliación de la superficie agrícola, el consumo de leña o madera, el sobrepastoreo, las prácticas agrícolas no adecuadas y los incendios forestales, han acelerado los procesos de degradación, con el consecuente incremento de los escurrimientos en la cuenca, lo que genera empobrecimiento de suelos en las partes altas, inundaciones de las superficies de cultivo en las partes bajas y el azolvamiento de los cauces de la propia laguna.



Fotografía 1. Pesca de carpa.



Fotografía 2. Inundación de zonas de cultivo.

A pesar de que este cuerpo de agua se considera como uno de los sitios ecológicos más importantes del estado de Hidalgo, se ha visto amenazado con desaparecer, pues en diversas ocasiones se ha intentado su desecación, para uso de los terrenos en siembra de cebada y trigo, con fines económicos a corto plazo.



Fotografía 3. Acumulación de Tule en las orillas de la laguna de Tecocomulco.



Fotografía 4. Cosecha manual de Tule.



Fotografía 5. Canales entre el tular.



Fotografía 6. Macrófitas acuáticas.

Por lo que, la identificación de un marco de medidas concretas para la utilización, conservación y restauración de los recursos, incluyendo la identificación del estado eutrófico y de la calidad del agua y sedimento, la determinación de metales pesados, el aprovechamiento de la flora acuática con fines ambientales y la introducción de nuevas tecnologías, son decisivas en la búsqueda de alternativas viables para el uso racional de los recursos naturales. Esta investigación aporta información básica para dar respuesta a algunos de los puntos previamente citados, lo que permitirá plantear proyectos de restauración ecológica, tales como: ampliación de la capacidad de almacenamiento, controlar el proceso de eutrofización por exceso de nutrientes y la conservación de la diversidad biológica.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Fisiocoquímica de las lagunas

El agua de las lagunas interacciona con la atmósfera y la biosfera, lo que hace posible encontrar en ella diferentes sustancias en suspensión, disueltas o en estado coloidal, orgánicas e inorgánicas (Orozco *et al.*, 2003). Dentro de los factores que son determinantes en la composición del medio hídrico se encuentran: la ocurrencia, intensidad, cantidad de precipitación, área de drenaje, erosión, solubilización del suelo, procesos de evaporación, transpiración, interacción atmósfera-agua, entre otros.

Los gases provienen de la actividad de los seres vivos (CO_2 y O_2), de la descomposición aeróbica o anaerobia de la materia orgánica (CO_2 , N_2 , CH_4 y H_2S) y de la disolución de gases atmosféricos (CO_2 , N_2 y O_2).

Los iones que se encuentran disueltos provienen, en su mayoría, de la disolución y meteorización de los materiales de la corteza terrestre. Entre los cationes se pueden considerar al Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , Fe^{3+} y Al^{3+} . Entre los aniones destacan el HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- y NO_3^- . Existen especies inorgánicas que se encuentran en suspensión y que proceden de la erosión y el ataque químico del agua sobre los materiales terrestres, tales como el sílice y las arcillas (Schroeder, 2004).

La materia orgánica disuelta proviene de diversas fuentes como los aminoácidos, hidratos de carbono, ácidos grasos, alcoholes, terpenos, pigmentos naturales y de sustancias en suspensión o estado coloidal (húmicas y fúlvicas).

Las sustancias encontradas en el seno del agua están sometidas a distintos procesos y reacciones, entre los que destacan: procesos de disolución de gases, sustancias orgánicas y sales; de solubilización-precipitación y fotoquímicos; así como, reacciones de hidrólisis, ácido-base, redox, de complejación y biológicas.

La composición química del agua natural (superficial o subterránea) varía en su recorrido, no sólo por los procesos fisiocoquímicos y biológicos mencionados anteriormente, sino también por una serie de fenómenos que pueden influir en los mismos, como (Wania, 2004):

- A) *Cambio de fases*: los minerales arcillosos (caolinita, halloysita, montmorillonita, illita, vermiculita) y algunas sustancias orgánicas (ácidos húmicos y fúlvicos) son especies capaces de adsorber e intercambiar cationes. Esta capacidad de intercambio iónico depende de la naturaleza de los materiales adsorbentes, de la superficie disponible y de las concentraciones de los iones en el agua.
- B) *Concentración por disolución y por evaporación*: la concentración por disolución se produce por influencias litogénicas, ya que las sales proceden de los terrenos drenados por el agua. Los factores que influyen son: la temperatura, la presión (por ejemplo las aguas con un contenido de CaCO_3 próximo a la saturación precipitarán dicho compuesto si hay una disminución de presión del CO_2), superficie, tiempo de contacto, volumen de agua, entre otros.

- C) *El proceso de eutrofización*: debido al incremento de nutrientes (N y P) en el agua. De acuerdo al grado de eutrofización creciente, un cuerpo de agua puede ser considerado oligotrófico, mesotrófico, eutrófico o hipereutrófico. La concentración de pigmentos como la clorofila-*a* (indicativo de la biomasa fitoplanctónica), la cantidad de nutrientes y el grado de transparencia que presenta el agua, son indicadores utilizados para estimar el estado trófico de un recurso (Camargo y Alonso, 2007).
- D) *Los sedimentos*: el sedimento está conformado por partículas de suelo arrastradas por el agua, que se depositan en las zonas bajas de las cuencas. Los depósitos de sedimentos en las lagunas funcionan como fuente o reserva de nutrientes involucrados en el proceso de eutrofización. El intercambio de nutrientes entre los sedimentos y el agua depende de las características químicas del medio hídrico y de las del sedimento mismo. Este compartimiento ecosistémico actúa, además, como medio de acumulación de metales pesados (Ozkan *et al.*, 2008).

La composición química del agua lagunar depende de factores naturales y antropogénicos. Sin embargo, las actividades humanas, como el vertido de desechos urbanos, industriales y agrícolas, son las responsables de la mayor alteración de las propiedades fisicoquímicas del medio (Barcelona y Robbins, 2004).

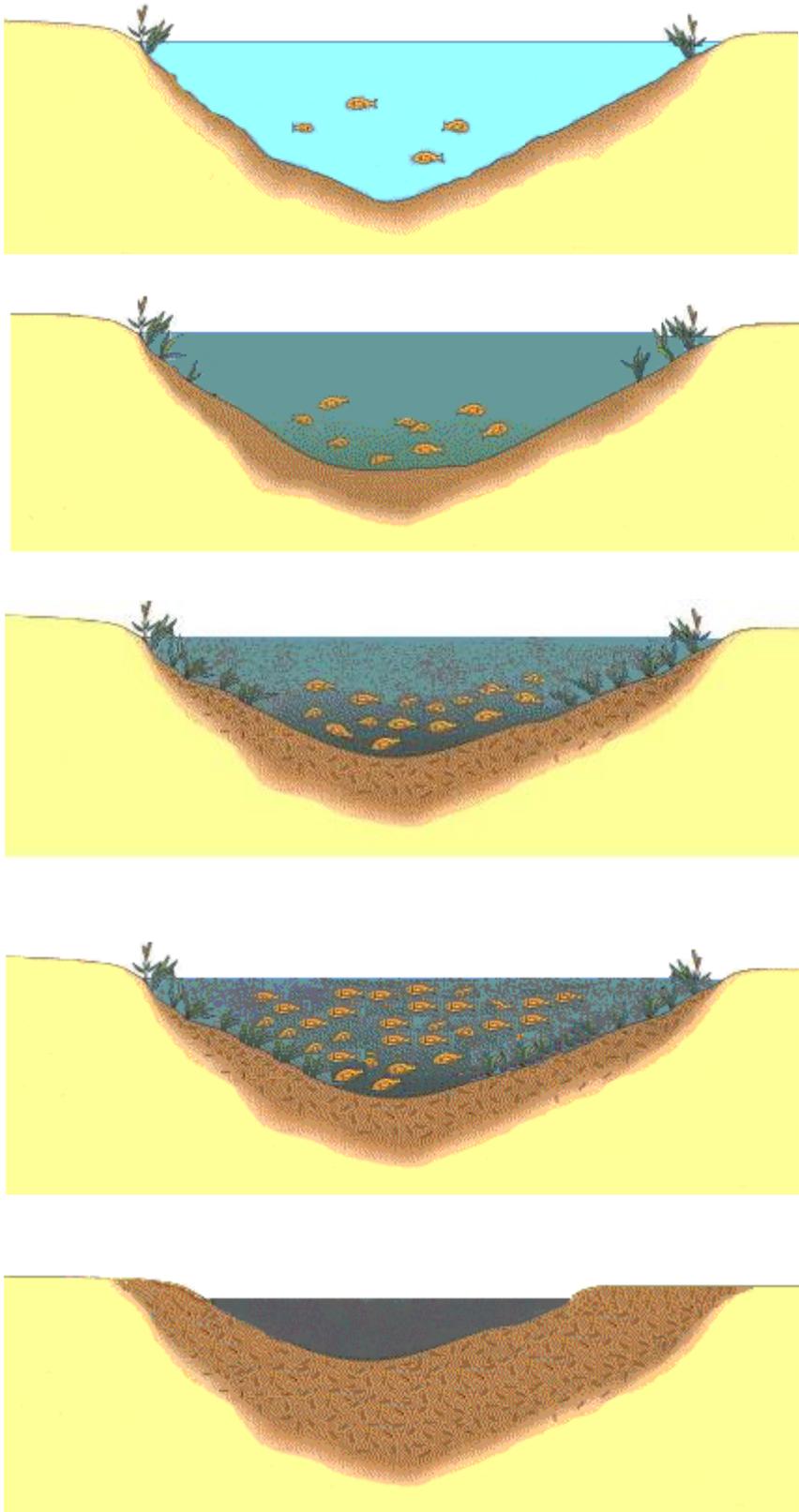
2.2 Eutrofización

La eutrofización es el proceso natural de maduración y envejecimiento de cuerpos de agua estancada, por ejemplo: lagos, lagunas y presas (figura 1). A pesar de que este proceso no es exclusivo de los sistemas lacustres, es en los cuerpos de agua estacionarios donde se manifiesta más claramente, por lo tanto, cobra especial importancia en estos ecosistemas.

Una laguna puede llegar a un estado trófico alto, siguiendo procesos naturales dependientes de las características morfológicas de la cuenca de drenaje y de las condiciones ambientales. Sin embargo, la contaminación acelera el proceso natural y acorta la vida de los cuerpos de agua.

Las lagunas oligotróficas representan el estado más joven de la sucesión. Se caracterizan por una baja concentración de nutrientes y poca productividad biológica. Al irse acumulando los materiales aportados por los escurrimientos que alimentan a las lagunas, aumenta el contenido de flora y fauna. Si existe una gran cantidad de nutrientes, las algas comienzan a proliferar en forma anormal, cubren la superficie e impiden el paso de luz y la oxigenación. Al morir las plantas, éstas se van al fondo donde se descomponen en condiciones anaerobias. Con el transcurso del tiempo, la acumulación de sedimentos en el fondo y la alta tasa de evaporación provocada por las plantas de la superficie, generan el desecamiento de las lagunas y su transformación en pantano.

En los ecosistemas acuáticos eutrofizados, se favorece la alteración de la biota y de la diversidad biológica. Existe proliferación de algas, cianobacterias y macrófitas en demasía. El desarrollo de estos organismos provoca opacidad, que impide que la luz penetre hasta regiones profundas de la columna de agua.



1. Laguna oligotrófica: bajo nivel de productividad biológica y de concentración de nutrientes. Agua clara, algunas plantas acuáticas, pocos peces y fondo arenoso.

2. Laguna mesotrófica: moderado nivel de productividad biológica, concentración de nutrientes, claridad de agua y plantas acuáticas.

3. Laguna eutrófica: alto nivel de productividad biológica, concentración de nutrientes y plantas acuáticas; agua medianamente turbia. Potencial para soportar gran cantidad de peces y vida silvestre.

4. Laguna hipereutrófica: Altísimo nivel de productividad biológica, concentración de nutrientes y plantas acuáticas; agua con elevada turbidez. Potencial para soportar gran cantidad de peces y vida silvestre.

5. Pantano: Alta acumulación de sedimentos en el fondo, alta tasa de evaporación, desecamiento del cuerpo de agua.

Figura 1. Secuencia de eutrofización de una laguna.

Las consecuencias directas son la imposibilidad de llevar a cabo la fotosíntesis en lugares cada vez menos profundos de la columna de agua, y por lo tanto, se disminuye la producción de O₂ libre; simultáneamente aumenta la actividad metabólica consumidora de O₂ de los organismos descomponedores. El fondo del ecosistema acuático se convierte de forma gradual en un ambiente anaerobio, y el consecuente aumento en la concentración de gases como el H₂S, CH₄ y CO₂, hace poco factible la vida de la mayoría de las especies que forman dicho ecosistema.

El estado trófico es un concepto fundamental en la ordenación y clasificación de las lagunas. Expresa la relación entre el estado de nutrientes en un cuerpo de agua superficial y el crecimiento de la materia orgánica. Por lo tanto, depende principalmente del marco geológico en el que fue formado y de las cargas de nutrientes que recibe. En una laguna, la relación entre las características geomorfológicas y biológicas es muy importante. De hecho, es posible decir que una laguna posee un nacimiento debido a procesos geológicos naturales, una etapa de desarrollo o vida y una muerte, que dependerá de las características medioambientales y de factores biológicos (Rivera, 2002).

La figura 2 muestra la interacción de los factores esenciales que determinan la composición, distribución y densidad de la biota, las tasas de reciclaje de los nutrientes y la productividad general de la laguna; con lo que se puede concluir, que la productividad trófica depende, entre otros factores, de los aportes del exterior de origen natural o antrópico, de los cuales la topografía y el uso del suelo representan gran relevancia.



Figura 2. Factores que determinan el estado trófico de un cuerpo de agua (Modificado de Rivera, 2002).

2.3 Metales pesados

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm³ (Vardanyan e Ingole, 2006; Navarro *et al.*, 2007) cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos).

Junto a ellos hay otros elementos que, aunque son metales ligeros o no metales, se suelen englobar con ellos por orígenes y comportamientos asociados; este es el caso del As, B, Ba y Se. Los metales pesados se clasifican en dos grupos (Chen y Oliveira, 2005; Navarro *et al.*, 2007):

- 1) **Oligoelementos o micronutrientes.** Necesarios en pequeñas cantidades para los organismos, pero tóxicos una vez pasado cierto umbral, incluyen: As, B, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Mn, Ni, Se y Zn (Adriano *et al.*, 2004).
- 2) **Sin función biológica conocida.** Son altamente tóxicos e incluyen: Ba, Cd, Hg, Pb, Sb y Bi.

La toxicidad de los metales pesados depende de la concentración, la forma química y la persistencia, es decir, un elemento indispensable para un ser vivo en concentraciones traza puede llegar a ser tóxico en altas cantidades.

La persistencia se define como el tiempo que tarda un contaminante en transformarse en una forma no tóxica. Los metales pesados están considerados como peligrosos debido a su elevada tendencia a bioacumularse. La bioacumulación es el aumento de la concentración de un producto químico en un organismo biológico en un cierto plazo, de forma que llega a ser superior a la del producto químico en el ambiente (Vardanyan e Ingole, 2006).

El proceso se agrava durante el paso por la cadena trófica debido a que los niveles de incorporación sufren un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones, siendo en los superiores donde se hallan los mayores niveles de contaminantes. A este proceso se le denomina biomagnificación; es decir, muchas toxinas que están diluidas en un medio, pueden alcanzar concentraciones dañinas dentro de las células (Khan *et al.*, 2000; Roy *et al.*, 2005; Navarro *et al.*, 2007).

Otro aspecto importante a considerar es la presencia simultánea (mezcla) de los metales pesados, ya que sus efectos pueden ser tóxicamente sinérgicos o antagónicos (la toxicidad se reduce al mezclarse), por tanto, existe cierta dificultad para predecir los efectos reales de estos contaminantes en el medio. Dichos efectos pueden ser inocuos, letales o subletales (no matan al individuo pero producen daños a nivel genético o fisiológico). Con frecuencia, los daños subletales son los más perjudiciales para la población ya que afectan el desarrollo y la reproducción (Navarro *et al.*, 2007).

2.3.1 Vías de entrada de los metales pesados en las lagunas

Los metales tienen tres vías de entrada en una laguna:

- A) Vía atmosférica: se produce debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos (principalmente combustión de carburantes fósiles y procesos de fundición de metales).
- B) Vía terrestre: producto de filtraciones de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados (por utilización de lodos como abono, agroquímicos, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica, etc.) y otras causas naturales.
- C) Vía directa: la entrada de metales es a consecuencia de los vertidos directos de aguas residuales y urbanas.

2.3.2 Origen de los metales pesados en las lagunas

2.3.2.1 Origen natural

El contenido de elementos metálicos de un suelo, libre de interferencia humana, depende de la composición de la roca madre originaria y de los procesos erosivos a los que está expuesta. La acción de los factores medioambientales sobre las rocas y los suelos son determinantes en las concentraciones basales (niveles de fondo) de metales pesados en los sistemas fluviales (aguas, sedimentos y biota).

2.3.2.2 Origen antropogénico

Se entiende por contaminación de origen antropogénico a la procedente de la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados, cuyo uso ha ido aumentando paralelamente al desarrollo industrial y tecnológico. En las lagunas, los principales orígenes antropogénicos pueden ser agrupados en: agropecuario, doméstico, recreativo, industrial y minero.

- a) *Origen agropecuario.* La incorporación de metales pesados de origen agrícola en las lagunas se debe a la lixiviación de los terrenos de cultivo en los que se ha producido una acumulación previa de dichos elementos debido al uso de pesticidas, fertilizantes, tratamientos fitosanitarios y desechos orgánicos susceptibles de ser utilizados como abono.

Los contaminantes de origen ganadero provienen de los desecho de los animales y del lavado de establos y granjas. La concentración de metales es variable y depende del tipo y edad del ganado, del tipo de establo e incluso del manejo de los desechos.

Dadas las altas dosis de microelementos Cu y Zn añadidos a determinadas dietas de porcino y aves de corral, los purines de estos animales contiene de 10 a 40 veces más de Cu y de 4 a 10 veces más de Zn que el de un estiércol normal.

- b) *Origen doméstico.* Los vertidos domésticos transportan una amplia gama de metales contenidos en las excreciones humanas, en los restos de alimentos, en las aguas de lavado, etc. Podemos

incluir en éste ámbito el aporte a través de los combustibles fósiles que se utilizan en las calefacciones, automóviles y lanchas de motor.

El impacto de las calefacciones domésticas depende del tipo y origen del combustible utilizado, de las condiciones de combustión, de la eficacia de las medidas de control de emisión y del clima. Particularmente importantes son las cantidades emitidas de As, Cd, Mo, Se y Zn.

Las emanaciones gaseosas de los automóviles afectan las zonas limítrofes de autopistas y carreteras. Los metales así originados incluyen: Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, siendo el Pb el más abundante proveniente de la combustión de la gasolina y el Zn debido al desgaste de los neumáticos.

- c) *Origen recreativo.* Diferentes estudios muestran que el Pb metálico proveniente de balas y balines empleados en la cacería se transforma en hidrocerusita ($\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$) y, en menor proporción, en carbonatos, sulfatos, fosfatos y óxidos de plomo (PbCO_3 , PbSO_4 , $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, PbO , PbO_2 y Pb_3O_4). Estos compuestos contaminan los suelos en concentraciones que oscilan entre 800 y 55,000 mg/kg de Pb.
- d) *Origen industrial.* Las principales fuentes de metales pesados en los sistemas acuáticos son las aguas residuales procedentes de las industrias que utilizan los cauces fluviales como vertederos. A menudo, estos vertidos no se someten a procesos de depuración o su tratamiento es inadecuado. Un alto grado de industrialización y urbanización es un fuerte riesgo de contaminación, especialmente en sedimentos anaerobios y ricos en sulfuros que favorecen la retención y acumulación de metales. En la tabla 1 se resumen algunos procesos industriales por lo que se introducen metales pesados al ambiente.
- e) *Origen minero.* Los residuos procedentes de la actividad minera representan más de la mitad del total generado por las diferentes fuentes de polución (agricultura, industria, residuos urbanos, etc.). Además del impacto visual que esta contaminación produce en el paisaje, dichos residuos aportan al entorno, cantidades importantes de metales pesados, ya sea de elementos presentes de forma natural en los mismos o procedentes de los productos auxiliares empleados. Por acción del viento y del agua, algunas de las partículas que constituyen a los diques mineros, son trasportadas a los terrenos próximos, o arrastradas a los ríos y depositadas en sus sedimentos.

2.3.3 Importancia del análisis de los metales pesados

El aporte de metales pesados al ciclo hidrológico procede de diversas fuentes, siendo una de ellas de origen litogénico o geoquímico a partir de los minerales que por la erosión, las lluvias, etc., son arrastrados al agua. No obstante, la mayor concentración es de origen antropogénico o debida a la actividad humana. La minería, los procesos industriales, los residuos domésticos y los agroquímicos, son fuentes importantes de contaminación, que aportan metales al aire, agua y suelo.

Los estudios de calidad de las cuencas hidrográficas han adquirido gran interés en las últimas décadas, dado el incremento de población en sus riberas, el creciente grado de industrialización y los aportes del sector primario. La importancia que tiene el estudio de metales pesados en agua y sedimentos, radica en su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación en los organismos vivos.

Tabla 1. Principales orígenes industriales de metales.

Origen	Sb	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
Baterías eléctricas			*	*			*	*	
Cementos					*				
Chapados metálicos					*				
Curtido de pieles				*	*				
Eléctrica y electrónica			*	*	*		*	*	*
Farmacéutica		*		*	*				*
Fertilizantes		*	*	*	*	*	*	*	*
Fotografía			*	*	*			*	
Fundiciones		*	*	*	*		*	*	*
Galvanizados, electrochapados			*	*	*		*	*	*
Minería	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Motores de vehículos			*	*	*				*
Municiones y explosivos				*	*			*	
Papeleras y similares				*	*		*	*	*
Pesticidas		*		*	*	*		*	*
Pigmentos, tintes, pinturas	*		*	*	*		*	*	*
Plásticos	*		*		*				*
Químicas, petroquímica	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Textiles	*			*	*				*

Al contrario que muchos contaminantes orgánicos, los metales pesados, generalmente, no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales, debido a que no son biodegradables. Tienen tendencia a formar asociaciones con sustancias minerales (carbonatos, sulfatos, etc.) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción, quelación, formación de combinaciones químicas, entre otros, por lo que, en una laguna, se acumulan en el medio principalmente, en sedimentos, hidrófitas y fauna.

Los sedimentos actúan como portadores y posibles fuentes de contaminación por metales, ya que estos pueden ser liberados a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales, tales como el pH, potencial redox, OD o la presencia de ligandos orgánicos. Otra posibilidad es que la presencia de tensoactivos, agentes blanqueadores y estabilizantes, participen en la movilización de dichas sustancias. Por tanto, el análisis de metales pesados en sedimentos permite detectar la contaminación que puede escapar al análisis del agua y proporciona información acerca de las zonas críticas del sistema acuático.

2.4 Fitorremediación

Uno de los rasgos característicos de la sociedad moderna es la creciente emisión al ambiente de sustancias contaminantes, destacando aquellas que proceden de las actividades industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas. Estos compuestos representan una amenaza para los seres vivos, por lo que se han desarrollado una serie de métodos para enmendar el impacto causado (Delgadillo *et al.*, 2010). Los métodos convencionales suelen ser costosos (tabla 2) y pueden afectar de

manera irreversible las propiedades del suelo, agua y de los seres vivos que en ellos habitan (Padmavathiamma y Li, 2007).

El aumento de los costos y la limitada eficacia de los tratamientos fisicoquímicos han estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías. Por lo que, la fitorremediación representa una alternativa sustentable y de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos (Singh y Jain, 2003; Reichenauer y Germida, 2008).

Tabla 2. Ejemplo de métodos de remediación. Comparación de costos.

Caso	Tratamiento con fitorremediación	Costo (miles de pesos)	Tratamiento convencional	Costo (miles de pesos)	Ahorro proyectado
Pb en suelo, 0.405 ha.	Extracción, recolección, disposición.	\$150-200	Excavación y disposición.	\$500	50-65%
Solventes en agua subterránea, 1.012 ha.	Degradación y control hidráulico.	\$200 de instalación y mantenimiento inicial	Bombeo y tratamiento.	\$700 costo de funcionamiento anual	50% de ahorro por tres años
Hidrocarburos en suelo, 0.405 ha.	Degradación <i>in situ</i> .	\$50-100	Excavación, incineración y disposición.	\$500	80%

(Movahed y Mohammad, 2009).

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas.

2.4.1 Tecnologías de fitorremediación

Las fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición (tabla 3).

Según Thangavel y Subhram (2004), dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido; las tecnologías de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización).

A) La *fitoestabilización* permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizósfera. Este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire (Barton *et al.*, 2005; Mendez y Maier, 2008,). La fitoestabilización es efectiva en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica (Padmavathiamma y Li, 2007). Se aplica principalmente en terrenos extensos en donde existe contaminación superficial. Esta tecnología tiene como ventajas, sobre otros métodos de remediación de suelos, que es de menor costo, fácil de aplicar y estéticamente agradable (Bolan *et al.*, 2003; Clemente *et al.*, 2003; Rizzi *et al.*, 2004; Kucharski *et al.*, 2005; Clemente *et al.*, 2006; Frérot *et al.*, 2006; Mains *et al.*, 2006; Vázquez *et al.*, 2006;

Conesa *et al.*, 2007). Algunas plantas empleadas con fines de fitoestabilización son: *Hyparrhenia hirta* (Pb); *Zygophyllum fabago* (Zn); *Lupinus albus* (Cd, As); *Anthyllis vulneraria* (Zn, Pb, Cd); *Deschampsia cespitosa* (Pb, Cd, Zn); *Cardaminopsis arenosa* (Cd, Zn); *Horedeum vulgare*, *Lupinus angustifolius* y *Secale cereale* (As); *Lolium italicum* y *Festuca arundinaceae* (Pb, Zn); y *Brassica juncea* (Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb).

Tabla 3. Mecanismos de fitorremediación.

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fitoinmovilización	Acumulación en la rizósfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes	Orgánicos
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

(Ghosh y Singh, 2005).

- B) La *rizofiltración* utiliza las plantas para eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz (Dushenkov *et al.*, 1995). En la rizofiltración estas plantas se cultivan de manera hidropónica. Cuando el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales, en donde las raíces los absorben y acumulan. A medida que las raíces se van saturando, las plantas se cosechan y se disponen para su uso final (Zhao y Duncan, 1998; Boniardi *et al.*, 1999; Fogarty *et al.*, 1999; Nedelkoska y Doran, 2000; Antunes *et al.*, 2001; Groudeva *et al.*, 2001; Cohen-Shoel *et al.*, 2002; Suseela *et al.*, 2002; Eapen *et al.*, 2003; Quin y Terry, 2003; Zheng *et al.*, 2003; Bennicelli *et al.*, 2004; Chandra y Kulshreshtha, 2004; Kamal *et al.*, 2004; Maleva *et al.*, 2004; Weis y Weis, 2004; Cherian y Oliveira, 2005; Mkandawire *et al.*, 2005; Vardanyan e Ingole, 2006; Dilek, 2007; Li *et al.*, 2007). Existe una gran cantidad de estudios relacionados con la capacidad de acumulación de contaminantes de diversas plantas acuáticas, algunos ejemplos de ellas son: *Schoenoplectus californicus* (Cd, Cu, Pb, Mg, Fe, Se, Cr); *Lemna gibba* (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Cr, Al, Fe, Zn, Mn); *Azolla caroliniana* (Hg, Cr, Sr, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb, Au, Pt); *Elatine trianda* (As); *Wolffia papulifera* (Cd); *Polygonum punctatum* (Cu, Cd, Pb, Se, As, Hg, Cr, Mn); y *Myriophyllum aquaticum*, *Ludwigina palustris* y *Mentha aquatic* (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni).
- C) La *fitoextracción o fitoacumulación* consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas. El primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de planta más adecuada para los metales presentes y las

características del emplazamiento. Una vez completado el desarrollo vegetativo de la planta el siguiente paso es cortarlas y proceder a su incineración y traslado de las cenizas a un vertedero de seguridad. La fitoacumulación se puede repetir ilimitadamente hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites considerados como aceptables (Kumar *et al.*, 1995; Begonia *et al.*, 1998; Reeves, 2003; Schwartz *et al.*, 2003; Wenzel *et al.*, 2003; Odjegba y Fasidi, 2004; Sharma *et al.*, 2004; Boonyapookana *et al.*, 2005; Chandra *et al.*, 2005; Zhuang *et al.*, 2005; Bani *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Zhuang *et al.*, 2007). Algunas plantas empleadas para esta técnica fitocorrectiva son: *Thlaspi caerulescens* (Cd); *Sedum alfredii*, *Viola baoshanensis* y *Vertiveria zizanioides* (Zn, Cd, Pb); *Alyssum murale*, *Trifolium nigriscens*, *Psychotria douarrei*, *Geissois pruinosa*, *Homalium guillainii*, *Hybanthus floribundus*, *Sebertia acuminata*, *Stackhousia tryonii*, *Pimelea leptospermoides*, *Aeollanthus biformifolius* y *Haumaniastrum robertii* (Ni); *Brassica juncea*, *Helianthus annuus* y *Sesbania drummondii* (Pb); *Brassica napus* (Cu, Pb, Zn); y *Pistia stratiotes* (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn).

- D) La *fitovolatilización* se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera (Prasad y Freitas, 2003). Mediante este proceso se han eliminado contaminantes como: compuestos orgánicos volátiles (benceno, nitrobenceno, tolueno, etilbenceno y *m*-xileno), As, Se y Hg (Burken y Ma, 2006; Padmavathiamma y Li, 2007). Las plantas *Salicornia bigelovii*, *Brassica juncea*, *Astragalus bisulcatus* y *Chara canescens* se han empleado para la remediación de sitios contaminados con Se (Lin *et al.*, 2002; Shrestha *et al.*, 2006) y la *Arabidopsis thaliana* para el Hg (Chen y Oliveira, 2005).
- E) En la *fitodegradación* las plantas y los microorganismos asociados a ellas degradan los contaminantes orgánicos en productos inofensivos, o bien, mineralizarlos hasta CO₂ y H₂O. En este proceso los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación (Singh y Jain, 2003). La fitodegradación se ha empleado para la remoción de explosivos como el TNT, hidrocarburos halogenados, Bisfenol A, PAH's y pesticidas organoclorados y organofosforados (Hannink *et al.*, 2001; Chaudhry *et al.*, 2002; Denys *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007).
- F) La *fitoinmovilización* provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena y Bernal, 2007).

2.4.2 Fitorremediación acuática

Tradicionalmente, las plantas acuáticas han sido consideradas como una plaga en sistemas enriquecidos con nutrientes. Su rápida proliferación puede dificultar la navegación y amenazar el balance de la biota en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo, en la actualidad se considera que estas plantas pueden ser útiles debido a su capacidad para remover y acumular diversos tipos de contaminantes. Los sistemas de fitorremediación acuática pueden ser de cuatro tipos:

1. *Humedales contruidos*: se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y subemergente, animales y agua que simula los humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para su beneficio.
2. *Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes*: pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.
3. *Sistema de tratamiento integral*: es una combinación de los dos sistemas anteriores.
4. *Sistema de rizofiltración*: se basa exclusivamente en hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas.

Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos radiactivos, fluoruros, bacterias y virus, de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales, incluyendo las empresas: lechera, de pulpa y papel, textil, azucarera, de curtiduría, de destilería, aceitera, de galvanizado y metalurgia.

Con base en sus formas de vida, las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática se clasifican en tres grupos:

- A) *Emergentes*: la raíz de estas plantas está enterrada en los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie de agua. Sus estructuras reproductoras están en la porción aérea de la planta. Ejemplos: carrizo (*Phragmites communis*), platanillo (*Sagitaria latifolia*) y tule (*Schoenoplectus californicus*).
- B) *Flotantes*: se subdividen en dos grupos: i) *Plantas de libre flotación (no fijas)*: sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua. Sin embargo, sus raíces no están fijas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua. Sus estructuras vegetativas y reproductivas se mantienen emergentes. Ejemplos: lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y lenteja de agua (*Lemna* spp. y *Salvinia minima*). ii) *Plantas de hoja flotante (fijas)*: tienen sus hojas flotando sobre la superficie del agua, pero sus raíces están fijas en los sedimentos. Ejemplo: nenúfares (*Nymphaea elegans* y *Nymphoides fallax*).
- C) *Sumergidas*: se desarrollan debajo de la superficie del agua. Sus órganos reproductores pueden presentarse sumergidos, emerger o quedar por encima de la superficie de agua. Ejemplos: bejuquillo (*Cerathophyllum demersum*), hidrilla o maleza (*Hydrilla verticillata*) y pastos (*Phyllospadix torreyi*).

La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Kelley *et al.*, 2000; Miretzky *et al.*, 2004; Cherian y Oliveira, 2005; Eapen *et al.*, 2007; Cho *et al.*, 2008). Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras. Por definición, estas plantas deben acumular al menos 100 µg/g (0.01 % peso seco) de Cd y As; 1,000 µg/g (0.1 % peso seco) de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10,000 µg/g (1.0 % peso seco) de Mn (Watanabe, 1997; Reeves *et al.*, 1999; McGrath *et al.*, 2001; Kamal *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2004; Reeves, 2006; Padmavathiamma y Li, 2007).

Los mecanismos de tolerancia varían entre las distintas especies de plantas y están determinados por el tipo de metal, eficiencia de absorción, traslocación y secuestro. Las fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados son las siguientes (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007):

Fase I. Implica el transporte de los metales pesados al interior de la planta y, después, al interior de la célula. La raíz constituye el tejido de entrada principal de los metales, los cuales llegan por difusión en el medio, mediante flujo masivo o por intercambio catiónico. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular, ya sea por vía apoplástica o simplástica (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007).

Fase II. Una vez dentro de la planta, las especies metálicas son secuestradas o acomplejadas mediante la unión a ligandos específicos. Entre los quelantes producidos por las plantas se encuentran los ácidos orgánicos (ácidos cítrico, oxálico y málico), algunos aminoácidos (histidina y cisteína) y dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metaloteínas (tabla 4).

Tabla 4. Compuestos orgánicos capaces de quelar metales pesados.

Compuesto orgánico	Metal quelatado
Ácido cítrico	Fe, Zn, Mn, Cu, Ca, Mg, Mo, Co
Aminoácidos	Cu
Ácido málico	Mn, Al
Ácidos fenólicos	Mn, Cu, As
Ácidos húmicos y fúlvicos	Cu
Ácido láctico	Ca
Ácidos polihidroxicarboxílicos	Cu
Ácido acético	Ca
Flavonoides	Fe, Zn, Al, Cu
Taninos	Mn, Fe, Ag, Au, Pd, Pt, Hg
Antraquinonas	Al, Ba, Ca, Cu, Cr, Fe, Ga, Mg, Mn, Hg, Pb, Sn, Ga, Zn, Co, Mo, Ni, Ag, U
Saponinas	Cr, Cu, Ni, Pb, Cd, Zn

Las fitoquelatinas son ligandos de alta afinidad que tienen como sustrato al glutatión. Están constituidas básicamente por 3 aminoácidos: ácido glutámico, cisteína y glicina, unidos por enlaces peptídicos.

Las metaloteínas son polipéptidos de unos 70-75 aminoácidos con un alto contenido en cisteína, aminoácido capaz de formar complejos con cationes mediante el grupo sulfidrilo. Tienen una marcada afinidad por las formas iónicas de Zn, Cd, Hg y Cu.

Fase III. Involucra la compartimentalización y detoxificación, proceso por el cual, el complejo ligando-metal queda retenido en la vacuola.

Respecto a las plantas acuáticas, hasta la fecha sólo se ha demostrado la síntesis de fitoquelatinas en algas marinas y de agua dulce. Aun cuando se han realizado numerosos estudios con el lirio (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna spp*), plantas comúnmente empleadas en los sistemas de fitorremediación acuáticos, poco se conoce sobre sus mecanismos fisiológicos involucrados en el proceso de detoxificación de metales pesados, debido a que la mayoría de las investigaciones se han limitado a determinar la capacidad de bioabsorción, acumulación y tolerancia, quedando muchas interrogantes por resolver sobre los ligandos que participan en dichos mecanismos. Por lo que, el presente trabajo aporta información sobre algunas sustancias orgánicas involucradas en el proceso de quelación de la hidrófita *Hydrocotyle ranunculoides L. f.* encontrada en la laguna de Tecocomulco.

2.5 Agentes quelantes

2.5.1 Complejos metálicos

Los complejos metálicos o simplemente complejos, son conjuntos formados por un ion metálico central unido a un grupo de moléculas o iones. Los compuestos que forman complejos se conocen como *compuestos de coordinación*, la mayor parte de estas sustancias contienen iones de metales de transición.

Las moléculas o iones que rodean al ion metálico en un complejo se conocen como *ligandos* (de la palabra latina *ligare*, que significa *atar*). Normalmente, estos son aniones o moléculas polares que tienen al menos un par no compartido de electrones de valencia. Cuando forman un complejo, se dice que los ligandos se coordinan al metal.

El metal central y los ligandos unidos a él constituyen la *esfera de coordinación* del complejo. Los complejos tetracoordinados tienen dos geometrías comunes, la tetraédrica y la plana cuadrada, como se muestra en la figura 3.

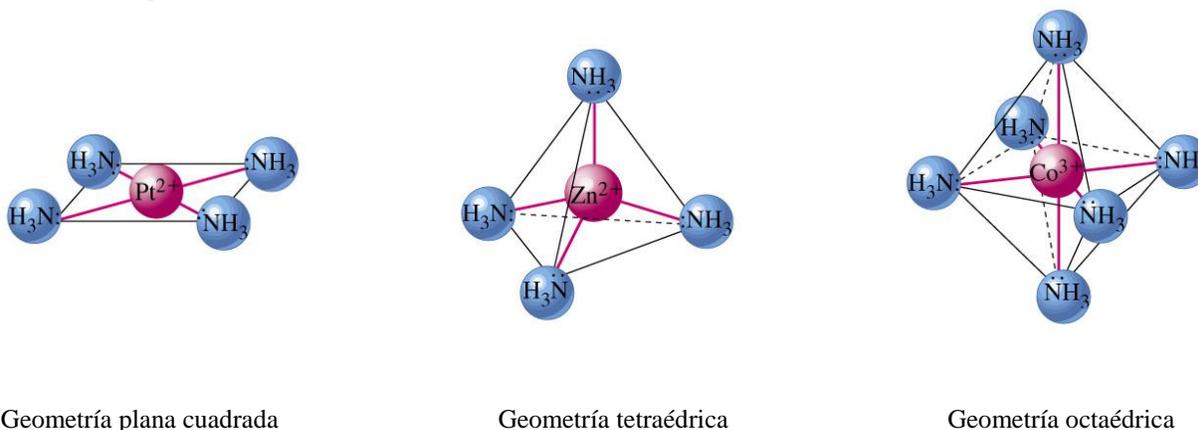


Figura 3. Geometrías de complejos metálicos.

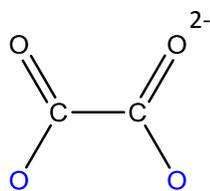
La geometría tetraédrica es la más común de las dos, en especial entre los metales que no son de transición. La geometría plana cuadrada es característica de los iones de metales de transición con ocho electrones *d* en la capa de valencia, como el platino (II) y el oro (III).

La inmensa mayoría de los complejos hexacoordinados tienen geometría octaédrica. Se suele representar el octaedro como un cuadrado plano con ligandos arriba y abajo del plano (figura 3).

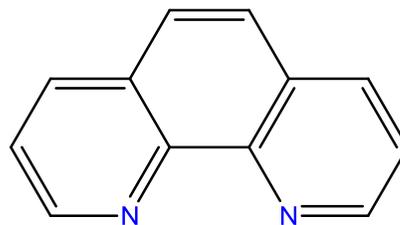
El enlace entre un ligando y un ion metálico es un ejemplo de interacción entre una base de Lewis y un ácido de Lewis. Debido a que los ligandos tienen pares de electrones no compartidos, pueden funcionar como bases de Lewis (donadores de pares de electrones). Los iones metálicos, en particular los iones de metales de transición, tienen orbitales de valencia vacíos; por tanto, pueden actuar como ácidos de Lewis (receptores de pares de electrones). Podemos imaginar el enlace entre el ion metálico y el ligando como el resultado de compartir un par de electrones que inicialmente pertenecía al ligando.

2.5.2 Ligandos con más de un átomo donador

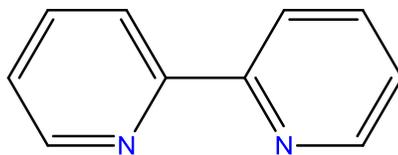
Los ligandos monodentados (combinación de griego y latín que significa “de un diente”) poseen un solo átomo donador y pueden ocupar un solo sitio en la esfera de coordinación. Ciertos ligandos tienen dos o más átomos donadores capaces de coordinarse simultáneamente a un ion metálico, por lo que ocupan dos o más sitios de coordinación, a éstos se les llama ligandos polidentados (“de muchos dientes”). Debido a que parecen sujetar el metal entre dos o más átomos donadores, los ligandos polidentados se conocen también como agentes quelantes (de la palabra griega *chele*, “pinza”). Ligandos de este tipo son la etilendiamina, la fenantrolina, el EDTA, la bipyridina, los ácidos polihidroxilados, entre otros (figura 4).



Ion oxalato



Orto-Fenantrolina



Bipiridina

Figura 4. Estructuras de algunos ligandos bidentados. Los átomos que se coordinan se muestran en azul.

Capítulo 3. Área de estudio

3.1 Ubicación

La laguna de Tecocomulco (vocablo náhuatl que significa lugar de Tecolotitos) es el último humedal natural del antiguo ecosistema lacustre que predominó en la cuenca del Valle de México. Es lugar de anidación, reproducción y paso de aves migratorias provenientes del norte de México, Estados Unidos y Canadá.

Dada su importancia ecológica y biológica, el 27 de noviembre de 2004, fue designada como sitio Ramsar, Convención sobre los Humedales de Importancia Internacional, lo que sirvió de marco para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y el uso racional de la laguna y de sus recursos (Huizar y Ruiz, 2005; CCLT, 2007).

Se ubica en la parte oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano. Pertenece a la Subcuenca de Tecocomulco, localizada en la parte noreste de la Cuenca del Valle de México. Está delimitada por las coordenadas geográficas: 19° 42' 13.7" y 19° 59' 30" de latitud Norte y, 98° 11' 46.2" y 98° 27' 30" de longitud Oeste. Su altitud media es de 2,514.30 msnm (figura 5).

La laguna de Tecocomulco es somera. Su extensión varía dependiendo de la precipitación estacional, alcanzando los 27 km². Posee 8.5 km de largo y 3.2 km de ancho. Tiene forma alargada, orientada de noreste a sureste. El tirante de agua promedio es de 70 cm, aunque en la zona más profunda puede alcanzar los 2.0 m. El nivel del agua decrece por la evaporación e infiltración, así como por la cantidad de agua que se extrae por bombeo con fines agrícolas (GEH, 2003).

3.2 Clima

El clima predominante de la región es templado subhúmedo, con temperatura media anual de 12 a 18°C.

La temperatura de los meses más cálidos (mayo y junio) varía entre 6.5 y 22°C; mientras que la más fría (diciembre a febrero) oscila entre 3 y 18°C. En correspondencia con la distribución de la temperatura, los mayores valores de evapotranspiración se registran durante la primavera y el verano, alcanzando una media anual de 550 mm y una máxima mensual de 114 mm, durante el mes de mayo.

El régimen pluvial medio anual oscila entre 500 y 600 mm. La precipitación se acentúa entre mayo y septiembre con el 75.2% de la lluvia anual, durante los meses de abril y octubre precipita el 13.2%. El periodo comprendido entre noviembre y marzo es el más seco con el 11.6% de la lluvia (CONAGUA, 2002).

3.3 Orografía

Hacia el norte y este, la laguna de Tecocomulco está delimitada por los cerros que corresponden a las estribaciones de la sierra del norte del estado de Puebla, mientras que al sur y suroeste lo está por los cerros de Carlota, Xihuingo, Viejo de Tultengo, Viejo de la Palma, Volcán Coatzetzingo y San Miguel (GEH, 2003).

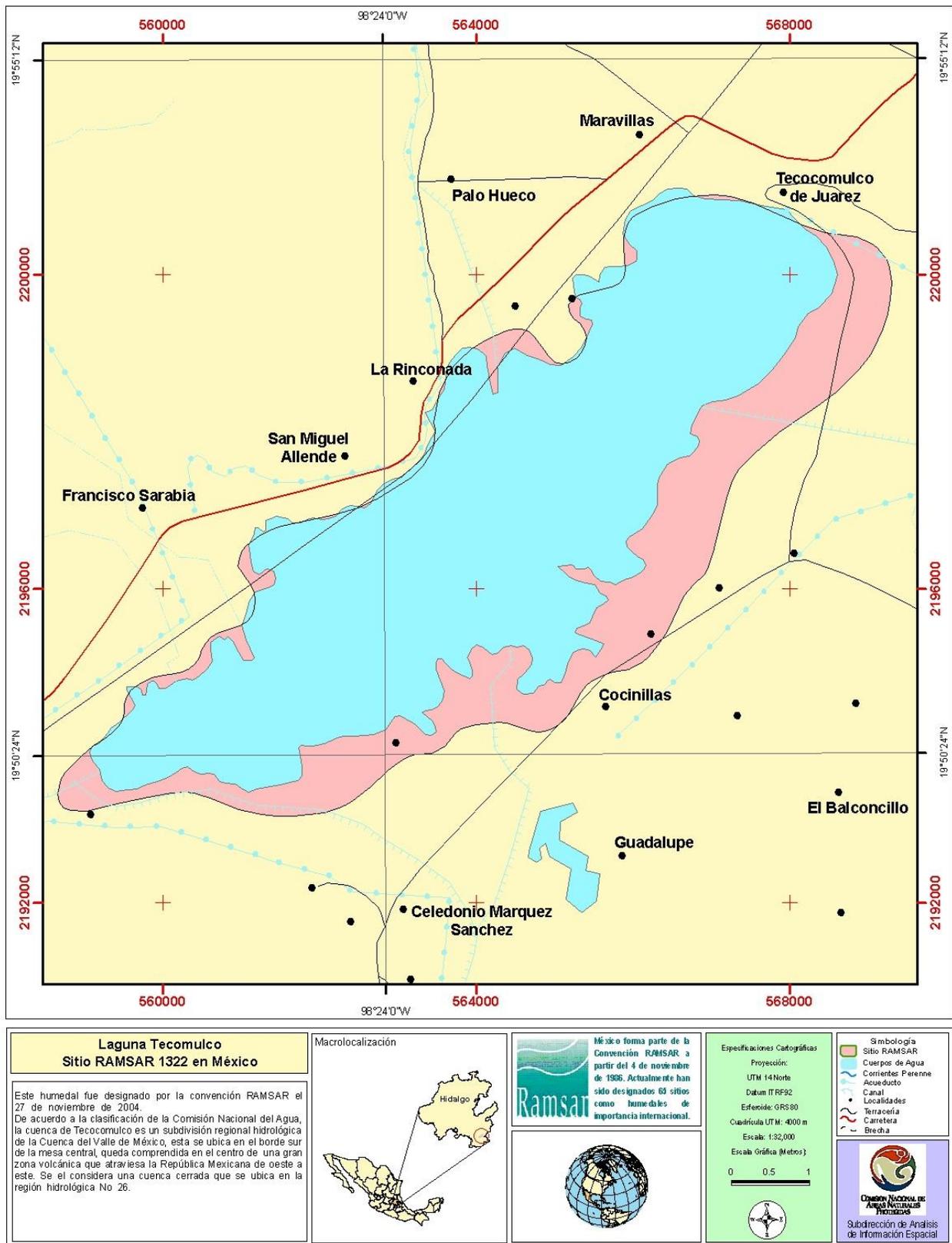


Figura 5. Localización de la laguna de Tecocomulco.

3.4 Hidrología

La laguna de Tecocomulco pertenece a la Región Hidrológica No. 26 del Río Pánuco. Se le considera como sistema lacustrino, es decir, se forma por el depósito de agua en depresiones causadas por fenómenos de origen volcánico.

Se caracteriza por un drenaje de naturaleza endorreica. Los ríos que descienden de las partes altas transportan cantidades importantes de azolve como resultado de la erosión ocasionada por la intensa deforestación.

Los causes principales son: Cuatlaco, Sarabia, Toronjil y Tepozán, que drenan las partes más activas de la zona. Prácticamente toda el agua que fluye por estos ríos en época húmeda se almacena en la planicie formado la laguna de Tecocomulco. Durante la época seca, sólo los ríos Cuatlaco y la parte alta del río Tepozán conducen agua. El volumen promedio de escurrimiento medio anual es de 1.4 Mm³ de junio a septiembre, con lo que se concentra el 88% de los escurrimientos.

La laguna está rodeada por una red de canales construidos en la planicie para evitar la inundación de las áreas agrícolas, sin embargo, están acelerando su azolvamiento. Estos canales transportan el agua excedente al final del periodo de lluvias al río Papalote, principal afluente del río de la Avenidas de Pachuca (Huizar *et al.*, 2001; CONAGUA, 2002; Huizar y Ruiz, 2005).

3.5 Geología

El material geológico de las partes bajas de la cuenca está constituido principalmente por material de aluvión y suelos residuales (basaltos, andesita, toba, riolita y brecha volcánica); mientras que en las partes altas, por rocas ígneas y un mínimo de rocas sedimentarias (GEH, 2003).

3.6 Geomorfología

Esta cuenca, como parte de la Provincia del Eje Neovolcánico, se caracteriza por la presencia de grandes cadenas montañosas de origen volcánico que dan origen a una cuenca cerrada ocupada por la laguna, que se formó por el bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos volcánicos. En la cuenca existen formaciones orográficas importantes como la Sierra del Tepozán con alturas mayores a 2,800 msnm que son parte de la recarga natural hacia la laguna de Tecocomulco (GEH, 2003).

3.7 Principales especies de flora

La vegetación acuática de la laguna de Tecocomulco está constituida por una serie de asociaciones que se distribuyen con una cierta zonificación relacionada con el nivel de agua y la topografía. Las principales asociaciones de hidrófitas son:

- a) *Hidrófitas emergentes*. Están ancladas al sustrato. Sobresalen del agua parte del tallo, las hojas y las estructuras reproductoras. Entre este tipo de hidrófitas resalta el *Schoenoplectus californicus*, conocida en la región bajo el nombre de tule. Entre los canales formados por el tular, es frecuente encontrar: *Ricciocarpus natans*, *Utricularia gibba* y *Utricularia vulgaris*. En las zonas inundables

marginales de la laguna se localizan manchones dispersos de: *Lilaeopsis Schaffneriana*, *Limosella aquatica*, *Elatine trianda*, *Lilaea subulata*, *Polygonum punctatum* y *Polygonum lapathifolium*. En pequeñas zonas, fuertemente perturbadas por el hombre, se ven favorecidas las siguientes especies: *Typha latifolia*, *Scirpus americanus* y *Rumex verticillatus*; las cuales no constituyen asociaciones importantes en la laguna.

Una especie digna de mención es la *Sagittaria demersa*, hidrófita endémica de México, propia de los lagos de montaña, actualmente en vía de extinción. Es una especie escasa que crece aisladamente entre los claros del tular y que puede detectarse por las pequeñas flores blancas que flotan en la superficie, unidas a un pedúnculo que parte del fondo. La *Sagittaria macrophylla*, es otra especie endémica del Valle de México encontrada en la laguna de Tecocomulco.

- b) *Hidrófitas sumergidas*. Están unidas o no al sustrato, con las estructuras vegetativas dentro del agua, mientras que los órganos reproductores pueden estar sumergidos, emergidos o flotando. Estas formas de vida están presentes en los claros de la laguna como son: las zonas abiertas del tular y las áreas de máxima profundidad. Entre las hidrófitas que están unidas al fondo sobresalen las agrupaciones constituidas por varias especies de la familia Potamogetonaceae. Como forma libre sumergida, pero con sus estructuras sexuales emergiendo del agua, encontramos a las plantas carnívoras de la familia Lentibulariaceae (*Utricularia vulgaris* y *Utricularia gibba*, ambas de flores amarillas pero con utrículos notoriamente mayores en la primera). Los claros del tular se encuentran cubiertos por la asociación de hidrófitas sumergidas dominada *Najas guadalupensis* con las siguientes especies acompañantes: *Najas flexis*, *Potamogeton foliosus*, *Potamogeton filiformis*, *Potamogeton pectinatus*, *Ranunculus aquatilis*, *Ranunculus aff dichotomus*, *Stuckenia pectinata* y *Leptodictyum riparium* (musgo acuático).
- c) *Hidrófitas libres flotadoras*. Tienen tanto sus estructuras reproductoras como vegetativas sobre la superficie del agua. Las agrupaciones con este tipo de forma de vida, no están presentes durante todas las épocas del año y su distribución está restringida a recodos y partes abiertas del borde de la laguna donde se acumulan por la acción del viento. Las diminutas fanerógamas que constituyen este tipo de hidrófitas son, principalmente, especies de la familia Lemnaceae. Entre las especies de plantas acuáticas que representan este grupo se encuentran: *Lemna gibba*, *Lemna perpusilla*, *Wolffia papulifera*, *Wolffiella lingulata*, *Ricciocarpus natans* y *Azolla caroliniana*.
- d) *Hidrófitas de hojas flotantes*. Se desarrollan en los lugares abiertos del tular. Se encuentran enraizadas al sustrato pero con hojas flotando en el espejo de agua. La fanerógama que destaca por su abundancia y vistosas flores amarillas es el “lirio” o *Nymphoides fallax*. Otras asociaciones menos vistosas, pero más ampliamente distribuidas son las constituidas por *Potamogeton nodosus* y *Potamogeton illinoensis*. En los bordes de la laguna, especialmente del lado oeste se encuentra la *Marsilea mexicana* y del lado este la *Jaegeria glabra* asociada a *Hydrocotyle ranunculoides*.

La vegetación acuática de la laguna de Tecocomulco está constituida principalmente por tule (*Schoenoplectus californicus*), ubicado en la porción central del cuerpo de agua, donde forma densas masas que cubren un 85% de su superficie. En las orillas se presenta principalmente lentejuela (GEH, 2003).

La vegetación acuática corresponde a la que existió en los antiguos lagos de Anáhuac y comprende 35 especies acuáticas de 21 familias, entre las que destacan 2 especies comestibles, 4 medicinales y 16 forrajeras de las que se alimentan peces y aves acuáticas (Lot, 2005).

3.8 Principales especies de fauna

Entre la fauna silvestre que habita en la laguna de Tecocomulco se encuentran los charales *Chirostoma jordani* y la carpa *Ciprinus carpio*.

Los anfibios que se han identificado son la *Rana montezumae* y la *Rana pipiens*; así como, los ajolotes *Ambystoma mexicanum* y *Ambystoma tigrinum* (con status de protección especial), que forman parte de la dieta de los pobladores del lugar.

La mayor diversidad faunística la representa la ornitofauna. De un total de 120 especies de aves en la cuenca, 42 especies son acuáticas (29 migratorias y 13 residentes) y 78 son terrestres, entre las que se encuentran el zanate *Quiscalus mexicanus* y el tordo charretero *Agelaius phoeniceus*, quienes habitan en la laguna todo el año.

Otras aves de importancia son las de la familia Ardeidae (garzas), con 9 especies, de las cuales, las más abundantes durante la época migratoria son: la garcita blanca dedos amarillos *Egretta tula* y el garzón blanco *Casmerodius albus* con poblaciones de entre 200 y 60, respectivamente.

Están presentes 14 especies de patos de la familia Anatidae. En la época de migración los más abundantes son la cerceta de alas azules *Anas discors* y el pato tepalcate *Oxyura jamaicensis* con poblaciones de 3,000 a 5,000 individuos. Destaca, el pato mexicano *Anas diazi*, catalogado por la legislación ambiental (Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2011) en estatus de protección.

Otras aves de interés cinegético presentes en la laguna de Tecocomulco son las gallaretas *Fulica americana*, y las gallinas de agua o "carmelitas" *Gallinula chloropus*, que durante la época migratoria, suman más de 3,000 individuos con algunas poblaciones pequeñas que residen en la laguna. En la época de primavera-verano se reproducen entre los tulares.

Entre los mamíferos encontrados en las áreas circundantes de la laguna, destaca la mangosta o comadreja *Mustela frenata* (Jiménez *et al.*, 2005).

3.9 Humedales de Ramsar

El Convenio Internacional de Ramsar (1999) estipula los criterios, basados en términos ecológicos, botánicos, zoológicos, limnológicos o hidrológicos, para la selección de humedales de importancia internacional. Estos criterios incluyen los siguientes grupos:

GRUPO A. Sitios que comprenden tipos de humedales representativos, raros o únicos.

Criterio 1. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si contiene un ejemplo representativo, raro o único de un tipo de humedal natural o casi natural hallado dentro de una región biogeográfica apropiada.

GRUPO B. Sitios de importancia internacional para conservar la diversidad biológica.

Criterio 2. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si sustenta especies vulnerables, en peligro, en peligro crítico o comunidades ecológicas amenazadas.

Criterio 3. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si sustenta poblaciones de especies vegetales y/o animales importantes para mantener la diversidad biológica de una región biogeográfica determinada.

Criterio 4. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si sustenta especies vegetales y/o animales cuando se encuentran en una etapa crítica de su ciclo biológico, o les ofrece refugio cuando prevalecen condiciones adversas.

Criterio 5. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si sustenta de manera regular una población de 20,000 o más aves acuáticas.

Criterio 6. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si sustenta de manera regular el 1% de los individuos de una población de una especie o subespecie de aves acuáticas.

Criterio 7. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si sustenta una proporción significativa de las subespecies, especies o familias de peces autóctonas, etapas del ciclo biológico, interacciones de especies y/o poblaciones que son representativas de los beneficios y/o los valores de los humedales y contribuyen de esa manera a la diversidad biológica del mundo.

Criterio 8. Un humedal deberá ser considerado de importancia internacional si es una fuente de alimentación importante para peces, es una zona de desove, un área de desarrollo y crecimiento y/o una ruta migratoria de la que depende la existencia de peces dentro o fuera del humedal.

Con base a lo anterior, la laguna de Tecocomulco se considera un humedal de importancia internacional ya que clasifica dentro de los criterios 1, 2 y 4.

CRITERIO 1. La laguna de Tecocomulco se considera como el último humedal relicto del antiguo sistema lacustre que predominó en la Cuenca del Valle de México y es el elemento regulador para la recarga de los acuíferos de la región (GEH, 2003).

CRITERIO 2. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001 (tiene por objeto identificar las especies o poblaciones de flora y fauna silvestres en riesgo en la República Mexicana, mediante la integración de las listas correspondientes, así como el establecimiento de los criterios de

inclusión, exclusión o cambio de categoría de riesgo para las especies o poblaciones, mediante un método de evaluación de su riesgo de extinción) en México se cuenta con 197 especies de anfibios y con 371 especies de aves bajo algún estatus de protección. En la laguna de Tecocomulco habitan 3 especies en peligro de extinción: el ajolote *Ambystoma mexicanum*, la *Rana montezumae* y el pato real *Chairina moschata*; y 3 en estatus de protegidas: el pato mexicano *Anas diazi*, el pato golondrino *Anas acutatzitzihoa* y el pato boludo *Caythia affinis*.

CRITERIO 4. Su importancia estriba en ser un lugar de nidificación, reproducción y paso de gran cantidad de especies de aves acuáticas y terrestres, encontrando más de una decena de aves migratorias. De acuerdo con el Programa Integral de Protección, Conservación, Restauración y Aprovechamiento de la Cuenca de Tecocomulco (SEMARNAT, 2001), en la laguna se cuenta con 48 especies de aves terrestres identificadas, pertenecientes a 8 ordenes y 21 familias, de las cuales 27 son residentes y 20 son migratorias de invierno y solo una, el *Horondo rustica* es migratoria de verano. Destaca, durante la época migratoria: la garcita blanca dedos amarillos, el garzón blanco, la cerceta de alas azules y el pato tepalcate.

3.10 Vías de acceso

El sitio se ubica en la parte sureste del estado de Hidalgo dentro de los municipios de Tepeapulco, Apan y Cuautepec de Hinojosa. La vía de acceso a esta región está formada por caminos pavimentados. Se puede llegar por la autopista México-Tulancingo Núm.132 pasando por las Pirámides de Teotihuacán y por la vía libre México-Pirámides, desviándose hacia Otumba, siguiendo la trayectoria hasta Ciudad Sahagún y después a Tepeapulco. Una vez ahí, se debe salir de esta ciudad por la carretera estatal Núm.115 a Epazoyucan, e inmediatamente tomar la estatal Núm.47 Tepeapulco-Tulancingo, que recorre toda la Subcuenca de Tecocomulco. Hacia Pachuca se comunica mediante la carretera estatal Núm.88. Además, hay otros caminos que unen ciudades importantes como Apan, Chignahuapan, Singuilucan y Tlaxco (Huizar *et al.*, 2005).

3.11 Aspectos culturales

La principal actividad económica de la población es la agricultura, complementada con ganadería ovina, vacuna y porcina.

Los productos provenientes de la agricultura de temporal son: cebada, avena (ambos productos para el mercado exterior), maíz y papa.

Otras actividades de importancia local son la turística y recreativa, que incluyen: los paseos en lancha y la caza de pato, garza y rana.

Hasta 1990, la producción de pulque fue una actividad económica importante en esta zona. Hoy día sólo se practica a nivel familiar. El abandono de esta actividad promovió la erosión del suelo debido a la desaparición masiva de superficies de magueyes con fines agrícolas.

El recurso forestal se explota para la construcción, como energético y para comerciar la madera que así se obtiene.

Los usos del agua en esta zona son principalmente: doméstico y de abrevadero. Se extrae agua subterránea para su utilización en las localidades de Tepeapulco, Ciudad Sahagún, Singuilucan, entre otras (Huizar et al., 2001).

3.12 Fuentes de contaminación

El cambio de uso de suelo forestal, de magueyes y de matorral, por el de agricultura, es el origen del fuerte proceso de erosión que afecta la Subcuenca de Tecocomulco. Su utilización inadecuada causa importantes efectos en el sistema hidrológico local, pues no sólo ocasiona la pérdida del mismo, sino que a su vez propicia el aumento del escurrimiento superficial y de la evapotranspiración. Lo anterior se traduce en una disminución del potencial de recarga de la laguna.

Un factor adicional es el correspondiente a la aplicación de agroquímicos, en donde destacan los pesticidas y fertilizantes, que representan una potencial fuente de contaminación tanto para el agua superficial y subterránea, como para la fauna que temporalmente y de forma perenne habita en la laguna.

Respecto a la calidad del agua, sus principales fuentes de contaminación son: mesófilos y coliformes provenientes de heces fecales de animales y humanos; descargas de agua residual de casas y restaurantes ubicados en torno a la laguna; la existencia de fosas sépticas; incorporación de desechos de granjas agropecuarias y piscícolas; elementos traza provenientes del intemperismo de rocas superficiales, el arrastre de sedimentos y su aporte a partir de los caudales que alimentan la laguna; procesos de oxidación-reducción que condicionan las concentraciones de SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Fe, Mn y As; e hidrocarburos procedentes de los motores de las lanchas y basura (Huizar *et al.*, 2001; CONAGUA, 2002; CCLT, 2007).

3.13 Estudios relacionados con la laguna de Tecocomulco

En 1978, Lot-Helgueras y Novelo-Retana realizaron las guías botánicas de excursiones en México, incluyendo un inventario de la flora acuática de la laguna de Tecocomulco.

Las investigaciones previas, dentro de las cuales se incluye a Tecocomulco, son básicamente de índole geológico y de carácter regional, dentro de las cuales se pueden mencionar las siguientes: Mooser *et al.* (1974) y Mooser (1975) muestran dataciones de rocas volcánicas en la parte oriental del SVM. Demant (1978) subdivide el SVM en regiones petroquímicas y describe la evolución del mismo. Robin (1976, 1978) explica la existencia del volcanismo básico en la parte oriental de México y su relación con la subducción. Ledezma-Guerrero (1987) realiza la geología de esta zona a una escala 1:100,000. Castro-García y Córdoba-Méndez (1994) describen la petrografía de las rocas volcánicas del límite noreste de la Subcuenca.

En 2001, Huizar *et al.* realizaron una evaluación hidrogeológica de la Subcuenca de Tecocomulco, estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. En esta investigación, se encontró que el agua contiene concentraciones importantes de cationes y aniones como: Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} . Los SDT presentaron dos rangos: de 60 a 300 mg/L y de 300 a 700 mg/L. Los NO_3^- y SO_4^{2-} estuvieron presentes en concentraciones pequeñas. Los elementos traza detectados fueron: Fe, Zn, Mn, Ni, Cu y

Pb. Se encontró la presencia de microorganismos tales como: *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* y *Citrobacter freundii*.

Por su parte, Campos-Enríquez *et al.* (2003) realizaron un estudio sobre la estructura de la sub-superficie del acuífero de Tecocomulco y su relación con la actividad tectónica regional. En base a los estudios mencionados anteriormente, la UNAM publicó el libro: La laguna de Tecocomulco: Geología de un desastre, donde se abordan los siguientes temas: el espacio físico, hidrología, geología, inventario de flora acuática y terrestre y fauna silvestre y acuática (Huizar *et al.*, 2005).

Bustos-Vázquez *et al.* (2006) realizaron el estudio de bioacumulación de metales pesados en la carpa *Cyprinus carpio* de la laguna de Tecocomulco, se detectó la presencia de As y Al.

En el año 2007, Aguilar-Martínez realizó un estudio sobre la determinación de pesticidas organoclorados en *Cyprinus carpio*, se detectó: DDT, DDE, Aldrín, Dieldrín, Endrín, Endosulfán sulfato, Endrín aldehído y Endosulfán 2, lo que representa una señal de contaminación en este cuerpo de agua.

En el año 2009, se publicó en el libro, “Estudios Ambientales realizados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo” dos capítulos relacionados con la evaluación de metales en agua y sedimento de la laguna, donde se reportó la presencia de Cd, Co, Cr, Pb, Mn y Al (Delgadillo *et al.*, 2009; Romo-Gómez *et al.*, 2009).

En el 2010, en la UAEH, a través del proyecto “Helmintos parásitos de los vertebrados y calidad ambiental del lago Tecocomulco, Hidalgo”, se evaluó la calidad del agua y se estableció un inventario de flora y fauna, con la finalidad de generar el rescate ecológico para el manejo y explotación de recursos en beneficio de la comunidad que habita en los alrededores del lugar.

Así mismo, se realizó el proyecto “Análisis químico y su correlación con los usos y efectos ambientales de plantas del estado de Hidalgo”, en el que se determinó la capacidad de acumulación de metales pesados en plantas acuáticas de la laguna de Tecocomulco, a partir del cual se desarrolló el presente trabajo de investigación.

En el 2007, la CCLT realizó una serie de medidas para el aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos del área, incluyendo la introducción de nuevas tecnologías, el desarrollo de recursos humanos y la participación de los ciudadanos; para solucionar la problemática ambiental en este cuerpo de agua, dentro de las cuales se encuentran:

1. Plan rector de conservación de suelo y agua. Para atender el problema de la pérdida de suelo en las partes altas de la cuenca y disminuir el arrastre de sedimentos hacia la laguna de Tecocomulco, se gestionó y dio seguimiento a la implementación de cuatro parcelas demostrativas de prácticas mecánicas vegetativas de conservación de suelo y agua, consistentes en la construcción de terrazas individuales, zanjas trincheras, presas de gavión y de piedra acomodada y plantación de maguey y de árboles frutales.

2. Programa de reforestación y manejo forestal. Para avanzar en la reforestación de la cuenca, que es una práctica vegetativa para la protección y conservación de suelo, se realizó la gestión de 5,000 pinos patula y 7,300 plantas de maguey, que fueron entregados, distribuidos y plantados.
3. Programa integral de saneamiento ambiental. Como parte de las estrategias para impulsar el saneamiento integral de la laguna de Tecocomulco, se realizan acciones en tres rubros:
 - 1) Tratamiento de aguas residuales domésticas de los centros de población ubicados en el entorno de la laguna mediante la construcción de infraestructura de saneamiento.
 - 2) Desinfección del agua para uso y consumo humano en los sistemas de agua potable y en el hogar.
 - 3) Limpiar parcialmente el cuerpo de agua de malezas acuáticas.

Capítulo 4. Metodología

4.1 Muestreo de agua y sedimento

Se distribuyeron 5 estaciones de muestreo (figura 6 y tabla 5). La toma de alícuotas se realizó en 4 épocas del año: marzo, junio, septiembre y diciembre de 2009; con la finalidad de conocer las variaciones fisicoquímicas del agua entre las estaciones de lluvia y estiaje.

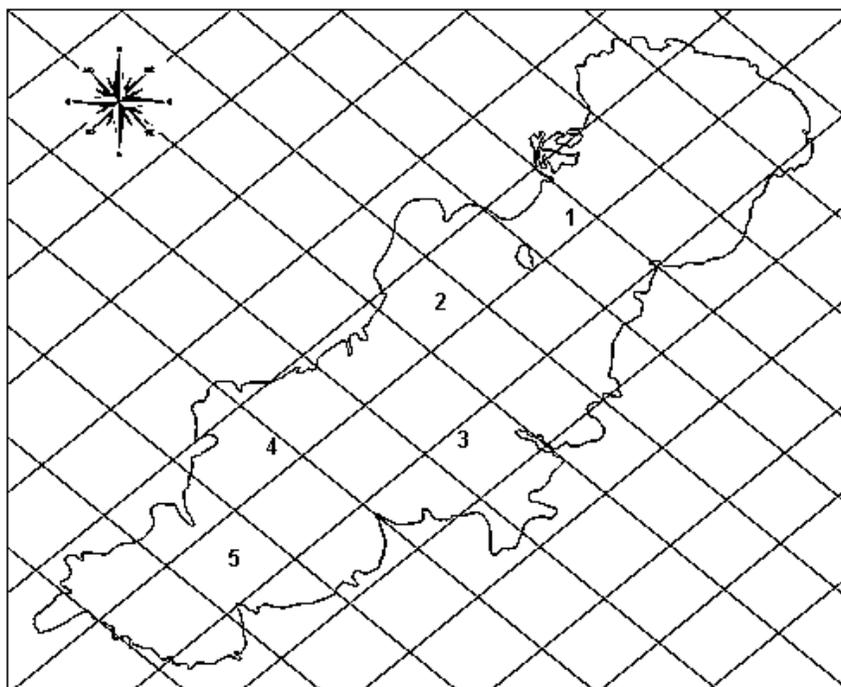


Figura 6. Laguna de Tecocomulco, Hidalgo, México. Estaciones de muestreo.

Tabla 5. Coordenadas geográficas de las estaciones de muestreo.

Sitios de muestreo	Coordenadas geográficas					
	Grados, minutos, segundos		Grados decimales		UTM (WGS84)	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	X	Y
Sitio1	19°52'54.06" N	98°22'20.17" W	19.88168	-98.37226	565713.88	2198510.86
Sitio 2	19°52'18.61" N	98°23'11.46" W	19.87183	-98.38651	564226.26	2197415.66
Sitio 3	19°51'26.30" N	98°23'07.75" W	19.85730	-98.38548	564339.95	2195808.01
Sitio 4	19°51'14.67" N	98°24'22.53" W	19.85407	-98.40625	562166.41	2195442.89
Sitio 5	19°50'34.57" N	98°25'03.93" W	19.84293	-98.41775	560966.45	2194205.80

El manejo de las muestras de agua se realizó de acuerdo a lo establecido por la Norma Mexicana NMX-AA-014-1980. Las muestras se conservaron a $4\pm 2^{\circ}\text{C}$. La tabla 6 indica los principales criterios

considerados para la selección del envase, volumen mínimo de colecta (por alícuota), preservación y tiempo máximo de almacenamiento.

Tabla 6. Criterios de toma de muestras para parámetros fisicoquímicos del agua.

Parámetro	Contenedor	Volumen mínimo de colecta, mL	Preservación	Tiempo máximo de almacenamiento
Temperatura	I	I	I	0
CE	I	I	I	0
OD	V, botella de DBO	300	I	30 min
pH	I	I	I	0
N-NO ₃ ⁻	P, V	500	R	48 hrs.
N-NO ₂ ⁻	P, V	200	R	24 hrs.
N-NH ₄ ⁺	P	1,000	R y H ₂ SO ₄ a pH<2	7 días
NTK	P	1,000	R y H ₂ SO ₄ a pH<2	7 días
SD	P	500	R	7 días
Turbiedad	P, V	100	R	24 hrs.
DQO	P, V	100	R y H ₂ SO ₄ a pH<2	28 días
DBO	P, V	1,000	R	24 hrs.
Alcalinidad Total	P, V	500	R	24 hrs.
PT	P	500	R	28 días
Clorofila- <i>a</i>	P	1,000	R	24 hrs.
PRS	P	100	R	24 hrs.

V: vidrio de borosilicato, P: polietileno, I: *in situ*, R: refrigeración.

Las muestras de sedimento se tomaron con una draga tipo Ekman, las cuales fueron almacenadas en bolsas plásticas negras y mantenidas en refrigeración hasta su traslado al laboratorio. Ahí, se extendieron sobre charolas de polietileno y se secaron a temperatura ambiente por dos semanas. Se retiraron con anticipación, las rocas y el material orgánico visible.

El sedimento seco se molió en morteros de ágata y se pasó a través de un tamiz de 2 mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable.

4.2 Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua

Los parámetros fisicoquímicos se determinaron según lo establecen las Normas Mexicanas:

NMX-AA-007-SCFI-2000	Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-093-SCFI-2000	Determinación de conductividad electrolítica.
NMX-AA-012-SCFI-2001	Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-008-SCFI-2000	Determinación de pH.
NMX-AA-079-SCFI-2001	Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-099-SCFI-2006	Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales.
NMX-AA-026-SCFI-2001	Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-036-SCFI-2001	Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-034-SCFI-2001	Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-030-SCFI-2001	Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-028-SCFI-2001	Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-029-SCFI-2001	Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-072-SCFI-2001	Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-038-SCFI-2001	Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
NMX-AA-051-SCFI-2011	Determinación de metales pesados por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.

4.3 Determinación de dureza cálcica y magnésica

Se transfirió a un matraz Erlenmeyer una muestra de 50 mL de agua. Se ajustó el pH entre 12 y 13 con una solución de NaOH 0.1 M. Se añadió 0.2 g de indicador murexida y se tituló con una solución de EDTA 0.01 M hasta observar un vire de rosa a lila o purpura. La dureza magnésica se calculó a través de la diferencia entre la dureza total y la dureza cálcica (Chávez-Cárdenas *et al.*, 2006).

4.4 Determinación de Fósforo Reactivo Soluble (PRS)

A una muestra de 20 mL de agua filtrada se le añadieron 2 mL del reactivo 1 y 0.4 mL del reactivo 2 seguida de una agitación moderada. Se colocó la muestra en la oscuridad por 45 min. Transcurrido este tiempo, se midió la intensidad de la coloración con ayuda de un espectrofotómetro UV/Vis a 880 nm (Elosegi y Sabater, 2009).

Reactivo 1: Solución A. Disolver 0.2 g de $C_8H_4K_2O_{12}Sb_2 \cdot 3H_2O$ en 500 mL de agua desionizada. Añadir 1 mL de H_2SO_4 . Pesar 11.2 g de $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ y diluirlo en la Solución A. Agitar continuamente para facilitar la completa disolución del molibdato. Aforar la solución a 1,000 mL.

Reactivo 2: disolver 27 g de $C_6H_8O_6$ en 500 mL de agua desionizada.

Solución madre de fosfato de 1,000 mg/L de $PO_4^{3-}P$: pesar 4.390 g de K_2HPO_4 y aforar a 1,000 mL con agua desionizada.

4.5 Determinación de Clorofila-a

Una muestra de 500 mL de agua se filtró a través de un filtro de vidrio Whatman GF/C de 25 mm de diámetro. La clorofila se extrajo con 50 mL de CH_3COCH_3 al 90% durante 48 hr. en la oscuridad (Thiemann y Kaufmann, 2000). A partir de la medida de la absorbancia a diferentes longitudes de onda, se calculó la concentración, a través de la siguiente ecuación matemática:

$$\text{Clorofila} - a \left(\frac{\mu g}{L} \right) = [(26.7)(E_{664nm} - E_{750nm})(V_{acetona})] / V_{filtrado}$$

Donde:

$V_{acetona}$ = volumen de acetona empleado en la determinación

$V_{filtrado}$ = volumen de agua empleado en el análisis

E_{664nm} = lectura de la absorbancia a 664 nm

E_{750nm} = lectura de la absorbancia a 750 nm

4.6 Índice de Estado Eutrófico-TSI

Para la evaluación del TSI se determinó la concentración de PT ($\mu g/L$) y clorofila-a ($\mu g/L$). Los cálculos se realizaron a través de las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$TSI = (14.42 \ln PT) + 4.14$$

$$TSI = (9.81 \ln Clora) + 30.6$$

Este índice reduce el estado trófico de un lago o laguna a un valor (en una escala de 0 a 100), en un intento para evitar la subjetividad inherente a los términos oligotrófico, mesotrófico y eutrófico. La tabla 7 resume la escala de valores del estado trófico para un cuerpo de agua (Carlson y Simpson, 1996).

Tabla 7. Escala de valores de estado eutrófico en los cuerpos de agua.

Estado Eutrófico	TSI	PT ($\mu\text{g/L}$)	Clorofila- <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)
Eutrófico	0	0.75	0.04
Oligotrófico (TSI<30)	10	1.5	0.12
	20	3	0.34
	30	6	0.94
	40	12	2.6
Mesotrófico (30<TSI<60)	50	24	6.4
	60	48	20
	70	96	56
Eutrófico (60<TSI<90)	80	192	154
	90	384	427
	100	768	1183
Hipereutrófico (90<TSI<100)			

4.7 Estado eutrófico propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico-OECD

Para la determinación del estado trófico mediante la secuencia de categorías tróficas propuestas por la OECD (2006) se midió la concentración de PT y clorofila-*a* (tabla 8).

Tabla 8. Escala de valores de estado eutrófico propuesto por la OECD.

Parámetro	Estado Eutrófico				
	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
PT ($\mu\text{g/L}$)	<4.0	4.0-10	10-35	35-100	>100
Clorofila- <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	<2.5	2.5-8.0	8.0-25	25-75	>75

4.8 Estado trófico TRIX

Para la determinación del índice de estado trófico TRIX se determinó la concentración de clorofila-*a*, el % OD, la concentración de PRS, N-NH_4^+ , N-NO_2^- y N-NO_3^- (Vollenweider *et al.*, 1998). Los cálculos se realizaron a través de la ecuación matemática:

$$TRIX = \frac{\text{Log}_{10} [(Clora)(|\%Od|)(NID)(PRS)] + K}{m}$$

Donde:

Factores de productividad

Clora=concentración de clorofila-*a* (µg/L)

|\%Od|=valor absoluto de la desviación del porciento de saturación de oxígeno disuelto, es decir $|100 - \%Od|$

Factores nutricionales

NID=Nitrógeno Inorgánico Disuelto calculado como: $N-NO_3^- + N-NO_2^- + N-NH_4^+$ (µg/L)

PRS=Fósforo Reactivo Soluble (µg/L)

La constante $K=1.5$ y $m=12/10=1.2$, son los valores de escala introducidos para ajustar el valor límite más bajo del índice y la extensión de la escala trófica relacionada, de 0 a 10 unidades *TRIX* (tabla 9).

Tabla 9. Escala de índice de estado trófico *TRIX* y calidad del agua.

Escala <i>TRIX</i>	Estado de la calidad del agua	Características del agua
1-4	Alta	Pobremente productiva ^a , nivel trófico bajo.
4-5	Buena	Moderadamente productiva, nivel trófico medio.
5-6	Mala	Entre moderada y altamente productiva, nivel trófico alto.
6-10	Pobre	Altamente productiva, nivel trófico el más alto.

(Vollenweider *et al.*, 1998). ^aProductividad: cantidad de carbono inorgánico convertido a materia orgánica por organismos autotróficos.

4.9 Mapas temáticos

Para la interpretación e integración de la información geográfica y estadística obtenida de las determinaciones fisicoquímicas del agua y la determinación del estado trófico de la laguna de Tecocomulco, se utilizó el programa *IRIS 4.0.2* con el que se crearon mapas temáticos cuantitativos.

4.10 Determinación de parámetros fisicoquímicos en sedimento

Los parámetros fisicoquímicos en las muestras de sedimento se determinaron según lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, de acuerdo a los métodos:

- AS-02 pH medido en agua.
- AS-07 Contenido de materia orgánica.
- AS-14 Contenido de micronutrientes disponibles y metales contaminantes.
- AS-18 Conductividad eléctrica en el extracto de saturación.

4.11 Extracción secuencial de metales en sedimentos

Se utilizó una modificación de la técnica propuesta por Hall en 1996 (tabla 10). Las muestras de sedimento se secaron a 50°C por 24 hrs. La cantidad inicial de sedimento fue de 1.000 ± 0.005 g. Al término de cada etapa del proceso, se lavó el residuo con 10 mL de agua desionizada. El extracto y el agua de lavado se vertieron en el mismo contenedor. El volumen final de la solución fue de 50 mL. La concentración de metales, en las diversas fracciones, se determinó mediante EAA.

Tabla 10. Etapas de procedimiento de extracción secuencial (Zakir y Shikazono, 2008).

Fracción	Procedimiento
Intercambiables	Adicionar 20 mL de MgCl ₂ 1 M (pH=7; ajustar con NaOH 0.1 M), agitar por 1 hr.
Asociados a carbonatos	Al residuo de la fracción anterior, adicionar 20 mL de NaOAc 1 M (pH=5; ajustar con HOAc), agitar por 6 hrs.
Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos	Al residuo de la fracción anterior, adicionar 20 mL de NH ₂ OH.HCl 0.25 M en HCl 0.25 M. Calentar por 2 hrs. a 60°C con agitación continua.
Asociados a óxidos de Fe cristalinos	Al residuo de la fracción anterior, adicionar 30 mL de NH ₂ OH.HCl 1 M en HOAc al 25%. Calentar por 2 hrs. a 90°C con agitación continua.
Asociados a la materia orgánica	Al residuo de la fracción anterior, adicionar 750 mg de KClO ₃ y 15 mL de HCl 12 M, agitar. Después de 30 min adicionar 25 mL de agua y 10 mL de HNO ₃ 4 M. Calentar a 90°C por 20 min.
Asociados a silicatos y residuales	Al residuo de la fracción anterior, adicionar 2 mL de HNO ₃ concentrado y calentar a 200°C a sequedad. Dejar enfriar. Adicionar 2 mL de HCl concentrado, 5 mL de HClO ₄ concentrado y 5 mL de HNO ₃ concentrado; calentar a 120°C a sequedad. Dejar enfriar. Adicionar 1 mL de HCl concentrado, 3 mL de HNO ₃ concentrado y 3 mL de agua. Recuperar extracto.

4.12 Colecta de macrófitas acuáticas

Para la colecta de las macrófitas acuáticas ubicadas en zonas profundas, se requirió el uso de una lancha. Su recogida se efectuó de forma manual. Las hidrófitas se separaron de inmediato en bolsas de plástico, anotando los principales datos de campo (fecha, hora de muestreo, nombre y forma de vida) y se realizaron las muestras de herbario para la confirmación taxonómica de las especies.

4.13 Determinación de metales pesados en macrófitas acuáticas

Las especies individuales se lavaron con agua de la llave y, posteriormente, con agua destilada. Se secaron a temperatura ambiente durante 30 días y se separaron las partes aéreas de la raíz. Las muestras secas se molieron y homogeneizaron (Vardanyan e Ingole, 2006). Se pesó 0.2 g de planta pretratada y se mineralizó con 50 mL de HNO₃. Después de la digestión, se añadió agua destilada a los restos obtenidos, se filtró y ajustó a 100 mL con agua desionizada (Dilek, 2007). La concentración de los metales se determinó por triplicado mediante EAA. Se prepararon, en matriz nítrica al 5%, las correspondientes curvas de calibración partiendo de estándares de referencia.

4.14 Extracción de compuestos orgánicos

El material vegetal seco, molido y pesado, se sometió a un proceso de extracción sucesiva a reflujo (~40 °C) con diferentes disolventes en orden de polaridad ascendente, por un periodo de 4 hrs., tal como se indica en la figura 7. Tras el proceso de reflujo, el disolvente se filtró y se concentró a temperatura y presión reducida.

4.15 Determinación de la actividad quelante de compuestos orgánicos

Solución de Pb²⁺ (30 ppm): disolver 0.0119 g de Pb(NO₃)₂ en 250 mL de agua desionizada.

Solución de EDTA: disolver 0.0627 g de EDTA (sal disódica) en 250 mL de agua desionizada.

Solución de compuesto orgánico: añadir a 0.0250 g de extracto crudo o compuesto aislado, 1.0 mL de NH₄OH y aforar a 25 mL con agua desionizada.

Para la determinación de la actividad quelante de los extractos crudos y compuestos aislados, se preparó una mezcla constituida por: 1.0 mL de la solución de Pb²⁺ (30 ppm), 1 mL de la solución de EDTA y 1 mL de la solución de compuesto orgánico (figura 8). Se midió la absorbancia a una $\lambda=214$ nm con ayuda de un espectrofotómetro Uv-Vis. La cuantificación de la capacidad quelante se realizó a partir de la curva de calibración preparada a distintas concentraciones de Pb²⁺ (10, 20, 30, 40, 50 y 60 ppm).

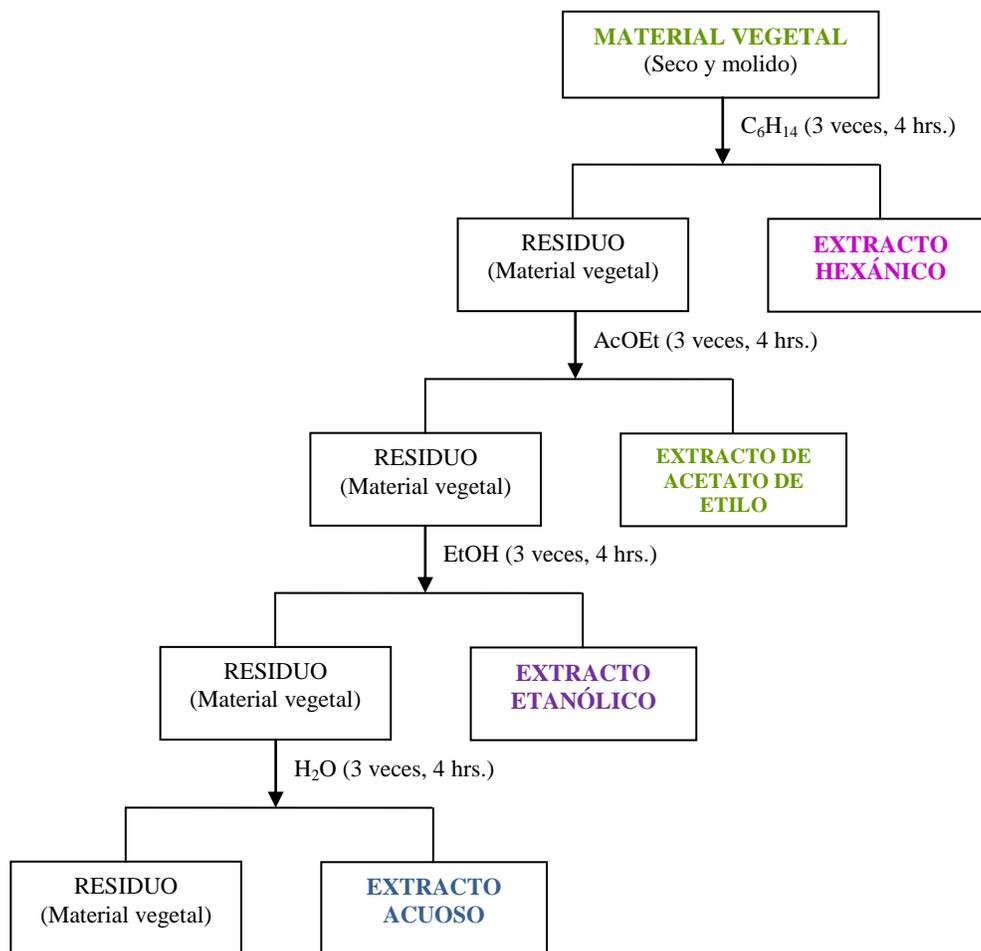


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de extracción sucesiva a reflujo en orden ascendente de polaridad.

CURVA DE CALIBRACIÓN



Blanco
1 mL EDTA
1 mL de NH₄OH
1 mL H₂O desionizada



Curva de calibración
1 mL EDTA
1 mL de NH₄OH
1 mL Pb²⁺

DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD QUELANTE DE COMPUESTOS ORGÁNICOS



Blanco
1 mL EDTA
1 mL de extracto o
compuesto aislado
1 mL H₂O desionizada



Muestra
1 mL EDTA
1 mL de extracto o
compuesto aislado
1 mL Pb²⁺

Figura 8. Esquema de preparación de mezclas para determinación de actividad quelante.

4.16 Métodos cromatográficos

4.16.1 Cromatografía en columna

El extracto etanólico del *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. se disolvió en una mezcla $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ 1:1. Posteriormente, se filtró y la fracción insoluble (700 mg) se separó por cromatografía en columna (10 mm X 80 cm) utilizando 4.5 g de gel de sílice marca Merck (230-400 mesh ASTM) tamaño de partícula 0.063-0.2 mm. La fase móvil estuvo constituida por mezclas de $\text{CHCl}_3/\text{CH}_3\text{OH}$, en orden ascendente de polaridad (39/1, 38/2, 36/4, 34/6, 32/8, 30/10).

4.16.2 Cromatografía en capa fina

La cromatografía en capa fina se realizó en cromatofolios de Al recubiertos con gel de sílice 60 F₂₅₄ espesor de 0.2 mm. La fase móvil estuvo constituida por diferentes sistemas de elución.

Se cargó cada fracción sobre su respectivo punto de partida, el cual estuvo a 0.5 cm por encima del borde inferior. La separación entre cada aplicación fue de 0.5 cm. El recorrido del eluyente fue de 4 cm.

Los sistemas de elución estuvieron formados por mezclas de diversos disolventes (C_6H_{14} , AcOEt, CH_3OH). Como agentes reveladores se utilizaron: I_2 , solución de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ al 10%, luz UV o $(\text{NH}_4)_4\text{Ce}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en solución de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ al 5%.

4.17 Resonancia Magnética Nuclear

Los espectros de RMN de ^1H (400 MHz) y ^{13}C (100 MHz) fueron obtenidos en un espectrómetro Jeol Eclipse 400, utilizando TMS como referencia interna. Las muestras se solubilizaron en CDCl_3 , D_2O o DMSO-d_6 , según se requirió en cada caso.

Capítulo 5. Resultados y discusión

5.1 Muestreo

La adquisición de muestras, de agua y sedimento, se realizó el 06 de marzo, 05 de junio, 06 de septiembre y 02 de diciembre de 2009. Durante el periodo de estudio, la temporada de estiaje fue inusualmente larga. La época de lluvia se presentó a principios del mes de septiembre. Las alícuotas se depositaron en recipientes apropiados y se mantuvieron a 4°C para evitar su contaminación, favorecer la conservación de las características del lugar de procedencia y evitar posibles alteraciones químicas durante el lapso de la toma de muestra y su análisis.

5.2 Parámetros fisicoquímicos del agua

La tabla 11 resume los resultados encontrados para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua.

La temperatura promedio del recurso hídrico mostró una distribución espacio-temporal con valores máximos registrados durante el mes de junio y mínimos en invierno (figura 9). La temperatura varió entre 13.1 y 21.2°C. El carácter poco profundo (aproximadamente 70 cm) de la laguna, sugiere que gran parte del año presenta homogeneidad térmica en profundidad.

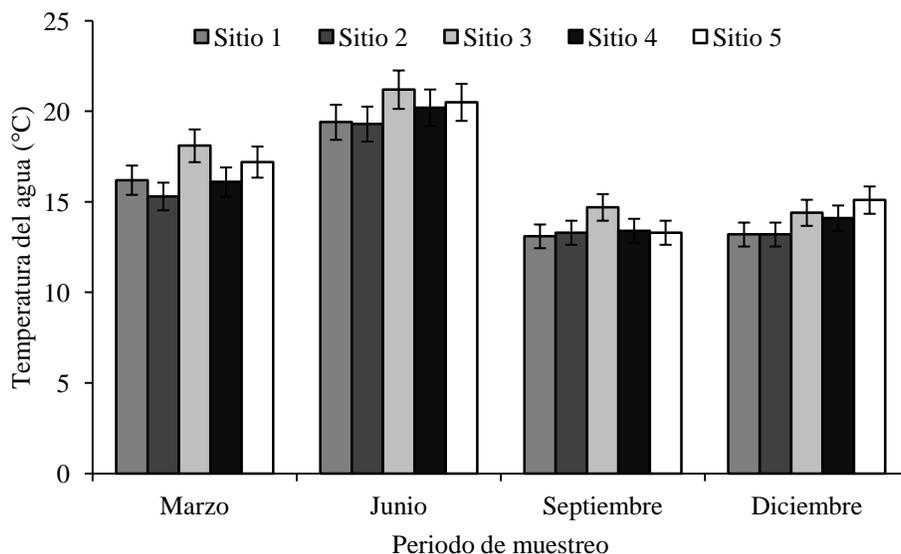


Figura 9. Distribución espacio-temporal de la temperatura del agua.

La CE promedio para los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre, fue de 253.11, 327.16, 196.76 y 211.15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, que está asociada con la concentración de SD (193.68, 261.85, 186.02 y 189.65 mg/L), la temperatura y la evaporación. Los mayores valores de CE y SD se presentaron durante el mes de junio, cuando la temperatura fue más elevada (figuras 10 y 11).

Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna de Tecocomulco.

Parámetro	Normatividad Mexicana	EPA	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
				Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
Dureza cálcica (mg CaCO ₃ /L)	Sin parámetro establecido.		Sitio 1	127.980 ± 0.014	132.960 ± 0.103	108.000 ± 0.371	105.000 ± 0.047	123.485
			Sitio 2	101.960 ± 0.030	92.960 ± 0.035	83.960 ± 0.231	68.400 ± 0.127	86.820
			Sitio 3	88.960 ± 0.547	91.960 ± 0.075	71.960 ± 0.094	68.000 ± 0.233	80.220
			Sitio 4	125.980 ± 0.076	123.960 ± 0.154	95.960 ± 0.053	82.000 ± 0.012	106.975
			Sitio 5	143.960 ± 0.019	121.960 ± 0.520	87.960 ± 0.196	98.600 ± 0.014	113.120
			Media	121.768	112.760	89.568	84.400	
Dureza magnésica (mg CaCO ₃ /L)	Sin parámetro establecido.		Sitio 1	20.741 ± 0.127	27.980 ± 0.098	32.001 ± 0.129	31.010 ± 0.031	27.933
			Sitio 2	25.440 ± 0.098	34.540 ± 0.097	25.780 ± 0.092	25.600 ± 0.009	27.840
			Sitio 3	28.320 ± 0.202	39.780 ± 0.193	32.010 ± 0.071	20.100 ± 0.027	30.053
			Sitio 4	30.981 ± 0.100	40.201 ± 0.042	34.001 ± 0.021	28.000 ± 0.017	33.296
			Sitio 5	25.320 ± 0.103	41.320 ± 0.023	26.980 ± 0.210	31.210 ± 0.063	31.208
			Media	26.160	36.764	30.154	27.184	
Dureza total (mg CaCO ₃ /L)	Criterio ecológico para: agua potable (500 mg/L).	0-65 mg/L blanda; 65-150 mg/L moderadamente dura; 150-300 mg/L dura; >300 mg/L muy dura.	Sitio 1	168.720 ± 0.078	160.940 ± 0.152	140.000 ± 0.241	136.000 ± 0.127	151.415
			Sitio 2	127.400 ± 0.243	127.500 ± 0.034	109.740 ± 0.226	94.000 ± 0.154	114.660
			Sitio 3	117.280 ± 0.467	131.740 ± 0.143	83.960 ± 0.453	88.000 ± 0.210	105.245
			Sitio 4	156.960 ± 0.165	164.160 ± 0.078	129.960 ± 0.097	110.000 ± 0.095	140.270
			Sitio 5	169.280 ± 0.321	163.280 ± 0.056	114.940 ± 0.283	129.800 ± 0.099	144.325
			Media	147.928	149.524	115.720	111.560	
¹ Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	Criterio ecológico para: agua potable (400 mg/L).	Criterio ecológico para: uso humano (400 mg/L); protección de la vida acuática (mínimo requerido de 20 mg/L).	Sitio 1	187.577 ± 0.354	190.300 ± 0.239	157.979 ± 0.931	150.234 ± 0.127	171.522
			Sitio 2	131.672 ± 0.578	130.603 ± 0.059	117.346 ± 0.176	110.983 ± 0.276	122.651
			Sitio 3	125.525 ± 0.701	138.672 ± 0.195	92.605 ± 0.315	110.542 ± 0.254	116.836
			Sitio 4	168.345 ± 0.536	171.493 ± 0.247	149.953 ± 0.097	120.998 ± 0.136	152.697
			Sitio 5	175.438 ± 0.157	177.577 ± 0.189	152.166 ± 0.055	140.937 ± 0.203	161.529
			Media	157.714	161.729	134.009	126.739	
Temperatura (°C)	Criterio ecológico para: fuente de abastecimiento de agua potable (condiciones naturales +2.5); protección de la vida acuática (condiciones naturales +1.5).	Criterio ecológico para: sobrevivencia de la carpa (21-33°C).	Sitio 1	16.2 ± 0.066	19.4 ± 0.038	13.1 ± 0.008	13.2 ± 0.010	14.97
			Sitio 2	15.3 ± 0.034	19.3 ± 0.006	13.3 ± 0.018	13.2 ± 0.009	15.03
			Sitio 3	18.1 ± 0.058	21.2 ± 0.041	14.7 ± 0.057	14.4 ± 0.012	17.10
			Sitio 4	16.1 ± 0.031	20.2 ± 0.047	13.4 ± 0.028	14.1 ± 0.007	15.45
			Sitio 5	17.2 ± 0.006	20.5 ± 0.003	13.3 ± 0.025	15.1 ± 0.043	16.28
			Media	16.58	20.12	13.56	12.8	

¹Según Goyenola (2007): mínimo aceptable 20; pobremente amortiguadora <25; moderadamente amortiguadora 25-75; muy amortiguadora >75; Según Kerven (1999): baja <75; media 75-150; alta >150.

Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna de Tecocomulco (continuación).

Parámetro	Normatividad Mexicana	EPA	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
				Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
CE ($\mu\text{S/cm}$)	Lagunas de aguas mineralizadas (CE>100 $\mu\text{S/cm}$). Lagunas de aguas no mineralizadas (CE<100 $\mu\text{S/cm}$).		Sitio 1	235.124 \pm 0.114	318.529 \pm 0.532	211.644 \pm 0.476	228.100 \pm 0.423	248.349
			Sitio 2	230.776 \pm 0.063	339.387 \pm 0.533	189.602 \pm 0.371	193.202 \pm 0.323	238.241
			Sitio 3	275.133 \pm 0.111	362.361 \pm 1.778	147.931 \pm 0.535	204.104 \pm 0.512	247.382
			Sitio 4	292.688 \pm 0.072	304.747 \pm 0.889	215.694 \pm 0.314	220.900 \pm 0.322	258.507
			Sitio 5	231.836 \pm 0.086	310.775 \pm 1.274	218.905 \pm 0.343	209.437 \pm 0.187	242.738
			Media	253.111	327.159	196.755	211.148	
² SD (mg/L)	Sin parámetro establecido.	Criterio ecológico para: fuente de abastecimiento de agua potable (250 mg/L); riego agrícola (cultivos sensibles 500-1,000 mg/L, cultivos con manejo especial 1,000-2,000mg/L, cultivos tolerantes en suelos permeables 2,000-5,000 mg/L).	Sitio 1	188.468 \pm 0.495	254.931 \pm 0.252	234.133 \pm 0.495	205.952 \pm 0.651	220.871
			Sitio 2	139.273 \pm 0.372	272.071 \pm 0.495	170.843 \pm 0.656	174.329 \pm 0.520	189.129
			Sitio 3	220.520 \pm 0.240	288.691 \pm 0.279	133.753 \pm 0.435	184.328 \pm 0.243	206.823
			Sitio 4	234.502 \pm 0.262	244.169 \pm 0.494	193.915 \pm 0.533	194.663 \pm 0.342	216.812
			Sitio 5	185.628 \pm 0.507	249.406 \pm 0.192	197.470 \pm 0.492	188.969 \pm 0.265	205.368
			Media	193.678	261.853	186.022	189.648	
Turbiedad (UNT)	Criterio ecológico para: fuente de abastecimiento de agua potable (5 UNT).	Sin parámetro establecido.	Sitio 1	0.33 \pm 0.008	0.46 \pm 0.010	0.13 \pm 0.004	0.19 \pm 0.001	0.277
			Sitio 2	0.35 \pm 0.006	0.58 \pm 0.011	0.24 \pm 0.012	0.13 \pm 0.002	0.325
			Sitio 3	1.57 \pm 0.066	2.63 \pm 0.061	2.61 \pm 0.040	1.78 \pm 0.001	2.147
			Sitio 4	1.48 \pm 0.009	2.43 \pm 0.077	0.16 \pm 0.004	0.13 \pm 0.001	1.050
			Sitio 5	0.17 \pm 0.009	0.24 \pm 0.051	0.22 \pm 0.006	0.26 \pm 0.001	0.222
			Media	0.780	1.268	0.672	0.498	
pH	Criterio ecológico para: agua potable (6.5-8.5); riego agrícola (4.5-9); protección de la vida acuática (no podrá haber variaciones mayores a 0.2 unidades de pH).	Sin parámetro establecido.	Sitio 1	6.88 \pm 0.022	6.92 \pm 0.041	7.16 \pm 0.063	7.28 \pm 0.023	7.06
			Sitio 2	6.78 \pm 0.049	6.16 \pm 0.064	7.25 \pm 0.028	6.89 \pm 0.009	6.77
			Sitio 3	7.25 \pm 0.093	7.24 \pm 0.151	7.77 \pm 0.047	7.46 \pm 0.004	7.43
			Sitio 4	6.52 \pm 0.094	6.50 \pm 0.232	7.52 \pm 0.013	7.63 \pm 0.003	7.04
			Sitio 5	6.75 \pm 0.057	6.89 \pm 0.055	7.30 \pm 0.045	7.80 \pm 0.001	7.19
			Media	6.84	6.74	7.40	7.41	
³ OD (mg/L)	Criterio ecológico para: fuente de abastecimiento de agua potable (4 mg/L); protección de la vida acuática (5 mg/L).	Criterio ecológico para: protección de la vida acuática (5 mg/L).	Sitio 1	4.684 \pm 0.329	2.397 \pm 0.055	7.407 \pm 0.134	7.702 \pm 0.101	5.547
			Sitio 2	1.921 \pm 0.008	1.120 \pm 0.060	6.690 \pm 0.018	7.294 \pm 0.009	4.256
			Sitio 3	6.133 \pm 0.098	2.552 \pm 0.034	7.760 \pm 0.060	8.308 \pm 0.127	6.188
			Sitio 4	8.294 \pm 0.066	7.670 \pm 0.052	7.287 \pm 0.018	9.321 \pm 0.076	8.143
			Sitio 5	12.520 \pm 0.113	8.758 \pm 0.025	9.235 \pm 0.107	10.536 \pm 0.088	10.262
			Media	6.710	4.499	7.675	8.632	

²Según De la Barra (2003): lagunas de aguas mineralizadas SD>200 mg/L; lagunas de aguas no mineralizadas SD<200 mg/L.

³Según Goyenola (2007): anoxia 0 mg/L; hipoxia 0-5 mg/L; aceptable 5-8 mg/L; buena 8-12; sobresaturada>12.

Tabla 11. Parámetros fisicoquímicos del agua de la laguna de Tecocomulco (continuación).

Parámetro	Normatividad Mexicana	EPA	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
				Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
% SO	Sin parámetro establecido.		Sitio 1	42.18 ± 0.17	21.09 ± 0.24	63.28 ± 0.25	66.08 ± 0.12	48.16
			Sitio 2	17.42 ± 0.34	9.25 ± 0.16	53.40 ± 0.27	64.71 ± 0.37	36.19
			Sitio 3	57.01 ± 0.47	23.77 ± 0.17	67.23 ± 0.36	73.64 ± 0.17	55.41
			Sitio 4	75.23 ± 0.09	69.28 ± 0.24	58.00 ± 0.17	81.57 ± 0.18	71.02
			Sitio 5	93.23 ± 0.14	83.13 ± 0.19	79.24 ± 0.14	95.69 ± 0.16	87.82
			Media	57.02	41.30	64.23	76.34	
DBO ₅ (mg/L)	Criterio ecológico para: uso en riego agrícola (150-200 mg/L); agua potable (0.75-1.50 mg/L); protección de la vida acuática (30-60 mg/L); recreación (75-150 mg/L).	Sin parámetro establecido.	Sitio 1	6.636 ± 0.025	6.864 ± 0.009	4.506 ± 0.051	2.219 ± 0.012	5.056
			Sitio 2	6.256 ± 0.014	8.409 ± 0.017	8.167 ± 0.103	7.543 ± 0.015	7.593
			Sitio 3	6.636 ± 0.021	7.497 ± 0.008	6.006 ± 0.012	2.425 ± 0.012	5.641
			Sitio 4	5.952 ± 0.037	6.408 ± 0.008	1.845 ± 0.023	1.044 ± 0.025	3.812
			Sitio 5	8.029 ± 0.009	9.635 ± 0.011	11.456 ± 0.215	7.694 ± 0.043	9.203
			Media	6.701	7.762	6.396	4.185	
DQO (mg/L)	Sin parámetro establecido.		Sitio 1	78.822 ± 0.153	134.423 ± 0.237	113.635 ± 0.241	78.025 ± 0.021	101.226
			Sitio 2	103.809 ± 0.642	112.842 ± 0.367	106.823 ± 0.301	100.431 ± 0.421	105.976
			Sitio 3	87.683 ± 0.432	128.881 ± 0.349	120.478 ± 0.444	98.801 ± 0.213	108.960
			Sitio 4	99.084 ± 0.598	116.032 ± 0.512	120.843 ± 0.298	96.880 ± 0.182	108.209
			Sitio 5	99.927 ± 0.286	124.073 ± 0.223	114.822 ± 0.132	100.427 ± 0.477	109.812
			Media	93.865	123.250	115.320	94.912	
% GB	Sin parámetro establecido.		Sitio 1	8.42 ± 0.01	5.11 ± 0.01	3.96 ± 0.01	2.84 ± 0.01	5.08
			Sitio 2	6.03 ± 0.01	7.45 ± 0.02	7.64 ± 0.01	7.51 ± 0.01	7.16
			Sitio 3	7.57 ± 0.02	5.82 ± 0.01	4.99 ± 0.01	2.45 ± 0.02	5.21
			Sitio 4	6.01 ± 0.01	5.52 ± 0.01	1.53 ± 0.01	1.08 ± 0.02	3.53
			Sitio 5	8.03 ± 0.01	7.77 ± 0.01	9.98 ± 0.02	7.66 ± 0.02	8.36
			Media	7.21	6.33	5.62	4.31	
DBO/DQO	DBO/DQO>0.6 materia orgánica muy degradable. DBO/DQO<0.2 materia orgánica poco degradable.		Sitio 1	0.084 ± 0.001	0.051 ± 0.001	0.040 ± 0.001	0.028 ± 0.001	0.051
			Sitio 2	0.060 ± 0.001	0.074 ± 0.002	0.076 ± 0.001	0.075 ± 0.002	0.072
			Sitio 3	0.076 ± 0.001	0.058 ± 0.001	0.050 ± 0.001	0.024 ± 0.001	0.052
			Sitio 4	0.060 ± 0.001	0.055 ± 0.002	0.015 ± 0.001	0.011 ± 0.001	0.035
			Sitio 5	0.080 ± 0.001	0.078 ± 0.001	0.099 ± 0.001	0.077 ± 0.001	0.084
			Media	0.072	0.063	0.056	0.043	

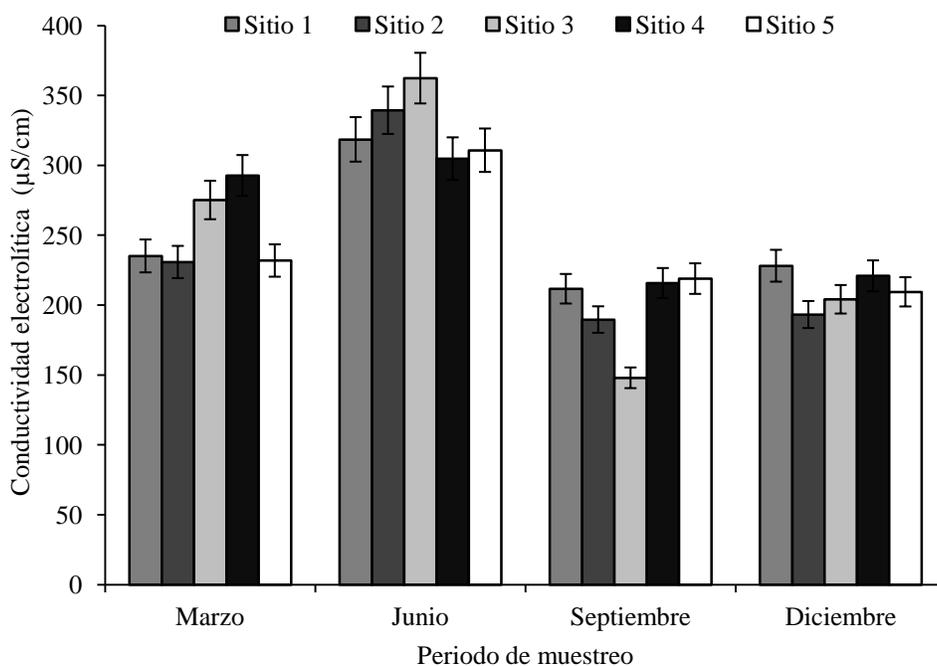


Figura 10. Distribución espacio-temporal de la CE del agua.

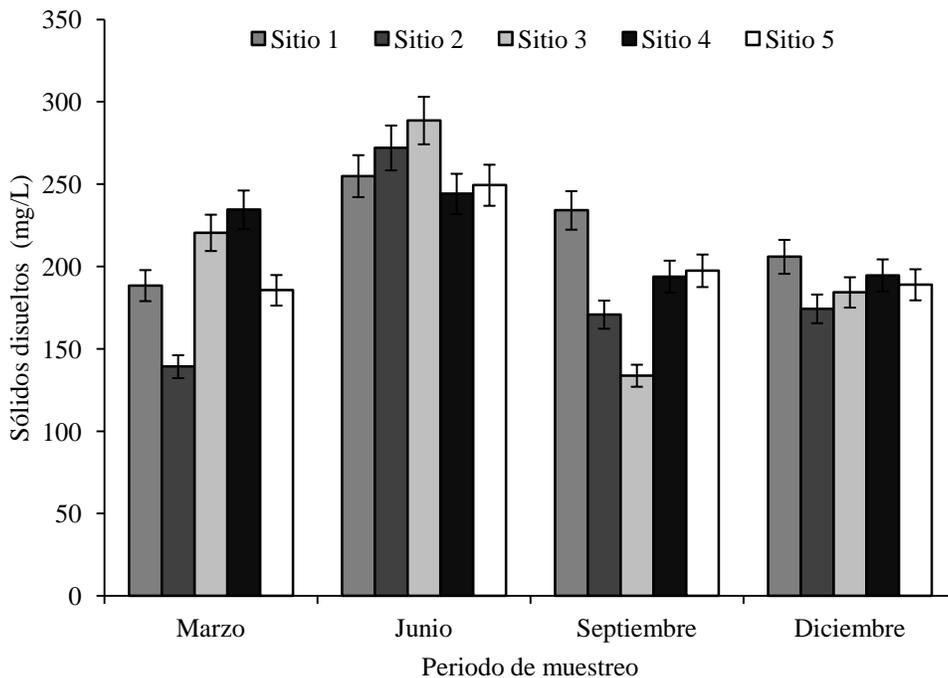


Figura 11. Distribución espacio-temporal de la concentración de SD del agua.

La turbiedad fue superior durante el mes de junio, fenómeno asociado con la disminución del nivel del agua de la laguna, el incremento de la temperatura, una mayor evaporación y el aumento de la concentración de SD. El sitio 1, en el cual prevalece vegetación sumergida como el *Potamogeton nodosus*, *Najas guadalupensis* y *Potamogeton foliosus*, presentó los valores menores de turbiedad, no así en las áreas aledañas y centrales del tular (sitios 1, 2 y 4; tabla 11).

La determinación del pH de un cuerpo de agua es un parámetro a considerar cuando se quiere analizar la especiación química y solubilidad de las sustancias orgánicas e inorgánicas. Es un factor abiótico que regula procesos biológicos mediados por enzimas (fotosíntesis, respiración), la disponibilidad de nutrientes esenciales que limitan el crecimiento de los organismos (PO_4^{-3} y NO_3^-) y la movilidad de metales pesados.

En la laguna de Tecocomulco, la evolución del pH mostró un patrón similar entre estaciones. En la figura 12 se observa que durante los dos primeros periodos de muestreo, el agua presentó un pH ligeramente ácido, acentuándose este fenómeno durante el mes de junio, debido a la presencia de CO_2 producido por la respiración bacteriana, la actividad fotosintética de las algas y macrófitas acuáticas sumergidas y a la descomposición de la materia orgánica.

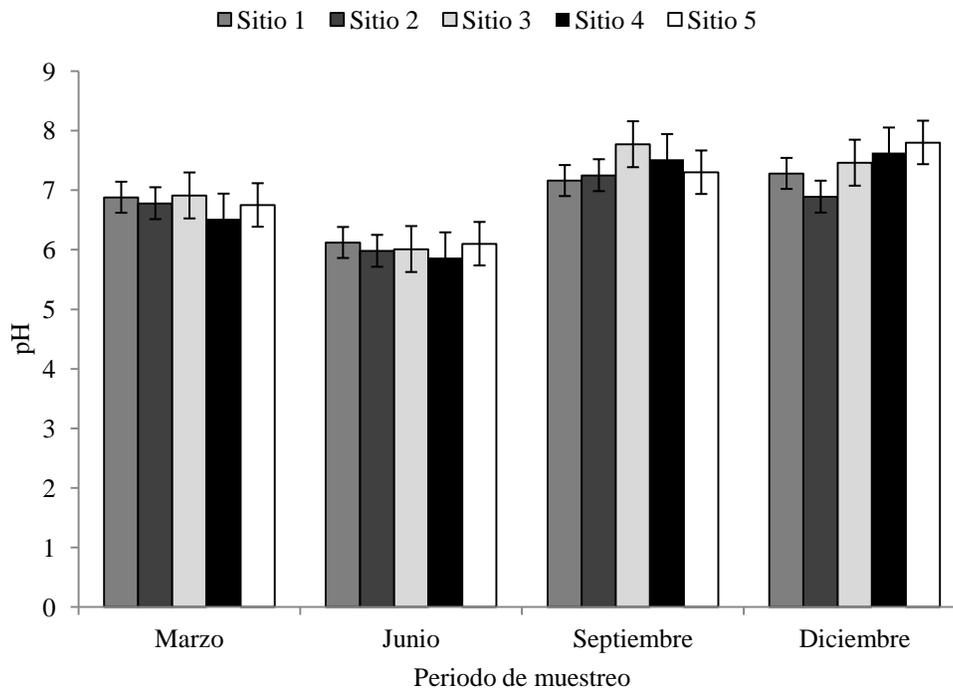


Figura 12. Distribución espacio-temporal del pH.

La variación del pH entre periodos y sitios de muestreo, se debe a factores intrínsecos y extrínsecos, tales como:

1. Factores intrínsecos
 - a) Capacidad amortiguadora del sistema de alcalinidad carbonato-bicarbonato.
 - b) Evaporación.

c) Intensidad de los procesos biológicos tales como: la fotosíntesis, respiración y actividades de descomposición de la materia orgánica.

2. Factores extrínsecos

- Composición de suelos adyacentes a la laguna.
- Fuentes de contaminación: vertido de aguas residuales e influencia de fosas sépticas.
- Temperatura.

El pH es un parámetro determinante para la identificación de las especies iónicas que contribuyen a la alcalinidad del agua. Según la figura 13, y con base en los pH encontrados (tabla 11), se puede deducir que las especies responsables de la alcalinidad en la laguna fueron el ion HCO_3^- y CO_2 , siendo el HCO_3^- la forma química de mayor contribución.

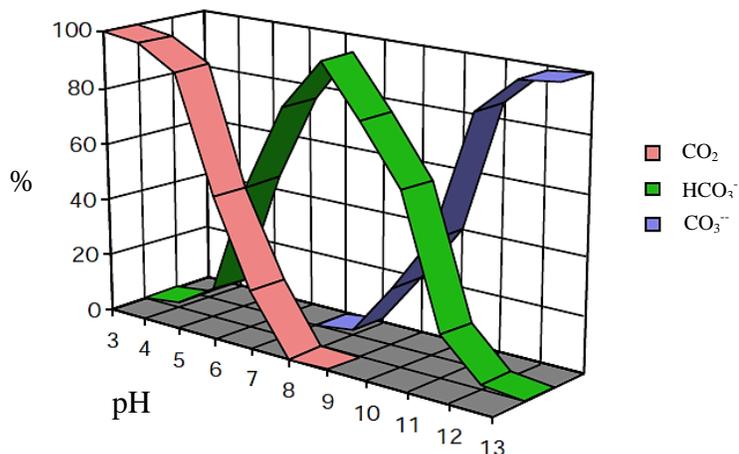


Figura 13. Efecto del pH en la composición de especies de carbono en agua.

La alcalinidad representa el principal sistema amortiguador del medio hídrico y desempeña un rol importante en el crecimiento y desarrollo de algas y plantas acuáticas. Sirve como fuente de reserva para la fotosíntesis. Se utiliza como un indicador de la productividad de las lagunas, donde niveles altos de alcalinidad indican una productividad elevada.

La variabilidad de los valores se debe a factores tales como: el desgaste y disolución de rocas y minerales, los procesos de respiración aerobia y anaerobia, el proceso de fotosíntesis, entre otros.

Debido a los valores encontrados para la alcalinidad (mapas 1-5), se concluye que la laguna de Tecocomulco presentó una productividad alta, misma que se corroboró a través del análisis del grado de eutrofización.

Como puede observarse en la tabla 11, la alcalinidad mostró concentraciones menores a partir de la época de lluvia (septiembre y diciembre), fenómeno debido a un efecto de dilución.

Mapa 1. Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-MARZO

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

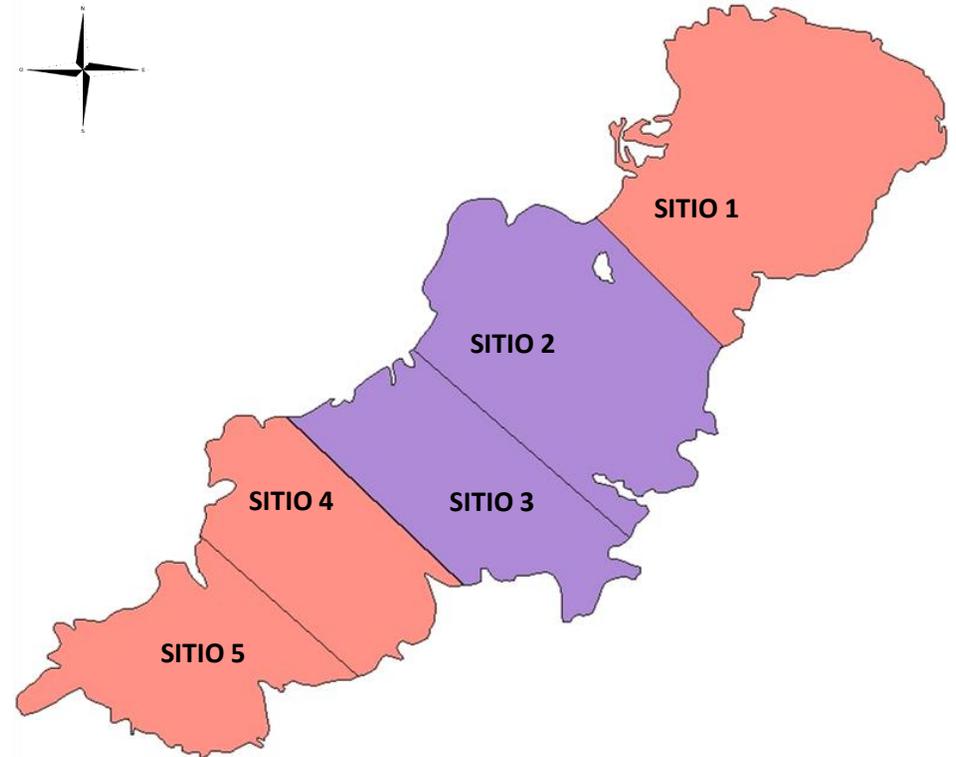
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 3

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	151.0000	300.0000	Productividad alta (3)
	76.0000	150.0000	Productividad media (2)
	0.0000	75.0000	Productividad baja

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 2. Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-JUNIO

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

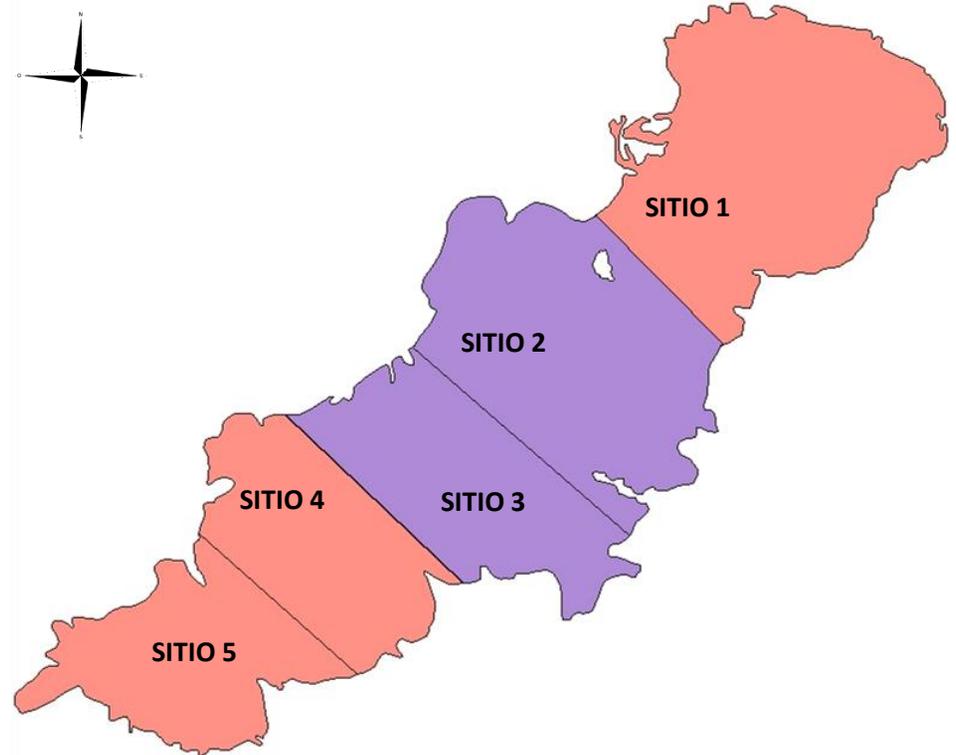
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 3

Esquema de colores:   Rampa			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	151.0000	300.0000	Productividad alta (3)
	76.0000	150.0000	Productividad media (2)
	0.0000	75.0000	Productividad baja

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 3. Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-SEPTIEMBRE

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

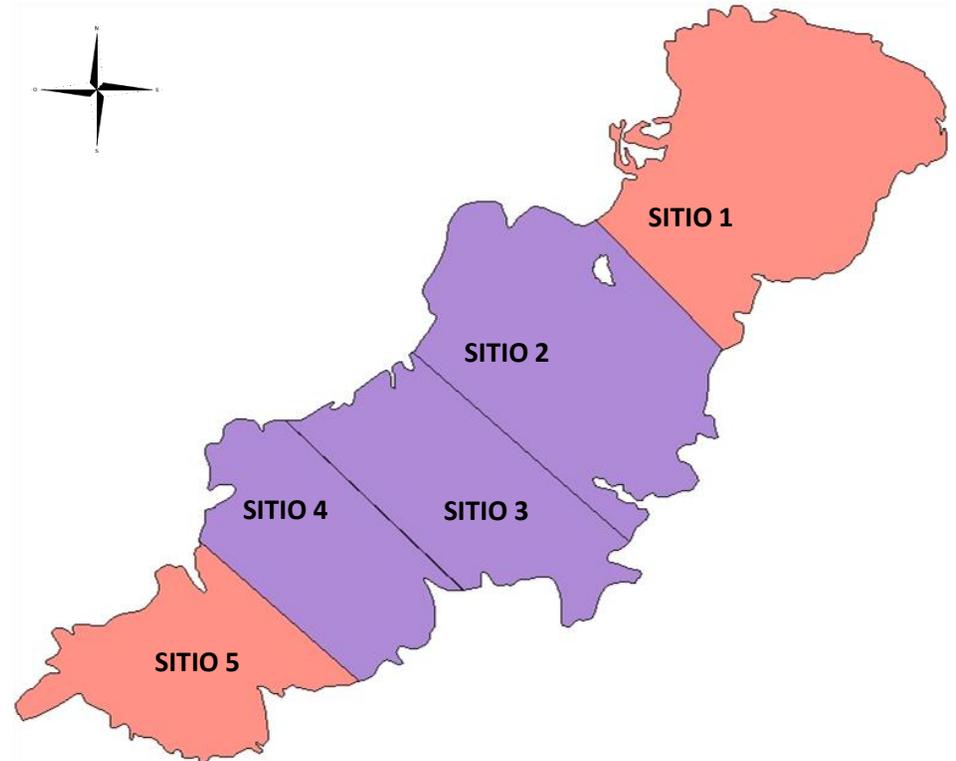
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 3

Esquema de colores: 				 Rampa
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta	
	151.0000	300.0000	Productividad alta (2)	
	76.0000	150.0000	Productividad media (3)	
	0.0000	75.0000	Productividad baja	

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 4. Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-DICIEMBRE

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

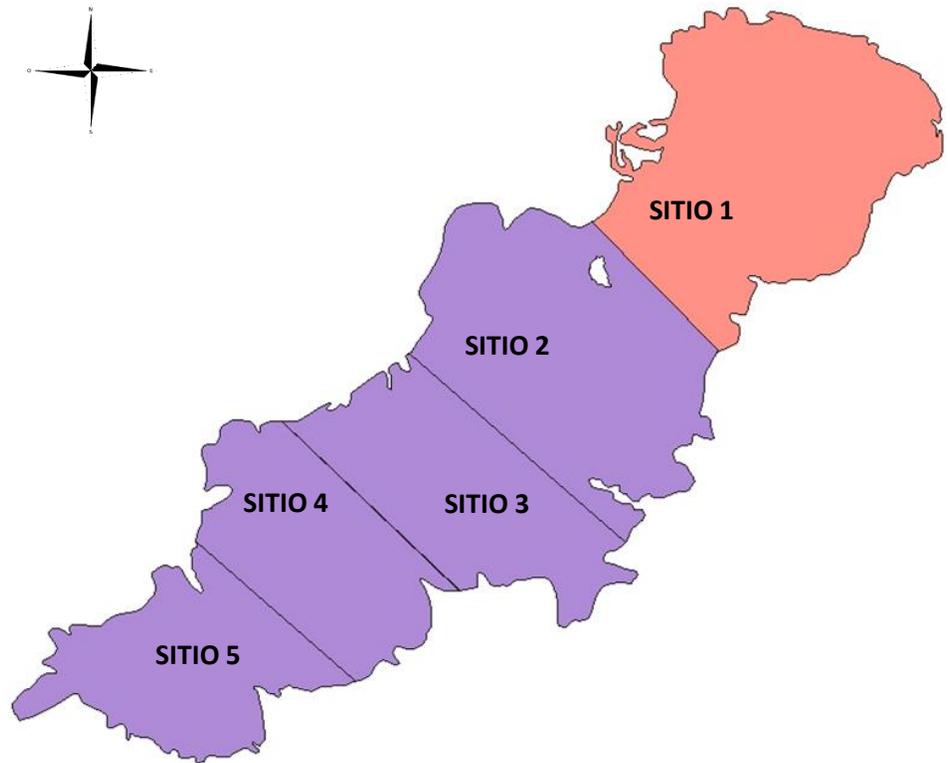
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 3

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	151.0000	300.0000	Productividad alta (1)
	76.0000	150.0000	Productividad media (4)
	0.0000	75.0000	Productividad baja

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 5. Mapa temático [lagunaseccion] ALCALINIDAD TOTAL-ANUAL (2009)

Tipo: cuantitativo

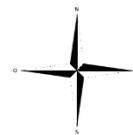
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

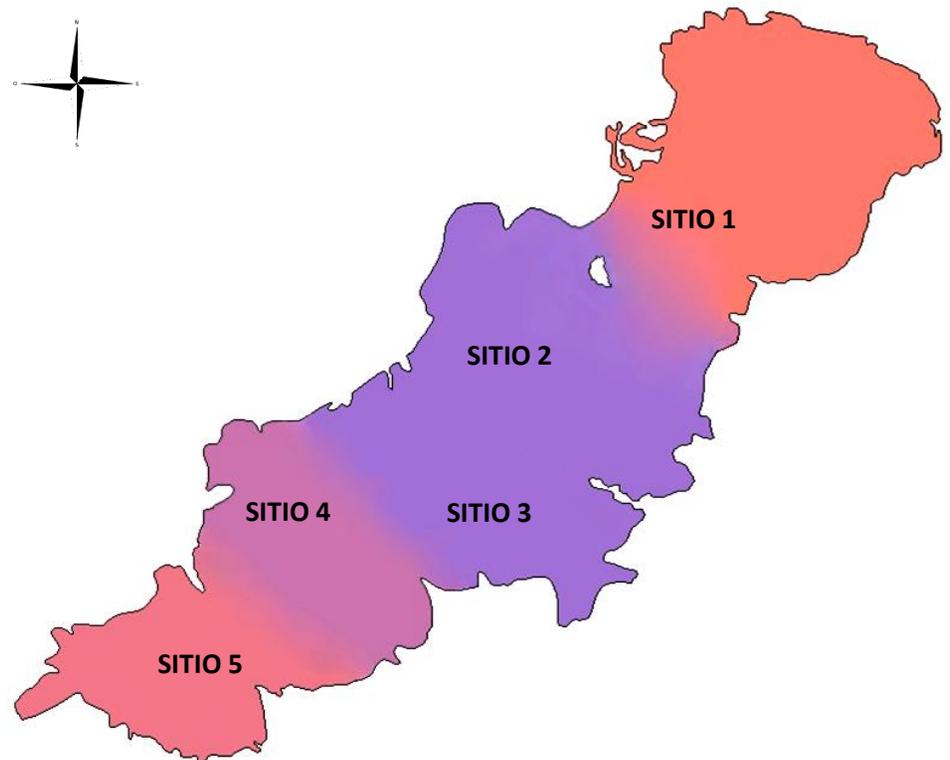
Método: personalizado

No. de estratos: 3

Esquema de colores:   Rampa			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	151.0000	300.0000	Productividad alta
	76.0000	150.0000	Productividad media
	0.0000	75.0000	Productividad baja



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

La dureza del agua está determinada, principalmente, por la concentración de cationes divalentes (Ca^{+2} y Mg^{+2}). Estos iones tienen su origen en las formaciones rocosas calcáreas, y pueden ser encontrados, en mayor o menor grado, en la mayoría de las aguas naturales.

La laguna de Tecocomulco presentó un agua moderadamente dura (mapas 6-10), según la clasificación propuesta por la EPA (tabla 11).

Tomando en consideración los valores de pH y que la alcalinidad de la laguna estuvo determinada principalmente por iones HCO_3^- , en la tabla 11 se observa que la alcalinidad está en concordancia con los valores de dureza total, siendo esta última un poco menor, lo que sugiere que la mayor parte de la dureza del agua fue de origen carbónico, la diferencia representa los bicarbonatos de otros metales.

En la figura 14 se muestran las durezas cálcica y magnésica. Se observa que la dureza total del agua se debió principalmente al contenido de calcio.

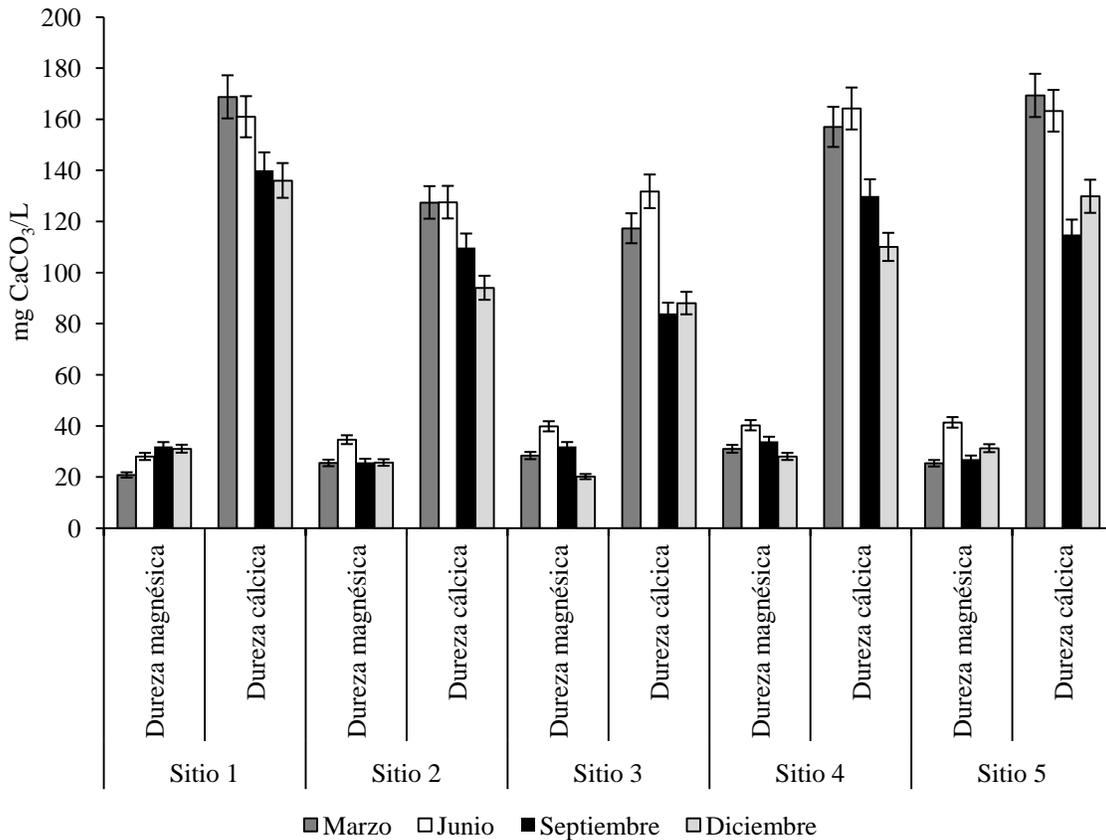


Figura 14. Distribución espacio-temporal de la dureza cálcica y magnésica.

Mapa 6. Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-MARZO

Tipo: cuantitativo

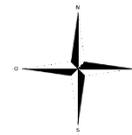
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

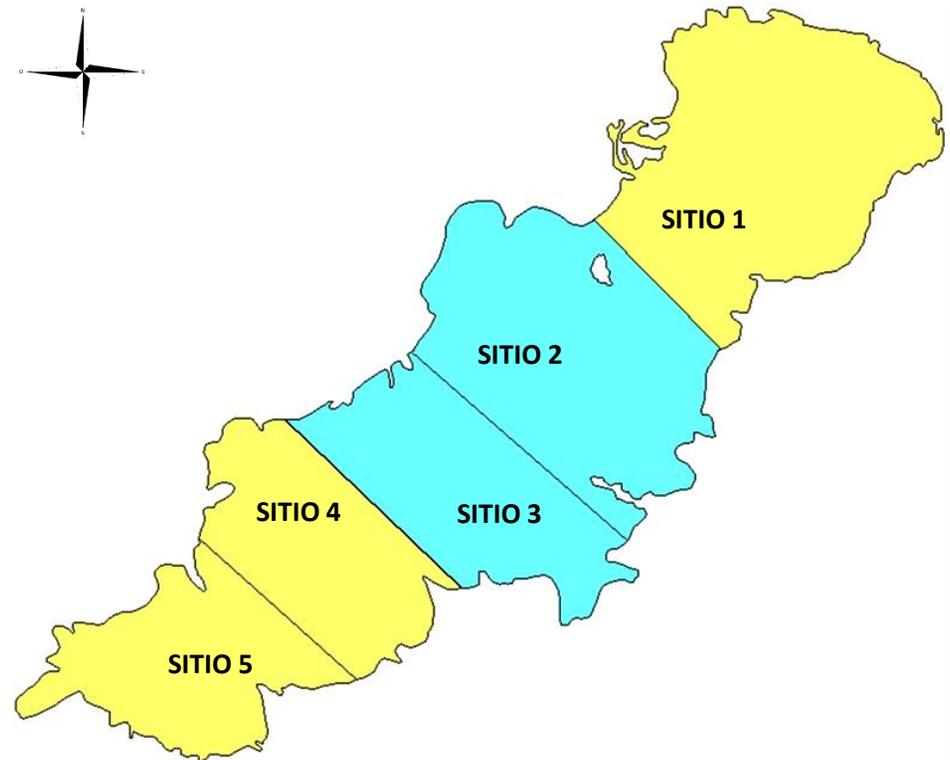
Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 				 Rampa
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta	
	300.0000	500.0000	Muy dura	
	150.0000	300.0000	Dura (3)	
	65.0000	150.0000	Moderadamente dura (2)	
	0.0000	65.0000	Blanda	



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 7. Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-JUNIO

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

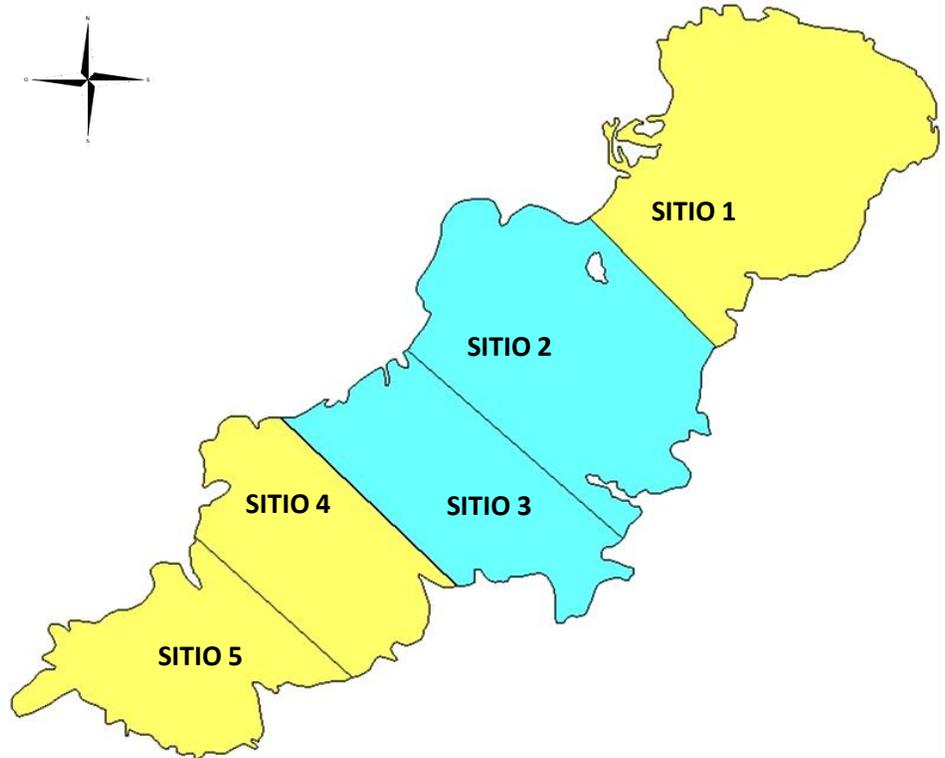
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	300.0000	500.0000	Muy dura
	150.0000	300.0000	Dura (3)
	65.0000	150.0000	Moderadamente dura (2)
	0.0000	65.0000	Blanda

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 8. Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-SEPTIEMBRE

Tipo: cuantitativo

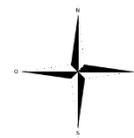
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

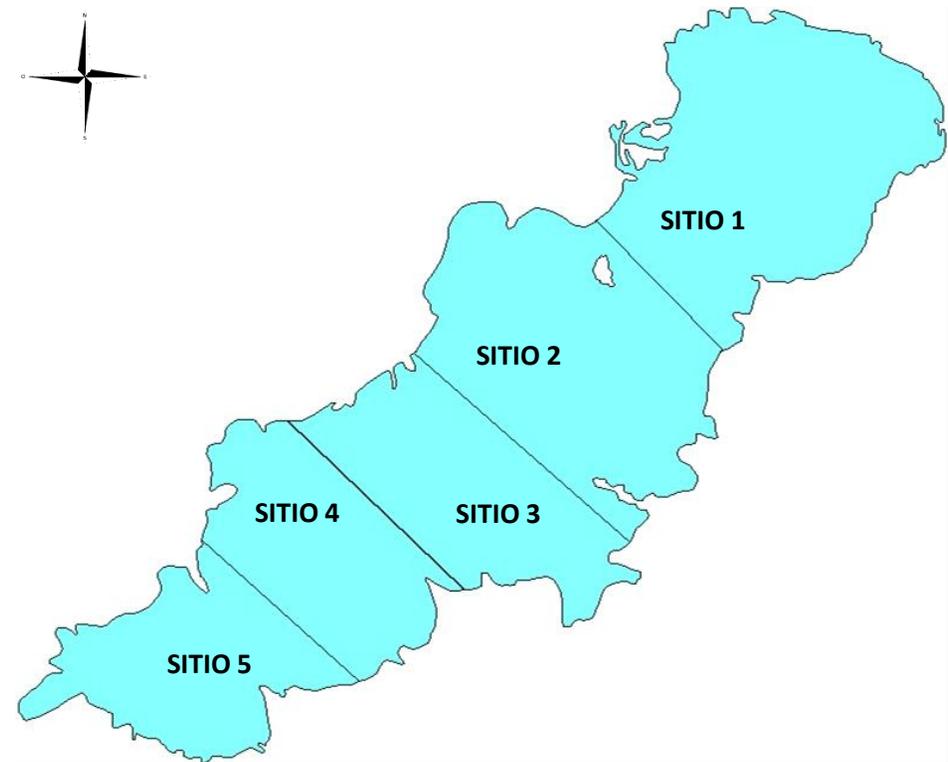
Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	300.0000	500.0000	Muy dura
	150.0000	300.0000	Dura
	65.0000	150.0000	Moderadamente dura (5)
	0.0000	65.0000	Blanda



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 9. Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-DICIEMBRE

Tipo: cuantitativo

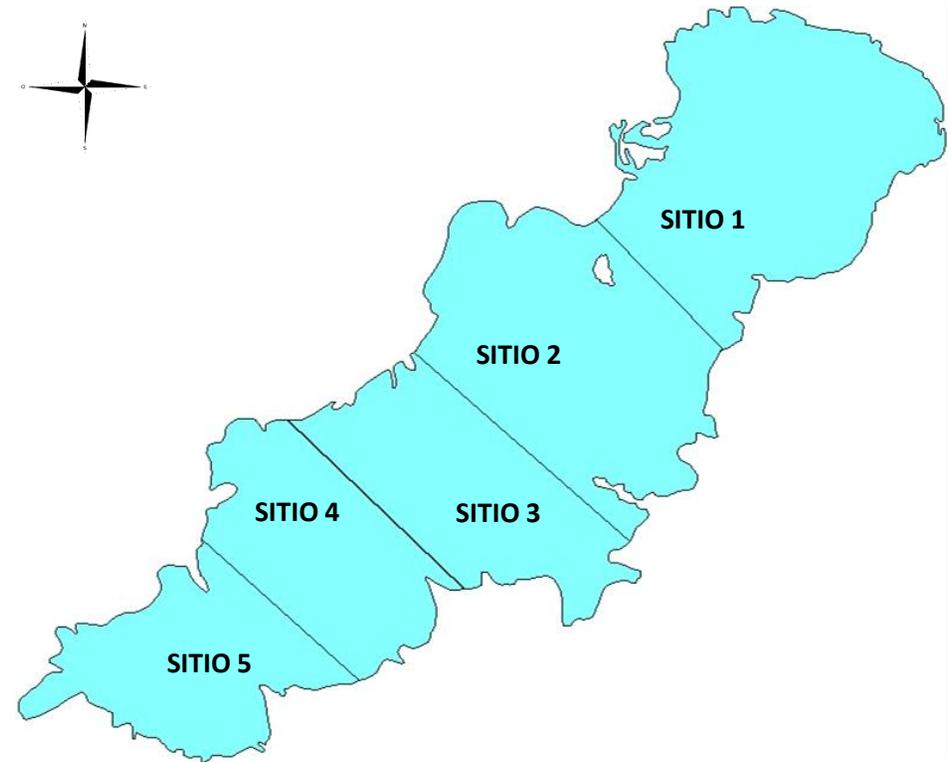
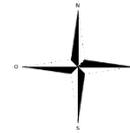
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	300.0000	500.0000	Muy dura
	150.0000	300.0000	Dura
	65.0000	150.0000	Moderadamente dura (5)
	0.0000	65.0000	Blanda



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80

ESCALA 1:500,000

Mapa 10. Mapa temático [lagunaseccion] DUREZA TOTAL-ANUAL (2009)

Tipo: cuantitativo

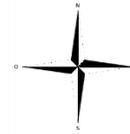
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

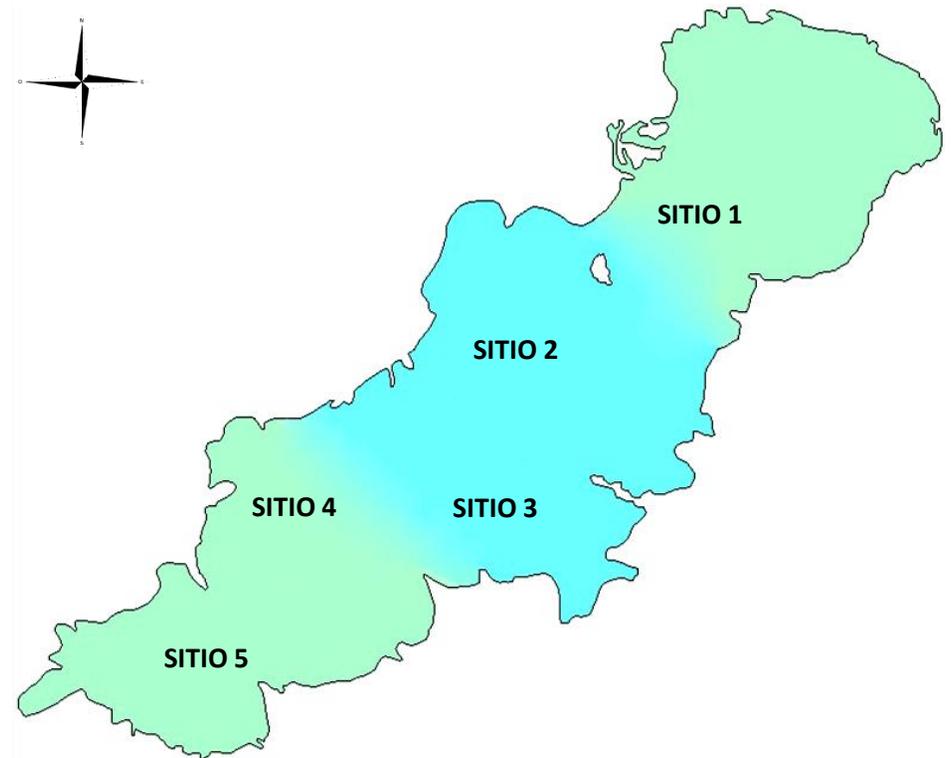
Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	300.0000	500.0000	Muy dura
	150.0000	300.0000	Dura
	65.0000	150.0000	Moderadamente dura
	0.0000	65.0000	Blanda



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
	SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

El OD en el agua es una de las variables más importantes de los ecosistemas acuáticos. El nivel de OD proporciona información sobre la intensidad de las reacciones bioquímicas que tiene lugar en el medio, es un indicador del grado de contaminación del agua, de la magnitud de la carga de materia orgánica externa que llega al sistema y de su capacidad para dar soporte a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de OD indica agua de mejor calidad; por el contrario, si los niveles de OD son demasiado bajos algunas especies de flora y fauna no pueden sobrevivir.

Este parámetro mostró amplias diferencias espaciales y temporales (mapas 11-15). La estación de muestreo que presentó las concentraciones más bajas de OD fue el sitio 2, lugar con elevada cantidad de *Schoenoplectus californicus* (tule), registrando condiciones de hipoxia (<2.7 mg/L) durante los dos primeros periodos de muestreo, lo cual resulta de la baja circulación del agua, las altas temperaturas, el alto aporte de materia orgánica y el consumo de O₂ durante su descomposición.

Septiembre y diciembre registraron los % SO más elevados (figura 15), periodo que coincidió con la época de lluvia y otros factores como los procesos físicos de difusión del gas desde la atmósfera durante épocas más frías, así como la turbulencia generada por el viento.

El sitio 5 presentó los máximos valores de OD, el cual mostró vegetación sumergida y alta transparencia, está característica es importante ya que el O₂ liberado durante el proceso de la fotosíntesis de las plantas acuáticas sumergidas, es un factor que contribuye para incrementar la concentración de OD.

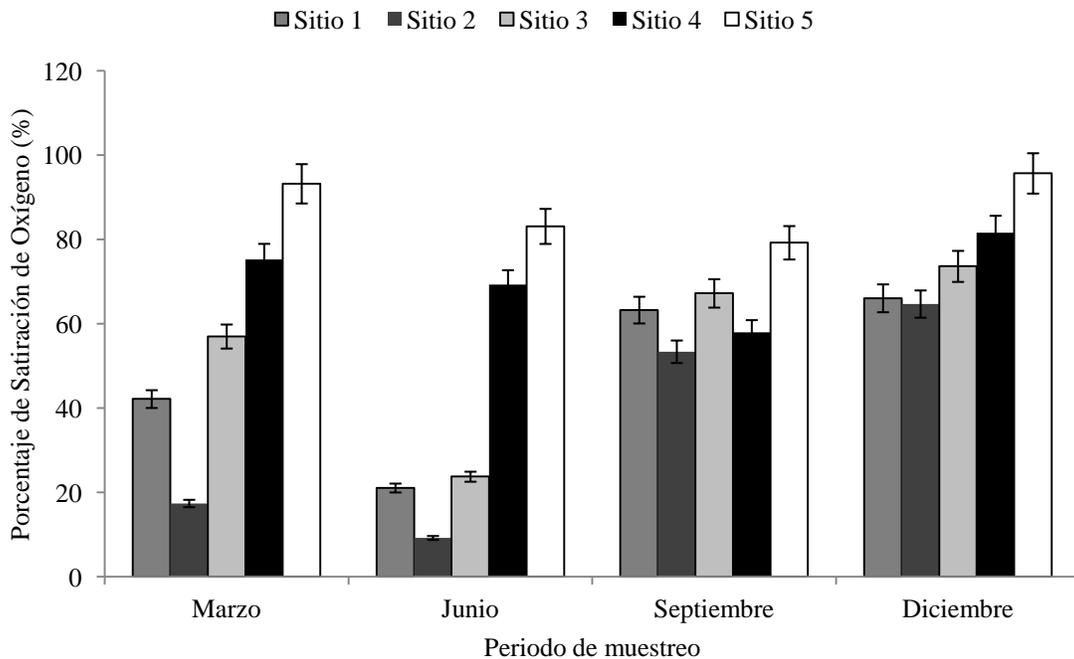


Figura 15. Distribución espacio-temporal del % SO.

Mapa 11. Mapa temático [lagunaseccion] O₂ DISUELTO-MARZO

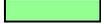
Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

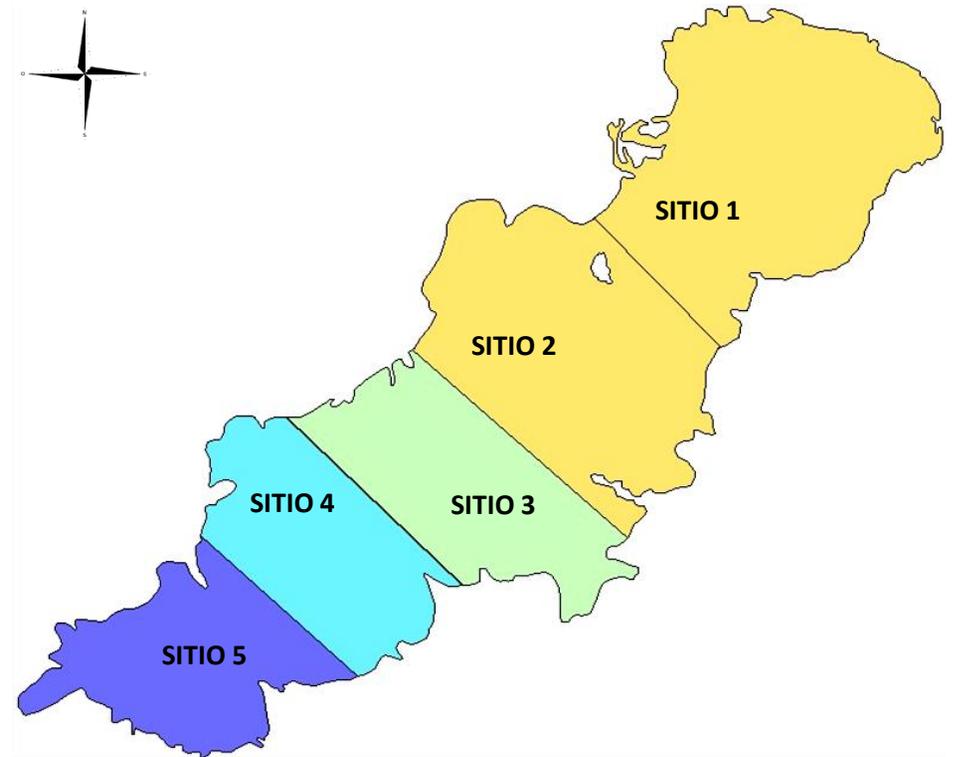
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	Anóxia
	1.0000	5.0000	Hipóxía (2)
	5.0000	8.0000	Aceptable (1)
	8.0000	12.0000	Buena (1)
	12.0000	20.0000	Sobresaturada (1)

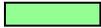
SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



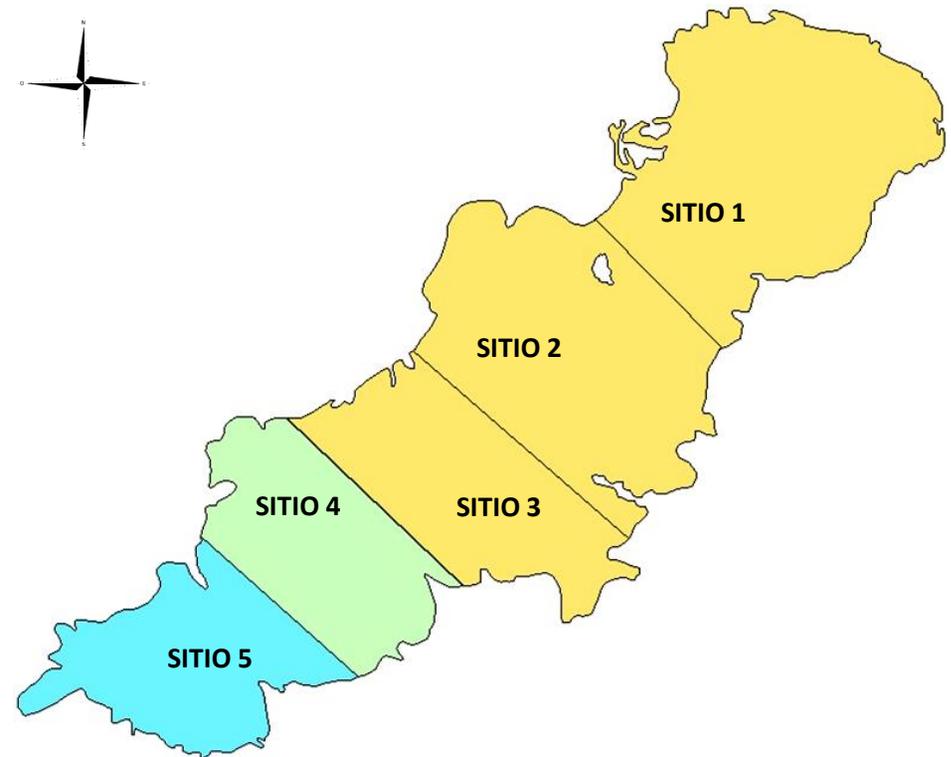
ESCALA 1:500,000

Mapa 12. Mapa temático [lagunaseccion] O₂ DISUELTO-JUNIO
Tipo: cuantitativo
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN
Método: personalizado
No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	Anóxia
	1.0000	5.0000	Hipóxia (3)
	5.0000	8.0000	Aceptable (1)
	8.0000	12.0000	Buena (1)
	12.0000	20.0000	Sobresaturada

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 13. Mapa temático [lagunaseccion] O₂ DISUELTO-SEPTIEMBRE

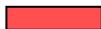
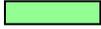
Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

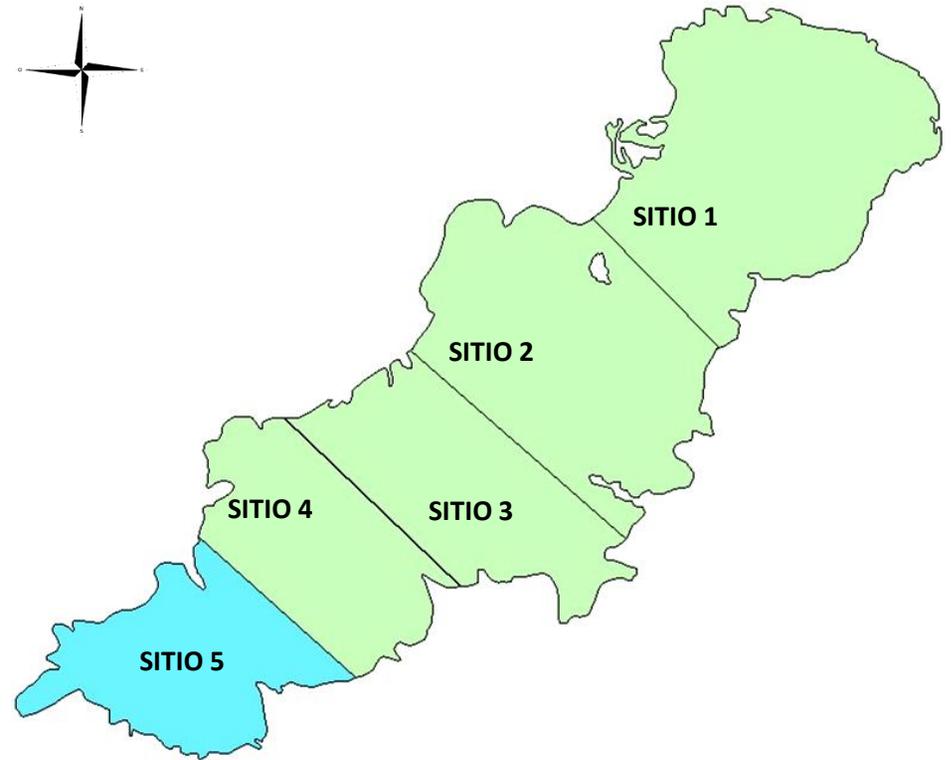
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores:   Rampa			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	Anóxia
	1.0000	5.0000	Hipóxía
	5.0000	8.0000	Aceptable (4)
	8.0000	12.0000	Buena (1)
	12.0000	20.0000	Sobresaturada

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 14. Mapa temático [lagunaseccion] O₂ DISUELTO-DICIEMBRE

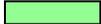
Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

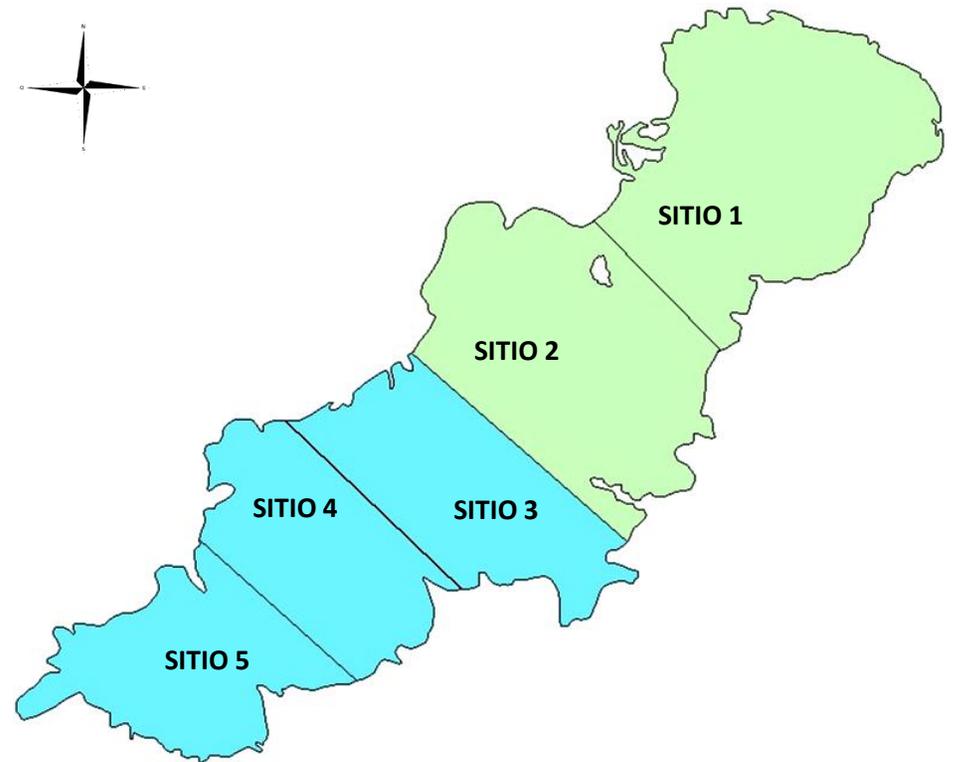
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores:   Rampa			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	Anóxia
	1.0000	5.0000	Hipóxia
	5.0000	8.0000	Aceptable (2)
	8.0000	12.0000	Buena (3)
	12.0000	20.0000	Sobresaturada

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 15. Mapa temático [lagunaseccion] O₂ DISUELTO-ANUAL (2009)

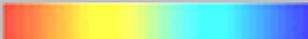
Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

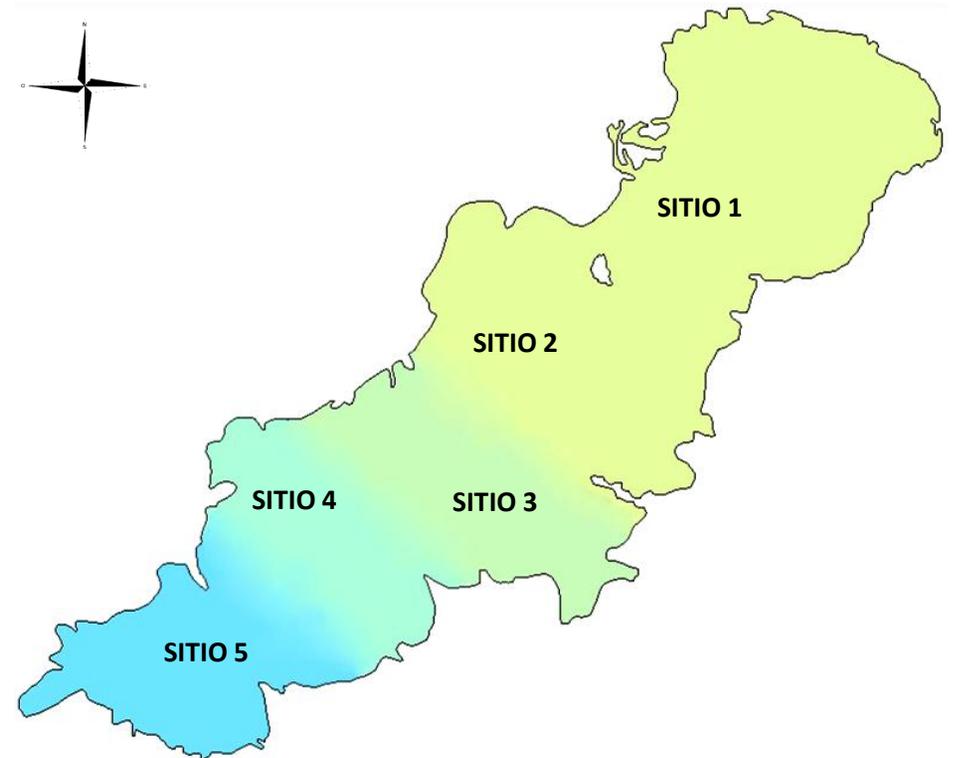
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	Anóxia
	1.0000	5.0000	Hipóxía
	5.0000	8.0000	Aceptable (2)
	8.0000	12.0000	Buena (3)
	12.0000	20.0000	Sobresaturada

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Un parámetro estrechamente relacionado con la concentración de OD es la DBO, que es una medida de la cantidad de O₂ que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en el agua, tal como: plantas muertas, hojas, aguas residuales, desechos animales o incluso de comida. Bajo esta condición, los microorganismos aerobios inician el proceso de descomposición de las sustancias orgánicas, por lo que, disminuye el OD disponible para otros organismos. Cuando el OD es alto, el nivel de la DBO también lo es. Conforme la materia orgánica es consumida, los niveles de DBO empiezan a bajar.

La temperatura del agua contribuye a los altos niveles de DBO. Conforme la temperatura aumenta, la velocidad de la fotosíntesis que realizan las algas y otras macrófitas en el agua también se incrementa. Cuando esto sucede, las hidrófitas crecen y mueren más rápidamente, por lo que caen al fondo donde son descompuestas por las bacterias, las cuales requieren de O₂ para este proceso. Por lo tanto, las aguas con temperaturas más altas aceleran la descomposición bacteriana y ocasionan niveles altos de DBO.

Durante el mes junio, se presentaron las mayores temperaturas, así como los niveles más bajos de OD, lo que indica que la actividad microbiana era alta y por lo tanto, también la DBO₅ lo fue. Por otro lado, en el mes de diciembre, dadas las bajas temperaturas y el incremento de la cantidad de OD, la DBO₅ fue inferior. El % GB de la materia orgánica ($\%GB = [DBO_5/DQO] * 100$) fue bajo para todos los sitios y periodos de muestreo (figura 16), valores que coincidieron con la relación DBO₅/DQO, la cual indicó una baja proporción de material biodegradable (mapas 16-20). Esto significa que gran parte del material muerto fue refractario y forma compuestos húmicos que llegan al sedimento, lo cual representa otro factor que favorece el azolvamiento de la laguna.

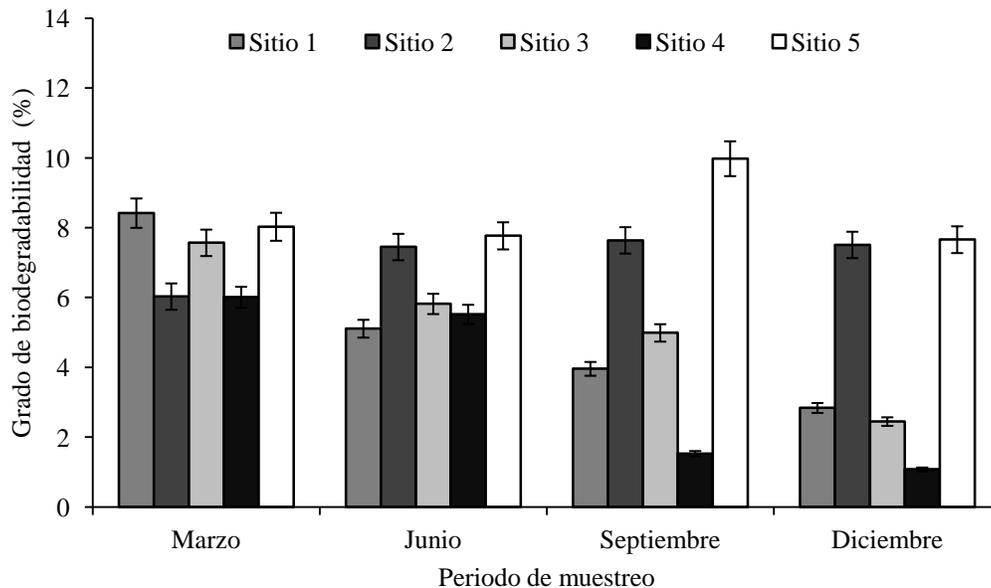


Figura 16. Distribución espacio-temporal del % GB de la materia orgánica.

Mapa 16. Mapa temático [lagunaseccion] DBO₅/DQO-MARZO

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

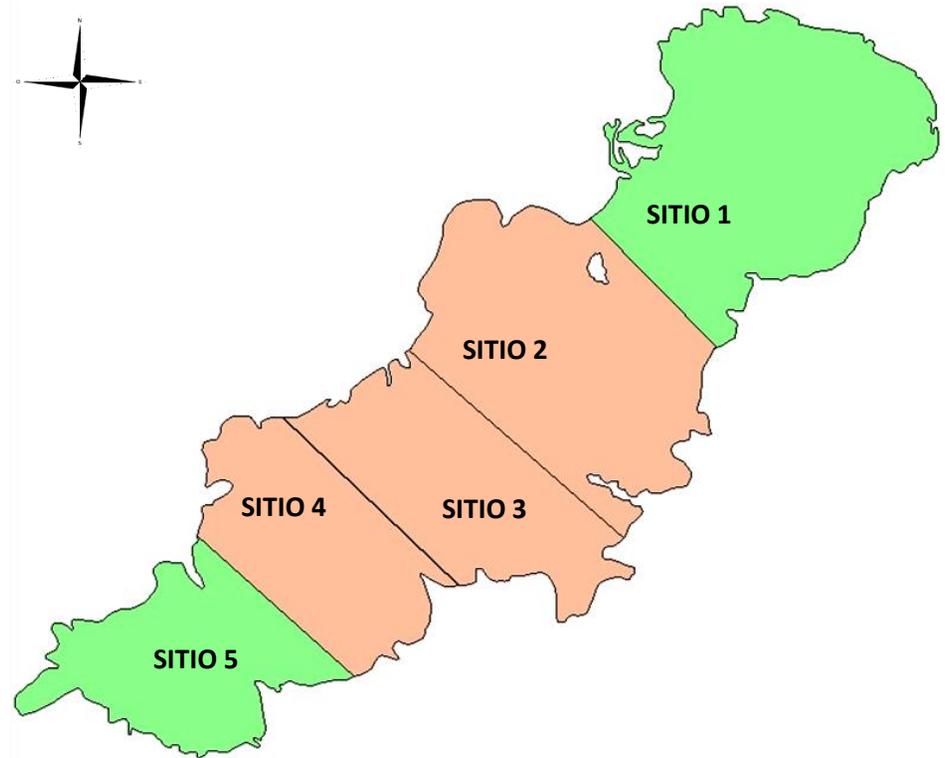
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	No degradable
	0.0000	0.2000	Poco degradable (3)
	0.2000	0.6000	Medianamente degradable (2)
	8.0000	12.0000	Muy degradable

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 17. Mapa temático [lagunaseccion] DBO₅/DQO-JUNIO

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

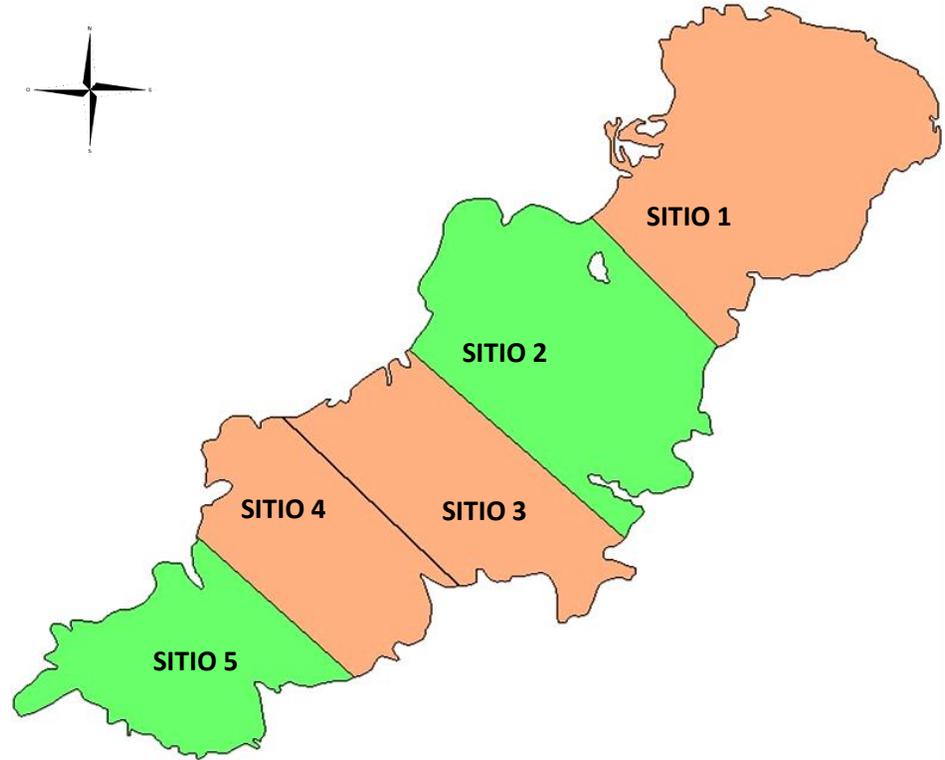
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	No degradable
	0.0000	0.2000	Poco degradable (3)
	0.2000	0.6000	Medianamente degradable (2)
	8.0000	12.0000	Muy degradable

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 18. Mapa temático [lagunaseccion] DBO₅/DQO-SEPTIEMBRE

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

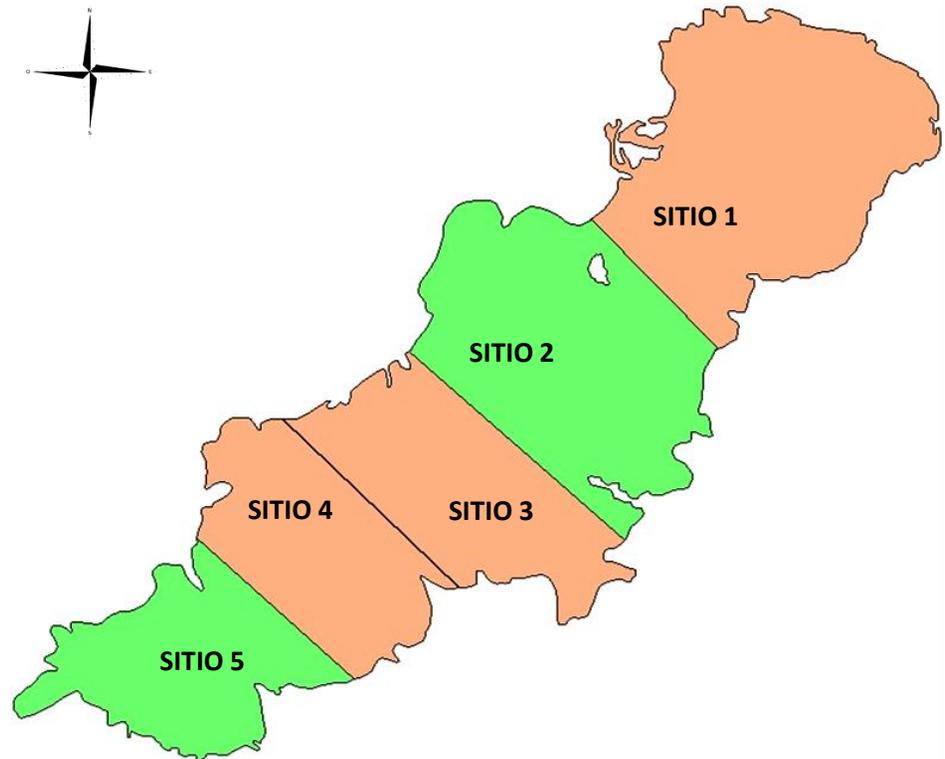
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores:		Rampa	
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	No degradable
	0.0000	0.2000	Poco degradable (3)
	0.2000	0.6000	Medianamente degradable (2)
	8.0000	12.0000	Muy degradable

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



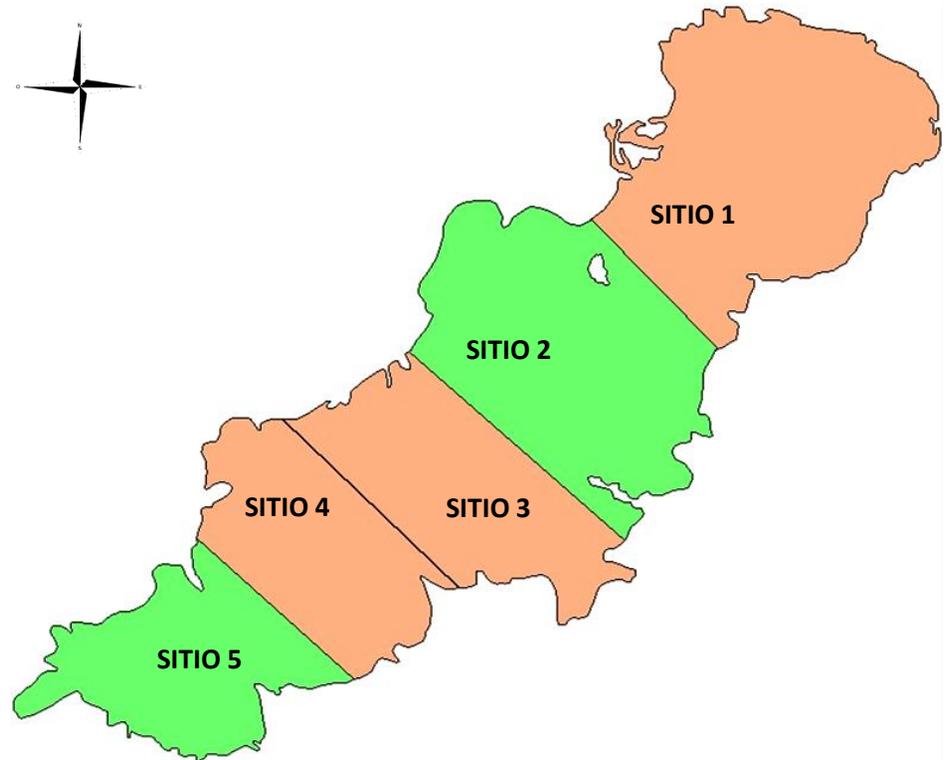
ESCALA 1:500,000

Mapa 19. Mapa temático [lagunaseccion] DBO₅/DQO-DICIEMBRE
Tipo: cuantitativo
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN
Método: personalizado
No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	No degradable
	0.0000	0.2000	Poco degradable (3)
	0.2000	0.6000	Medianamente degradable (2)
	8.0000	12.0000	Muy degradable

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
	SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 20. Mapa temático [lagunaseccion] DBO₅/DQO-ANUAL (2009)

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

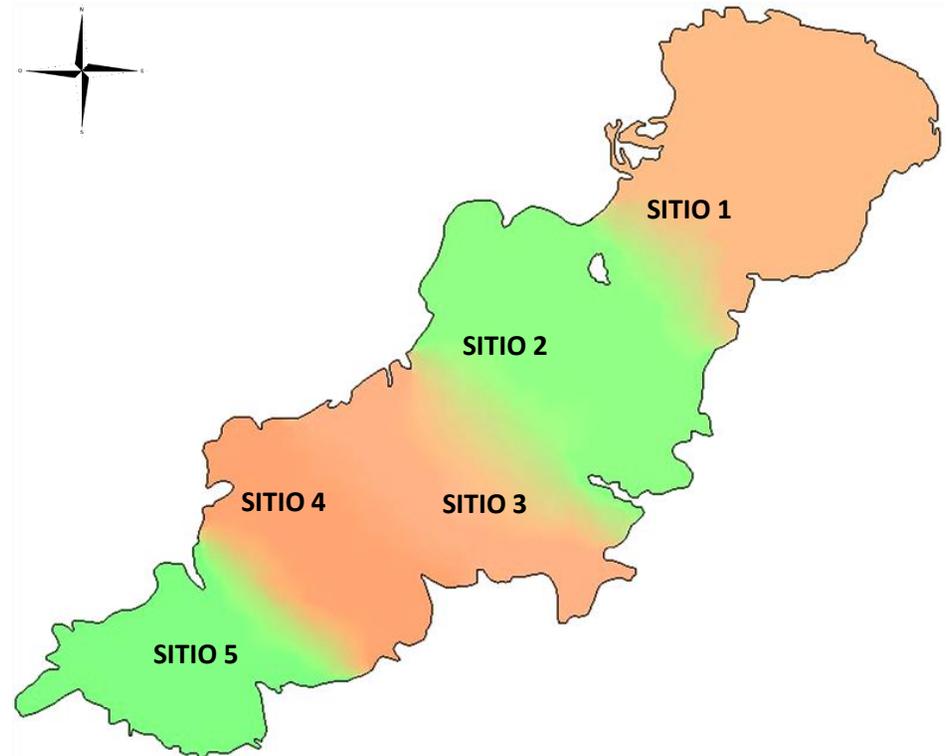
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 4

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	0.0000	No degradable
	0.0000	0.2000	Poco degradable (3)
	0.2000	0.6000	Medianamente degradable (2)
	8.0000	12.0000	Muy degradable

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

5.3 Determinación del estado trófico

Para definir el estado trófico de un sistema acuático se utilizan índices del estado trófico calculados en base a diferentes parámetros.

El N₂ y el P constituyen los dos elementos más importantes para la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos. Su concentración varía desde microgramos (µg/L) en medios oligotróficos, hasta varios miligramos por litro en medios eutrofizados. Estos factores cambian con las estaciones y con los ritmos de lluvia y sequía.

La palabra “eutrófico” significa nutrido. Así, la eutrofización se entiende como el crecimiento desmedido de la biota vegetal, causado por el enriquecimiento del agua por nutrientes. Las lagunas eutróficas suelen ser poco profundas, cercanas a asentamientos humanos, rodeadas de campos de cultivo y alimentadas, en algunas ocasiones, por aguas residuales de negocios o casas habitación que se encuentren en áreas circundantes a las mismas. Características que se ponen de manifiesto en el área de estudio.

5.3.1 Índice de Estado Trófico de Carlson (TSI)

El TSI permite clasificar un cuerpo de agua en base a la concentración de PT, clorofila-*a* o a la transparencia del disco de Secchi (Echaniz y Vignatti, 2009). En la tabla 12, se resumen los resultados obtenidos para la determinación de PT y clorofila-*a* en la laguna de Tecocomulco.

Los valores encontrados para el TSI (mapas 21-25) indicaron que este cuerpo de agua se encuentra eutrófico, presentando valores menores durante diciembre, época donde se acentuaron las precipitaciones pluviales y las bajas temperaturas, por lo que la productividad primaria disminuyó.

El P constituye el nutriente limitante de la producción primaria y es la primera causa del proceso de eutrofización de los sistemas acuáticos. Está implicado en numerosos procesos fisicoquímicos y biológicos. Químicamente, reacciona con cationes como el Fe, Ca y Al, formando compuestos insolubles que precipitan. Es captado del medio por algas y macrófitas en forma de ortofosfato y se almacena intracelularmente como gránulos de polifosfato. Los procesos de consumo herbívoro y de excreción por los organismos heterótrofos son responsables de su reciclado.

En el área de estudio, las concentraciones de PT oscilaron entre 47 y 80 µg/L, presentando valores superiores en los dos primeros periodos de muestreo.

De forma natural, en la laguna de Tecocomulco, el P proviene de la disolución de rocas fosfatadas y de la mineralización de la materia orgánica que retorna al medio P inorgánico por los procesos de descomposición microbiana. Sin embargo, los principales aportes proceden de fuentes externas, es decir, provienen de la incorporación de desechos de diferente origen y de la expansión de la actividad agropecuaria.

Tabla 12. Determinación de PT y Clorofila-*a*.

Parámetro	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un 95% de IC)				
		Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
¹ PT (µg/L)	Sitio 1	83.0 ± 0.1	84.0 ± 0.2	73.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	72.50
	Sitio 2	41.0 ± 0.1	124.0 ± 0.1	90.0 ± 0.3	64.0 ± 0.1	79.75
	Sitio 3	33.0 ± 0.2	101.0 ± 0.1	74.0 ± 0.2	70.0 ± 0.3	69.50
	Sitio 4	67.0 ± 0.1	75.0 ± 0.2	55.0 ± 0.1	52.0 ± 0.2	62.25
	Sitio 5	48.0 ± 0.3	92.0 ± 0.2	67.0 ± 0.2	54.0 ± 0.1	65.25
² TSI, TP	Sitio 1	67.86	68.03	66.01	60.55	65.61
	Sitio 2	57.69	73.65	69.03	64.11	66.12
	Sitio 3	54.56	70.69	66.20	65.40	64.21
	Sitio 4	64.77	66.40	61.93	61.12	63.55
	Sitio 5	59.96	69.34	64.77	61.66	63.93
³ Clorofila- <i>a</i> (µg/L)	Sitio 1	49.319 ± 0.143	53.769 ± 0.143	55.746 ± 0.201	46.984 ± 0.153	51.45
	Sitio 2	69.554 ± 0.205	78.523 ± 0.205	53.349 ± 0.193	47.143 ± 0.142	62.14
	Sitio 3	70.137 ± 0.172	72.123 ± 0.172	41.043 ± 0.163	48.230 ± 0.181	57.88
	Sitio 4	45.553 ± 0.164	47.576 ± 0.164	59.332 ± 0.237	45.002 ± 0.293	49.37
	Sitio 5	50.330 ± 0.211	55.820 ± 0.211	38.093 ± 0.270	46.291 ± 0.185	47.63
² TSI, Clorofila- <i>a</i>	Sitio 1	68.842	69.690	70.044	68.367	69.236
	Sitio 2	72.215	73.405	69.613	68.400	70.908
	Sitio 3	72.297	72.571	67.040	68.623	70.133
	Sitio 4	68.063	68.489	70.656	67.944	68.788
	Sitio 5	69.041	70.057	66.309	68.221	68.407

¹OECD-PT (µg/L): <4.0 (Ultraoligotrófico); 4.0-10 (Oligotrófico); 10-35 (Mesotrófico); 35-100 (Eutrófico); >100 (Hipereutrófico).

²TSI<30 (Oligotrófico); 30<TSI<60 (Mesotrófico); 60<TSI<90 (Eutrófico); 90<TSI<100 (Hipereutrófico).

³OECD-Clorofila-*a* (µg/L): <2.5 (Ultraoligotrófico); 2.5-8.0 (Oligotrófico); 8.0-25 (Mesotrófico); 25-75 (Eutrófico); >75 (Hipereutrófico).

Mapa 21. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-MARZO

Tipo: cuantitativo

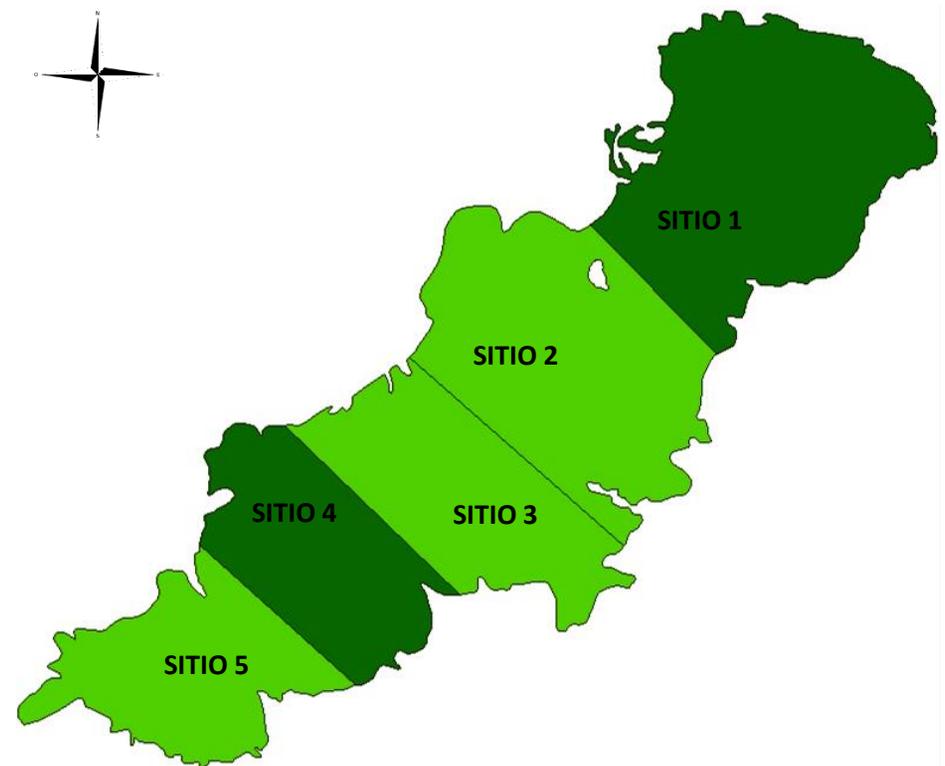
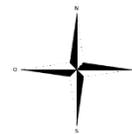
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico (3)
	61.0000	90.0000	Eutrófico (2)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80

ESCALA 1:500,000

Mapa 22. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-JUNIO

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

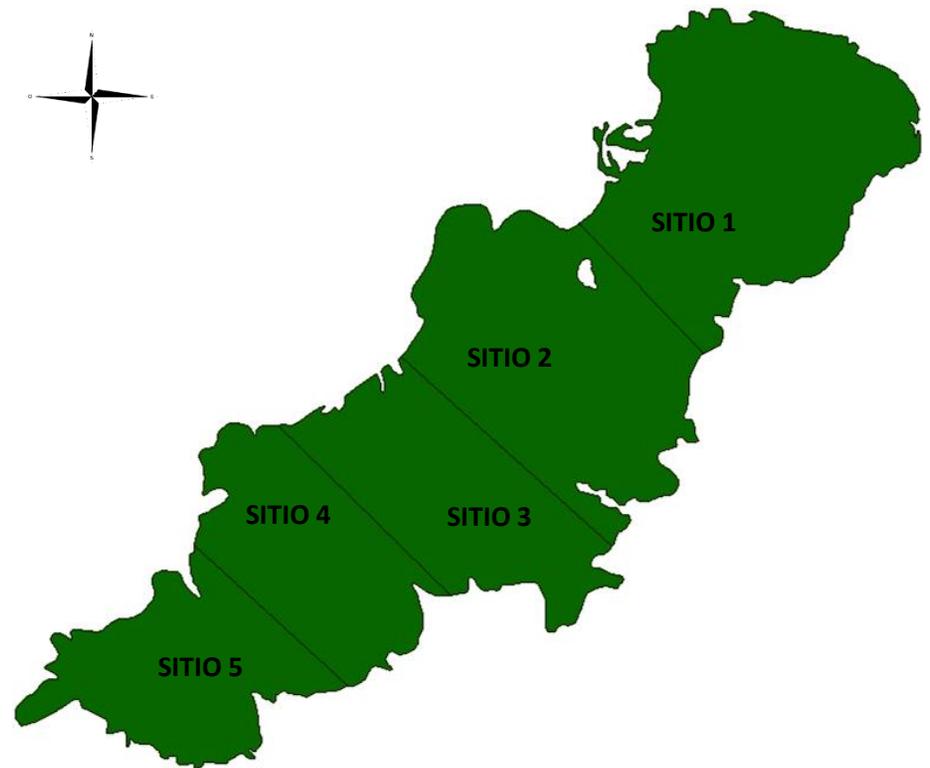
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 23. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-SEPTIEMBRE

Tipo: cuantitativo

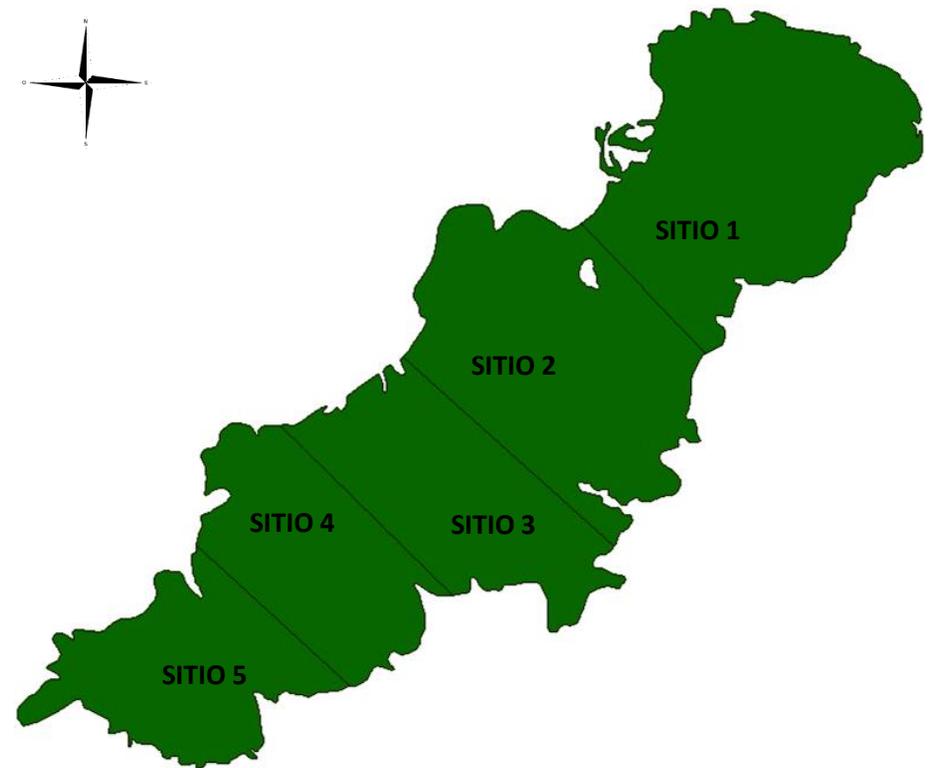
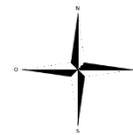
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80

ESCALA 1:500,000

Mapa 24. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-DICIEMBRE

Tipo: cuantitativo

Estilo: color graduado

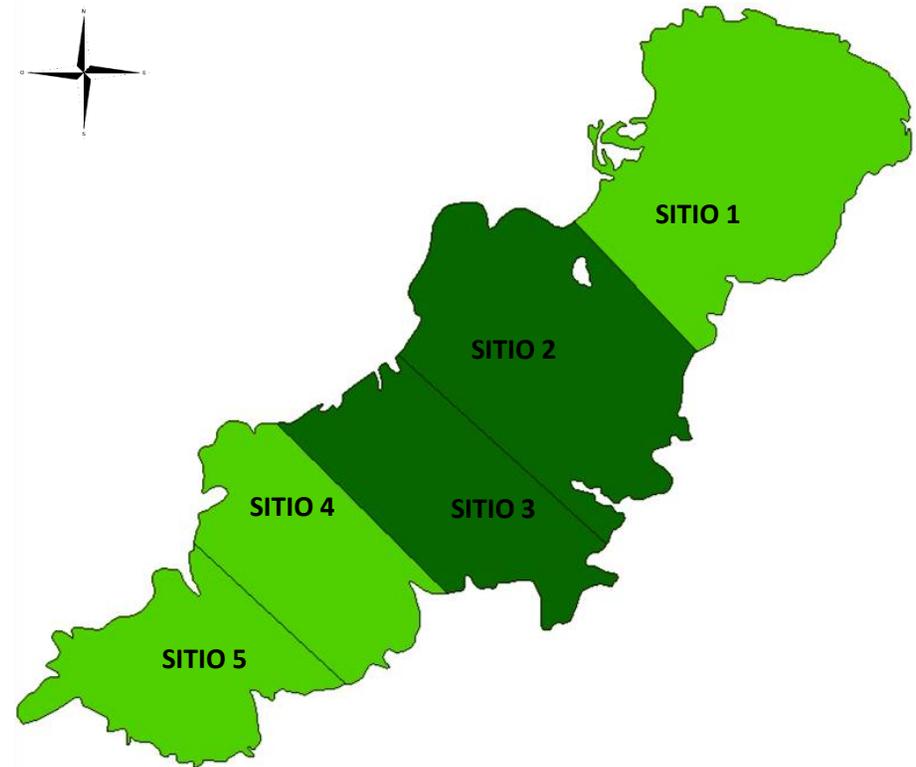
ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico (3)
	61.0000	90.0000	Eutrófico (2)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico

SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 25. Mapa temático [lagunaseccion] TSI FÓSFORO TOTAL-ANUAL (2009)

Tipo: cuantitativo

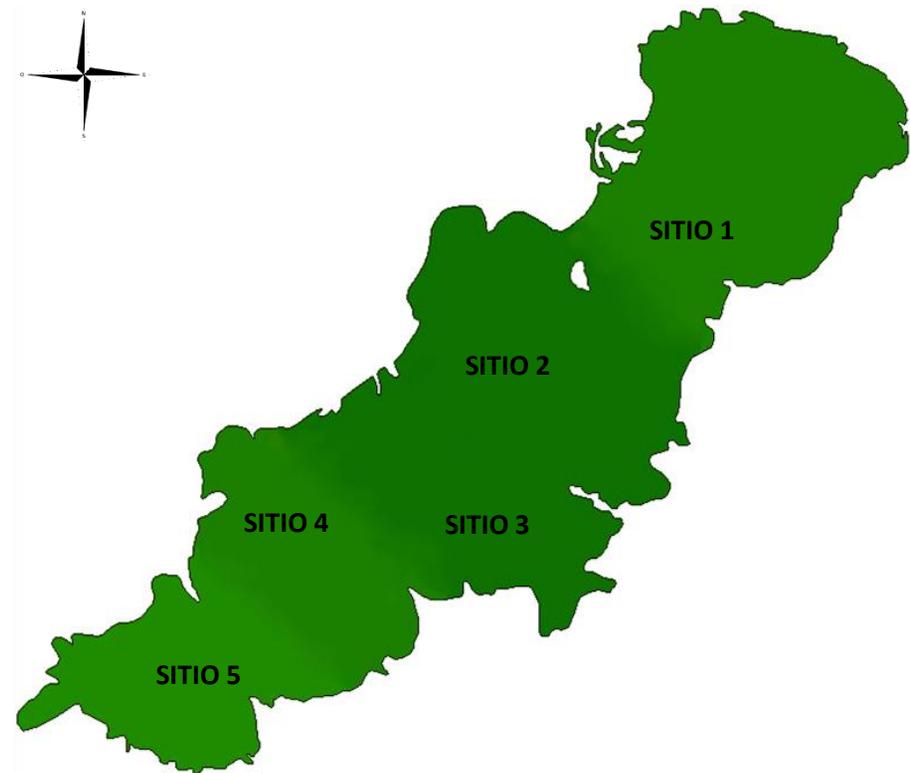
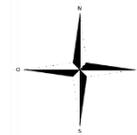
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80

ESCALA 1:500,000

La determinación de pigmentos fotosintéticos se emplea como indicador de la biomasa de organismos primarios presentes en los medios acuáticos, además de demostrar el estado trófico del área que se pretende estudiar. Así, el cálculo del TSI en base a la concentración de clorofila-*a* (mapas 26- 30) permitió corroborar que la laguna de Tecocomulco se encuentra eutrófica, hecho que se manifiesta con el aumento desmedido de macrófitas acuáticas, el enturbiamiento y coloración verdosa del agua.

5.3.2 Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) y estado trófico TRIX

La clasificación del estado trófico de un cuerpo de agua, normalmente se basa en el nutriente que representa una limitación. En la mayoría de los casos, el factor limitante es el P. No obstante, existen otros factores que deben tomarse en cuenta. A través del índice multivariado denominado “índice del estado trófico TRIX” se consideran factores de productividad y nutricionales.

Los resultados experimentales para la determinación de la concentración de clorofila-*a*, el % SO y los factores nutricionales como: concentración de N-NO_3^- , N-NO_2^- , N-NH_4^+ y PRS, se resumen en las tablas 11-14.

De acuerdo al TRIX y al criterio de la clasificación de la OECD, el agua de la laguna de Tecocomulco presentó valores que corresponden a un nivel trófico alto, es decir, el agua tiene poca calidad y es altamente productiva. Este nivel trófico podría asociarse a la mayor producción de fitoplancton favorecido por la disponibilidad de nutrientes, proveniente de las regiones agrícolas aledañas al sitio de estudio, al vertido de aguas residuales, la influencia de fosas sépticas, entre otras.

El N_2 , junto con el C y el P, es uno de los constituyentes principales del protoplasma celular de los organismos. Es uno de los nutrientes fundamentales que afectan la productividad de las aguas dulces.

El ciclo del N_2 en los ecosistemas acuáticos es complejo, ya que puede presentarse en varios estados de oxidación y su concentración se altera por la fijación de N_2 atmosférico, la asimilación y la desnitrificación o reducción del N-NO_3^- a N_2 . Para efectos prácticos, el ciclo del N_2 en lagos, lagunas y embalses es de naturaleza microbiana.

En el área de estudio, de forma natural, el N_2 proviene de la disolución del N_2 atmosférico y de la descomposición de compuestos orgánicos. Sin embargo, la incorporación de fertilizantes aplicados en las áreas de cultivo aledañas y de materia orgánica resultado de las actividades antropogénicas, constituyen la principal fuente de contaminación por N_2 en el cuerpo de agua.

Mapa 26. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-MARZO

Tipo: cuantitativo

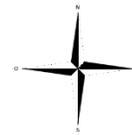
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

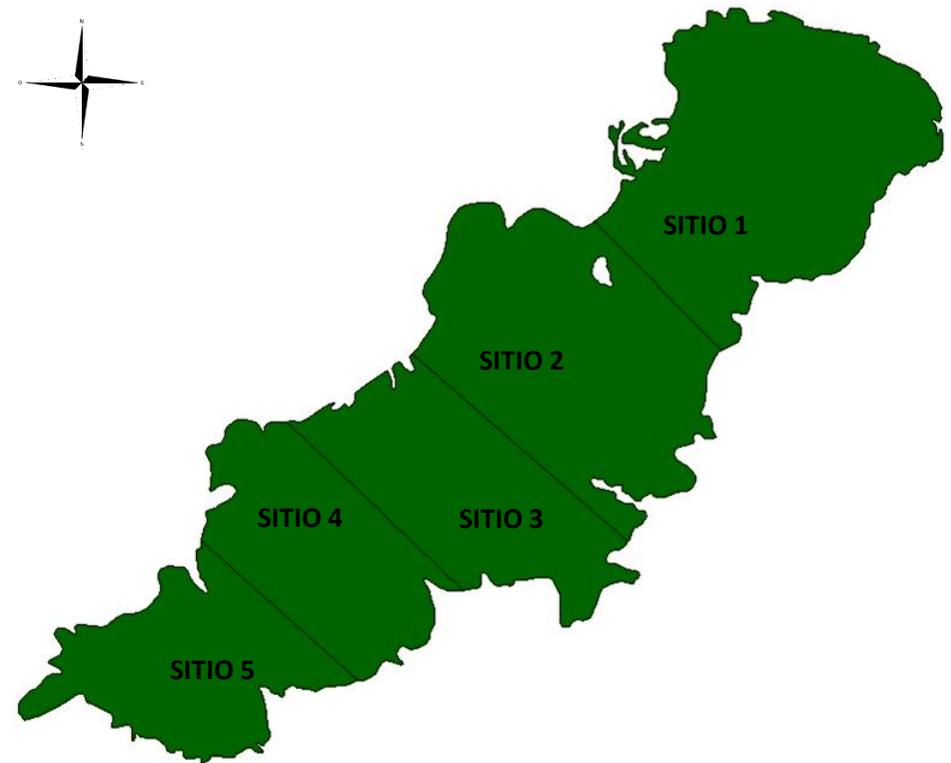
Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 27. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-JUNIO

Tipo: cuantitativo

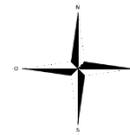
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

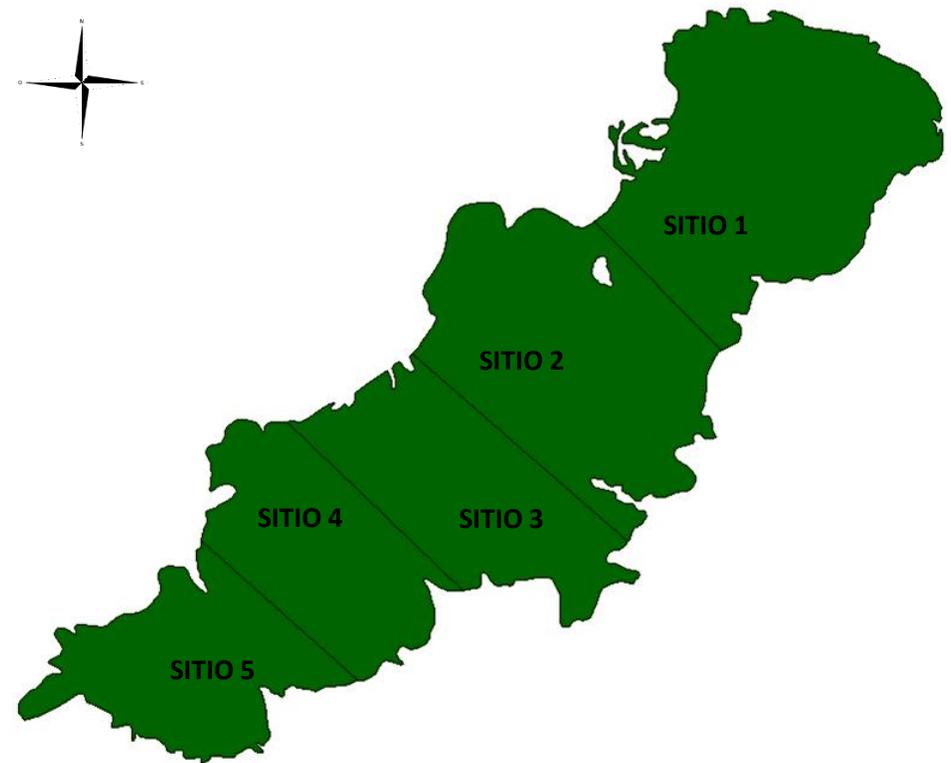
Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 28. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-SEPTIEMBRE

Tipo: cuantitativo

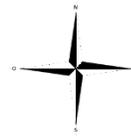
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

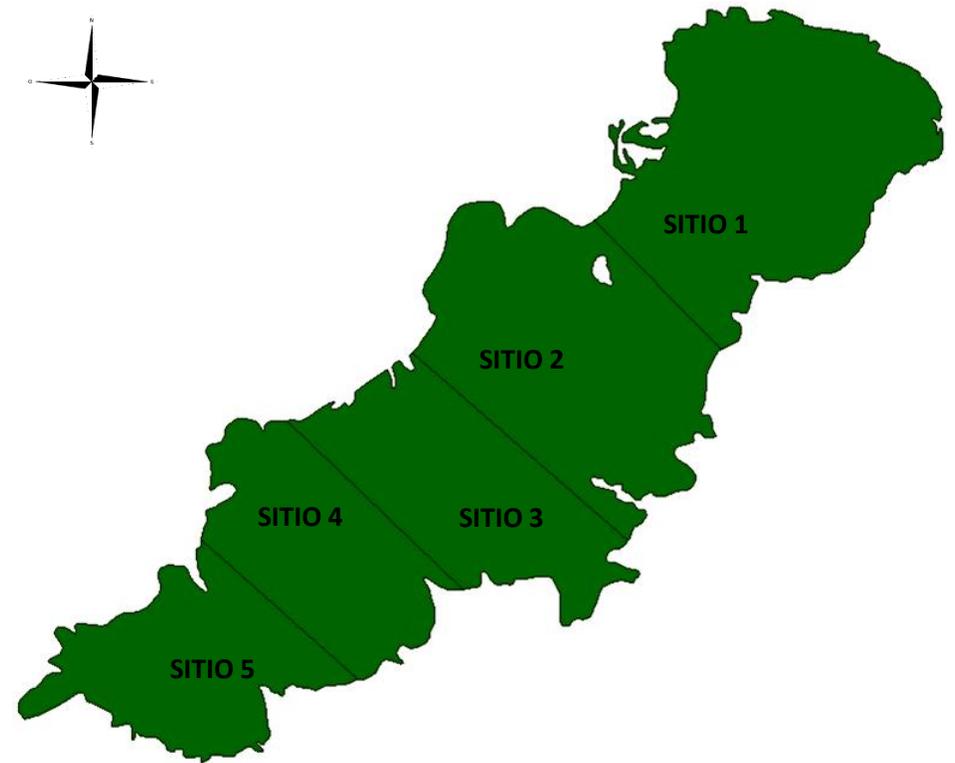
Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06"	98°22'20.17"	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61"	98°23'11.46"	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30"	98°23'07.75"	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67"	98°24'22.53"	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57"	98°25'03.93"	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 29. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-DICIEMBRE

Tipo: cuantitativo

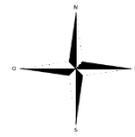
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

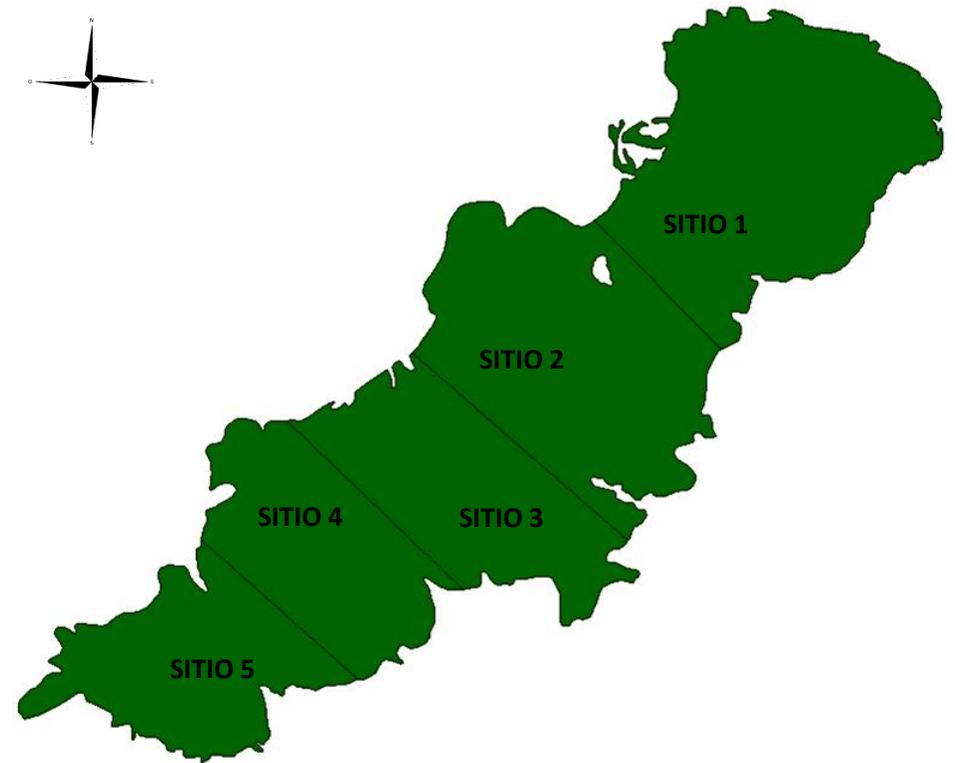
Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Mapa 30. Mapa temático [lagunaseccion] TSI CLOROFILA A-ANUAL (2009)

Tipo: cuantitativo

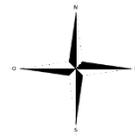
Estilo: color graduado

ESTRATIFICACIÓN

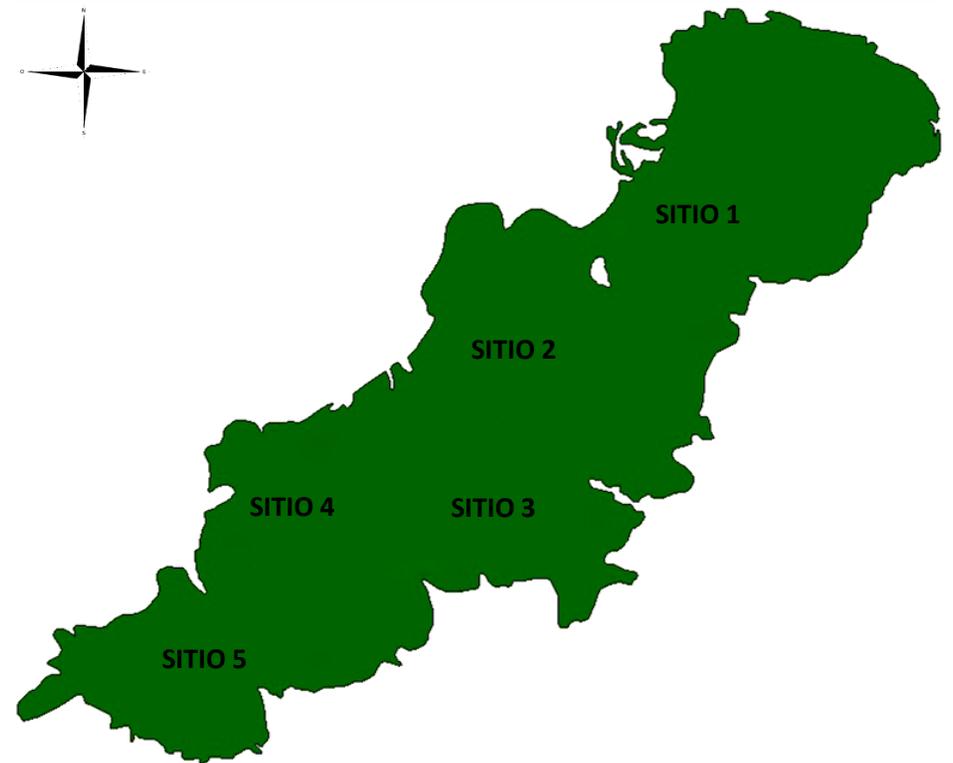
Método: personalizado

No. de estratos: 5

Esquema de colores: 			
Color	Mínimo	Máximo	Etiqueta
	0.0000	20.0000	Ultraoligotrófico
	21.0000	30.0000	Oligotrófico
	31.0000	60.0000	Mesotrófico
	61.0000	90.0000	Eutrófico (5)
	91.0000	100.0000	Hipereutrófico



SITIOS	COORDENADAS GEOGRÁFICAS			
	Grados, minutos, segundos		UTM (WGS84)	
	Latitud (N)	Longitud (W)	X	Y
SITIO 1	19°52'54.06''	98°22'20.17''	565713.88	2198510.86
SITIO 2	19°52'18.61''	98°23'11.46''	564226.26	2197415.66
SITIO 3	19°51'26.30''	98°23'07.75''	564339.95	2195808.01
SITIO 4	19°51'14.67''	98°24'22.53''	562166.41	2195442.89
SITIO 5	19°50'34.57''	98°25'03.93''	560966.45	2194205.80



ESCALA 1:500,000

Tabla 13. Factores nutricionales en la laguna de Tecocomulco.

Parámetro	Normatividad Mexicana	EPA	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
				Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
⁴ N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	Criterio ecológico para: agua potable (0.05 mg/L); uso pecuario (10 mg/L).	Criterio ecológico para: fuente de abastecimiento de agua potable (1 mg/L).	Sitio 1	0.021 ± 0.002	0.012 ± 0.001	0.019 ± 0.001	0.017 ± 0.001	0.017
			Sitio 2	0.022 ± 0.001	0.023 ± 0.001	0.023 ± 0.002	0.021 ± 0.001	0.022
			Sitio 3	0.012 ± 0.001	0.021 ± 0.002	0.027 ± 0.001	0.023 ± 0.001	0.020
			Sitio 4	0.031 ± 0.003	0.012 ± 0.001	0.019 ± 0.001	0.017 ± 0.003	0.019
			Sitio 5	0.010 ± 0.001	0.032 ± 0.001	0.020 ± 0.003	0.015 ± 0.001	0.019
			Media	0.019	0.020	0.021	0.018	
⁵ N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	Criterio ecológico para: agua potable (10 mg/L); uso pecuario (90 mg/L).	Criterio ecológico para: protección de la vida acuática (10 mg/L); fuente de abastecimiento de agua potable (10-11 mg/L).	Sitio 1	4.919 ± 0.022	4.281 ± 0.012	5.344 ± 0.012	4.906 ± 0.023	4.862
			Sitio 2	4.859 ± 0.015	4.129 ± 0.024	4.902 ± 0.038	5.124 ± 0.011	4.753
			Sitio 3	4.962 ± 0.017	4.233 ± 0.025	6.174 ± 0.023	4.808 ± 0.010	5.794
			Sitio 4	4.745 ± 0.037	4.080 ± 0.019	4.460 ± 0.009	5.326 ± 0.034	4.652
			Sitio 5	4.455 ± 0.012	4.003 ± 0.012	4.944 ± 0.022	5.436 ± 0.020	4.709
			Media	4.788	4.145	5.764	5.120	
⁶ N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	Criterio ecológico para: agua potable (0.5 mg/L); protección de la vida acuática (0.06 mg/L).	Criterio ecológico para: protección de la vida acuática (exposiciones de corta duración 0.05-0.35 mg/L, exposiciones de larga duración 0.004-0.02 mg/L); el valor varía con el pH y la temperatura.	Sitio 1	0.412 ± 0.001	0.535 ± 0.002	0.310 ± 0.009	0.381 ± 0.023	0.409
			Sitio 2	0.406 ± 0.002	0.581 ± 0.004	0.368 ± 0.002	0.343 ± 0.045	0.424
			Sitio 3	0.472 ± 0.004	0.603 ± 0.001	0.336 ± 0.008	0.280 ± 0.025	0.423
			Sitio 4	0.411 ± 0.003	0.557 ± 0.001	0.412 ± 0.003	0.347 ± 0.058	0.432
			Sitio 5	0.377 ± 0.001	0.483 ± 0.003	0.528 ± 0.023	0.488 ± 0.034	0.469
			Media	0.416	0.552	0.391	0.368	
N _{org} (mg/L)	Sin parámetro establecido.		Sitio 1	31.733 ± 0.002	32.547 ± 0.091	34.002 ± 0.039	32.981 ± 0.009	32.816
			Sitio 2	29.919 ± 0.012	31.723 ± 0.093	31.440 ± 0.031	35.582 ± 0.008	32.166
			Sitio 3	30.710 ± 0.093	29.533 ± 0.031	34.872 ± 0.019	33.787 ± 0.037	32.226
			Sitio 4	27.887 ± 0.033	28.467 ± 0.102	30.567 ± 0.013	32.298 ± 0.031	29.805
			Sitio 5	29.852 ± 0.131	31.598 ± 0.090	30.224 ± 0.017	29.783 ± 0.007	30.364
			Media	30.020	30.774	32.221	32.886	
NTK (mg/L)	Criterio ecológico para: uso en riego agrícola (40-60 mg/L); uso público urbano (40-60 mg/L); protección de la vida acuática (15-25 mg/L).	Sin parámetro establecido.	Sitio 1	32.145 ± 0.002	33.082 ± 0.021	34.312 ± 0.023	33.362 ± 0.009	33.225
			Sitio 2	30.325 ± 0.003	32.304 ± 0.025	31.808 ± 0.045	35.925 ± 0.024	32.591
			Sitio 3	31.182 ± 0.002	30.136 ± 0.013	35.208 ± 0.032	34.067 ± 0.058	32.648
			Sitio 4	28.298 ± 0.004	29.024 ± 0.045	30.979 ± 0.088	32.645 ± 0.012	30.237
			Sitio 5	30.229 ± 0.001	32.081 ± 0.021	30.752 ± 0.013	30.271 ± 0.004	30.833
			Media	30.436	31.325	32.612	33.254	

⁴Según la EEA (2005) para proteger la vida acuática se recomienda una concentración máxima de 0.09 mg/L; según Alonso (2005) se recomienda una concentración máxima de 0.08-0.35 mg/L durante exposiciones de corta duración; según la EEA (2000) se recomienda una concentración máxima de 1 mg/L en agua para consumo humano.

⁵Según Camargo y Alonso (2006, 2007) para proteger la vida acuática se recomienda una concentración máxima de 2 mg/L durante exposiciones prolongadas; según la EEA (2000) se recomienda de 10-11 mg/L en agua de bebida.

⁶Según la EEA (2000, 2005) y Alonso (2005) para proteger la vida acuática se recomienda: concentración máxima de 0.05-0.35 mg/L para exposiciones de corta duración y de 0.004-0.02 mg/L para exposiciones de larga duración.

Tabla 14. Determinación de PRS, %OD y Estado trófico TRIX.

Parámetro	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
		Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
PRS ($\mu\text{g/L}$)	Sitio 1	22.659 \pm 0.21	22.008 \pm 0.24	20.659 \pm 0.19	12.800 \pm 0.27	19.532
	Sitio 2	11.193 \pm 0.30	32.488 \pm 0.15	25.470 \pm 0.13	16.384 \pm 0.16	21.384
	Sitio 3	9.009 \pm 0.19	26.462 \pm 0.11	20.942 \pm 0.14	17.920 \pm 0.13	18.583
	Sitio 4	18.291 \pm 0.13	19.650 \pm 0.24	15.565 \pm 0.23	13.312 \pm 0.28	16.705
	Sitio 5	13.104 \pm 0.20	24.104 \pm 0.25	18.961 \pm 0.19	13.824 \pm 0.21	17.498
% OD	Sitio 1	42.18 \pm 0.17	21.09 \pm 0.24	63.28 \pm 0.25	66.08 \pm 0.12	48.16
	Sitio 2	17.42 \pm 0.34	9.25 \pm 0.16	53.40 \pm 0.27	64.71 \pm 0.37	36.19
	Sitio 3	57.01 \pm 0.47	23.77 \pm 0.17	67.23 \pm 0.36	73.64 \pm 0.17	55.41
	Sitio 4	75.23 \pm 0.09	69.28 \pm 0.24	58.00 \pm 0.17	81.57 \pm 0.18	71.02
	Sitio 5	93.23 \pm 0.14	83.13 \pm 0.19	79.24 \pm 0.14	95.69 \pm 0.16	87.82
TRIX	Sitio 1	8.37	8.46	8.23	7.95	8.25
	Sitio 2	8.36	8.78	8.35	8.06	8.39
	Sitio 3	8.06	8.62	8.14	7.97	8.20
	Sitio 4	7.94	8.02	8.15	7.75	7.96
	Sitio 5	7.36	7.93	7.85	7.26	7.60

Esta información se corrobora a través de los datos de N-NH_4^+ y N_{org} . En todos los sitios y periodos de muestreo, el contenido de NTK (tabla 13), comparado con la suma de N-NO_2^- , N-NO_3^- y N-NH_4^+ , señala que la especie principal de N_2 en la laguna de Tecocomulco es de origen orgánico (figura 17), cuya procedencia es: la vegetación sumergida y emergida en proceso de descomposición, excreciones de aves y ganado, aportes superficiales de aguas residuales y la influencia de fosas sépticas.

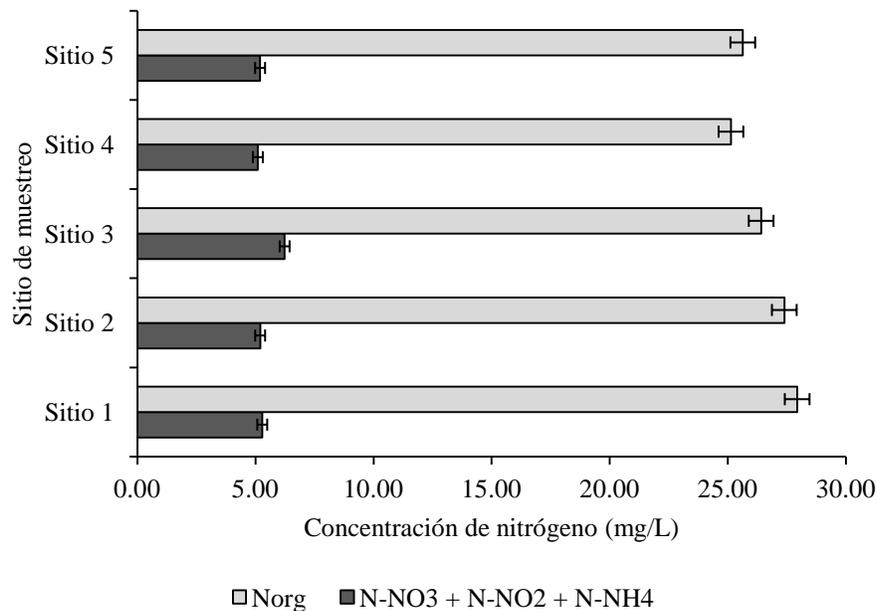


Figura 17. Distribución espacio-temporal de las especies de N_2 .

Los N-NO_3^- y N-NH_4^+ son las formas químicas de N_2 más importantes, ya que constituyen la fuente principal para los organismos residentes en este medio. En la laguna de Tecocomulco, el N-NO_2^- se encuentra en bajas cantidades, sin embargo se observa un ligero incremento en su concentración en marzo y junio, ya que la cantidad de OD disminuye en estas épocas del año. Bajo escasez del N-NH_4^+ y del N-NO_3^- , el fitoplancton puede tomar N-NO_2^- e incorporarlo a sus células, pero en altas concentraciones los N-NO_2^- son tóxicos.

El N-NH_4^+ es importante para los productores, ya que es utilizado como fuente de N_2 durante la síntesis de proteínas. Su concentración en el área de estudio es relativamente alta, lo que tiene grandes implicaciones ecológicas, ya que la oxidación demanda de O_2 , lo que va en detrimento de las comunidades acuáticas.

En el sitio de estudio, el N-NH_4^+ se encuentra en concentraciones superiores a 0.25 mg/L, lo cual afecta el crecimiento de los peces; además de favorecer la proliferación de hidrófitas, lo que contribuye al desarrollo de las condiciones eutróficas de la laguna.

Las plantas enraizadas toman los nutrientes del agua intersticial de los sedimentos, donde la concentración de estos es mayor; mientras que las flotantes lo hacen directamente de la columna de agua. Sin embargo, cuando el medio está eutrificado, la mayoría de los nutrientes son

tomados directamente del medio hídrico. Este fenómeno, se observa en Tecocomulco, a través de la rápida proliferación de plantas acuáticas, lo que favorece la acumulación de grandes cantidades de biomasa, que al descomponerse libera iones que son utilizados nuevamente para el desarrollo de nuevas hidrófitas. Esta alta productividad atenta contra la estabilidad de la laguna, pues, por un lado, crea condiciones hipóxicas o anóxicas, y por otro, fomenta una rápida colmatación de la misma.

5.4 Determinación de metales pesados en el agua

Los metales pesados se encuentran en los ambientes acuáticos por causas naturales y antropogénicas. Si bien algunos cumplen un papel importante en el crecimiento, desarrollo y reproducción de los seres vivos, su presencia en exceso los afecta negativamente. El monitoreo de metales pesados en el ambiente permite establecer posibles rutas de exposición humana, dado que estos elementos tienen la capacidad de acumularse y moverse a lo largo de la cadena trófica.

La presencia de metales en el agua es controlada por las variables del medio, como: pH, salinidad, presencia de materia orgánica particulada y la actividad biológica. La modificación de estos parámetros afecta su disponibilidad, acumulación y toxicidad en los organismos acuáticos.

El análisis de metales pesados en el agua de la laguna de Tecocomulco indicó bajas concentraciones de Cd, Cr, As, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn y Co (tabla 15). La procedencia de estas sustancias se puede deber a la lixiviación de suelos y rocas y a las actividades antropogénicas como la agricultura y el vertido de aguas residuales.

Según la EPA las concentraciones de Mn, Fe, Pb, Ni y Cd sobrepasan los límites establecidos para el uso del agua con fines de consumo humano (límites máximos permisibles EPA: 0.0 mg/L [Mn]; 0.3 mg/L [Fe]; 0.0 mg/L [Pb]; 0.001 mg/L [Ni]; 0.001 mg/L [Cd]).

Con lo que respecta a la Normatividad Mexicana, sólo el Fe, Cd y Co están por encima de los límites establecidos con fines de consumo humano (límites máximos permisibles NOM-127-SSA1-1994: 0.3mg/L [Fe]; 0.005 m/L [Cd]; 0.001 mg/L [Co]).

Tabla 15. Contenido de metales en el agua de la laguna de Tecocomulco.

Metal	Normatividad Mexicana	EPA	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
				Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
Zn (mg/L)	Criterio ecológico para: consumo humano (5.0 mg/L); riego agrícola (10-20 mg/L); uso público urbano (10-20 mg/L); protección de la vida acuática (10-20 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (5.0 mg/L).	Sitio 1	0.203 ± 0.001	0.197 ± 0.002	0.168 ± 0.001	0.143 ± 0.001	0.177
			Sitio 2	0.183 ± 0.001	0.175 ± 0.002	0.144 ± 0.001	0.121 ± 0.001	0.155
			Sitio 3	0.266 ± 0.003	0.248 ± 0.002	0.193 ± 0.002	0.169 ± 0.001	0.219
			Sitio 4	0.216 ± 0.001	0.221 ± 0.003	0.161 ± 0.001	0.173 ± 0.001	0.192
			Sitio 5	0.123 ± 0.002	0.136 ± 0.001	0.118 ± 0.001	0.109 ± 0.001	0.121
			Media	0.198	0.195	0.156	0.143	
Mn (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.15 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.0 mg/L).	Sitio 1	0.073 ± 0.001	0.095 ± 0.001	0.046 ± 0.001	0.041 ± 0.001	0.063
			Sitio 2	0.198 ± 0.002	0.201 ± 0.002	0.035 ± 0.001	0.024 ± 0.001	0.114
			Sitio 3	0.114 ± 0.002	0.124 ± 0.001	0.047 ± 0.001	0.032 ± 0.001	0.079
			Sitio 4	0.247 ± 0.001	0.325 ± 0.003	0.026 ± 0.001	0.028 ± 0.001	0.156
			Sitio 5	0.078 ± 0.001	0.099 ± 0.001	0.038 ± 0.001	0.052 ± 0.001	0.066
			Media	0.142	0.168	0.038	0.035	
Fe (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.30 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.3 mg/L); protección de la vida acuática (0.3 mg/L).	Sitio 1	0.324 ± 0.003	0.457 ± 0.002	0.294 ± 0.002	0.263 ± 0.002	0.334
			Sitio 2	0.875 ± 0.003	0.904 ± 0.004	0.221 ± 0.002	0.294 ± 0.003	0.573
			Sitio 3	0.748 ± 0.001	0.845 ± 0.002	0.367 ± 0.002	0.301 ± 0.003	0.565
			Sitio 4	0.501 ± 0.002	0.568 ± 0.002	0.192 ± 0.001	0.176 ± 0.002	0.359
			Sitio 5	0.487 ± 0.002	0.562 ± 0.001	0.254 ± 0.001	0.278 ± 0.002	0.395
			Media	0.587	0.667	0.265	0.262	
Cu (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (2.0 mg/L); riego agrícola (4-6 mg/L); uso público urbano (4-6 mg/L); protección de la vida acuática (4-6 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (1.0 mg/L); protección de la vida acuática (2.9 mg/L).	Sitio 1	0.154 ± 0.001	0.157 ± 0.001	0.132 ± 0.002	0.125 ± 0.001	0.142
			Sitio 2	0.098 ± 0.001	0.124 ± 0.002	0.104 ± 0.002	0.101 ± 0.001	0.106
			Sitio 3	0.189 ± 0.001	0.247 ± 0.001	0.169 ± 0.001	0.166 ± 0.001	0.192
			Sitio 4	0.147 ± 0.001	0.165 ± 0.001	0.153 ± 0.001	0.161 ± 0.001	0.156
			Sitio 5	0.197 ± 0.002	0.287 ± 0.001	0.279 ± 0.002	0.257 ± 0.003	0.255
			Media	0.157	0.196	0.167	0.162	
Pb (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.025 mg/L); riego agrícola (0.5-1 mg/L); uso público urbano (0.2-0.4 mg/L); protección de la vida acuática (0.2-0.4 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.0 mg/L).	Sitio 1	0.009 ± 0.0009	0.012 ± 0.001	0.009 ± 0.001	0.008 ± 0.001	0.009
			Sitio 2	0.011 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.008 ± 0.001	0.009 ± 0.001	0.011
			Sitio 3	0.010 ± 0.001	0.012 ± 0.001	0.010 ± 0.001	0.009 ± 0.001	0.010
			Sitio 4	0.014 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.009 ± 0.001	0.007 ± 0.0003	0.011
			Sitio 5	0.024 ± 0.003	0.027 ± 0.001	0.022 ± 0.001	0.019 ± 0.001	0.023
			Media	0.014	0.016	0.012	0.010	

NOM-001-ECOL-1996; NOM-127-SSA1-1994; EPA 440/5-86-001 (1986 Edition of Quality Criteria for Water).

EPA 822-R-06-013 (2006 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories).

Tabla 15. Contenido de metales en el agua de la laguna de Tecocomulco (continuación).

Metal	Normatividad Mexicana	EPA	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				
				Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	Media
Ni (mg/L)	Criterio ecológico para: riego agrícola (2-4 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.001 mg/L); protección de la vida acuática (0.0013 mg/L).	Sitio 1	0.003 ± 0.0002	0.005 ± 0.0001	0.004 ± 0.0002	0.005 ± 0.0001	0.004
			Sitio 2	0.001 ± 0.0002	0.006 ± 0.0001	0.004 ± 0.0001	0.005 ± 0.0001	0.004
			Sitio 3	0.004 ± 0.0002	0.005 ± 0.0002	0.005 ± 0.0002	0.004 ± 0.0001	0.005
			Sitio 4	0.004 ± 0.0001	0.007 ± 0.0001	0.005 ± 0.0002	0.006 ± 0.0003	0.006
			Sitio 5	0.003 ± 0.0003	0.006 ± 0.0001	0.004 ± 0.0001	0.004 ± 0.0001	0.004
			Media	0.003	0.006	0.004	0.005	
As (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.05 mg/L); riego agrícola (0.2-0.4 mg/L); uso público urbano (0.1-0.2 mg/L); protección de la vida acuática (0.1-0.2 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.05 mg/L).	Sitio 1	0.020 ± 0.002	0.010 ± 0.001	0.009 ± 0.0004	0.011 ± 0.001	0.013
			Sitio 2	0.040 ± 0.001	0.020 ± 0.001	0.018 ± 0.001	0.019 ± 0.001	0.024
			Sitio 3	0.020 ± 0.001	0.010 ± 0.001	0.008 ± 0.0002	0.009 ± 0.0002	0.012
			Sitio 4	0.020 ± 0.002	0.030 ± 0.002	0.024 ± 0.001	0.021 ± 0.001	0.024
			Sitio 5	0.018 ± 0.001	0.030 ± 0.001	0.025 ± 0.001	0.027 ± 0.001	0.025
			Media	0.027	0.020	0.017	0.017	
Cd (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.005 mg/L); riego agrícola (0.2-0.4 mg/L); uso público urbano (0.1-0.2 mg/L); protección de la vida acuática (0.1-0.2 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.001 mg/L); protección de la vida acuática (0.01 mg/L).	Sitio 1	0.013 ± 0.001	0.018 ± 0.001	0.009 ± 0.0001	0.007 ± 0.0002	0.012
			Sitio 2	0.014 ± 0.001	0.024 ± 0.002	0.017 ± 0.001	0.012 ± 0.001	0.017
			Sitio 3	0.011 ± 0.001	0.022 ± 0.001	0.019 ± 0.001	0.013 ± 0.001	0.016
			Sitio 4	0.010 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.009 ± 0.0003	0.007 ± 0.0002	0.010
			Sitio 5	0.027 ± 0.002	0.027 ± 0.002	0.022 ± 0.001	0.017 ± 0.0002	0.023
			Media	0.015	0.021	0.015	0.011	
Cr (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.05 mg/L); riego agrícola (1-1.5 mg/L); uso público urbano (0.5-1 mg/L); protección de la vida acuática (0.5-1 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.06 mg/L).	Sitio 1	0.014 ± 0.001	0.013 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.014
			Sitio 2	0.016 ± 0.003	0.015 ± 0.001	0.016 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.016
			Sitio 3	0.011 ± 0.002	0.013 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.013 ± 0.001	0.013
			Sitio 4	0.012 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.016 ± 0.002	0.014 ± 0.001	0.014
			Sitio 5	0.014 ± 0.001	0.011 ± 0.001	0.012 ± 0.001	0.013 ± 0.001	0.013
			Media	0.013	0.013	0.014	0.014	
Hg (mg/L)	Criterio ecológico: agua para consumo humano (0.001 mg/L); riego agrícola (0.01-0.02 mg/L); uso público urbano (0.005-0.01 mg/L); protección de la vida acuática (0.005-0.01 mg/L).	Criterio ecológico para: consumo humano (0.002 mg/L); protección de la vida acuática (0.025 mg/L).	Sitio 1	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			Sitio 2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			Sitio 3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			Sitio 4	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			Sitio 5	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
			Media	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	

NOM-001-ECOL-1996; NOM-127-SSA1-1994; EPA 440/5-86-001 (1986 Edition of Quality Criteria for Water).
EPA 822-R-06-013 (2006 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories).

5.5 Especiación de metales pesados en sedimentos

Los metales pesados que ingresan a los ecosistemas acuáticos se encuentran en forma particulada, coloidal, disuelta y formando complejos; los cuales son controlados por las condiciones fisicoquímicas del medio, tales como: pH, salinidad, potencial redox y materia orgánica. Los cambios en estos parámetros provocan la migración de los metales de la columna del agua a los sedimentos, o viceversa.

En el sedimento de la laguna de Tecocomulco el porcentaje promedio de materia orgánica (tabla 16) fue alto en todas las estaciones de muestreo (11.67, 12.37, 10.83, 11.80 y 12.17%; para los sitios 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente), que se debe a la alta productividad de la laguna durante todos los meses del año.

El pH juega un papel importante para la liberación y retención de diversas especies iónicas de metales asociados a los sedimentos. En la tabla 18 se observa que el pH se mantuvo relativamente “neutro” en todos los sitios y periodos de muestreo, siendo las estaciones 1 y 5 las que presentaron los valores más bajos y altos, respectivamente.

En materia de metales pesados, en sedimentos se pueden realizar dos tipos de determinaciones: la evaluación de la concentración total y la especiación de las diferentes formas químicas en las que se encuentran.

En el sedimento del área de estudio se detectó la presencia, bajo el siguiente orden decreciente de concentración, de: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr>As>Cd>Co (tabla 17).

Para estimar la movilidad de dichos contaminantes bajo pequeños cambios ambientales, se determinó el tipo de sustrato al que se hallan ligados. Los mecanismos de acumulación de metales en sedimentos conducen a la existencia de cinco formas geoquímicas (Shiowatana *et al.*, 2001):

1. Intercambiables.
2. Unidos a carbonatos.
3. Unidos a óxidos de hierro y manganeso.
4. Unidos a la materia orgánica.
5. Fase metálica residual.

Estas fracciones metálicas tienen diferente movilidad, disponibilidad biológica y comportamiento químico. Así, para el análisis de los sedimentos de la laguna de Tecocomulco, se utilizó una técnica de extracción sucesiva para determinar las asociaciones de metales pesados en fases específicas sedimentarias y se estimó la disponibilidad potencial de compuestos tóxicos para su ingreso a la biota ahí presente.

Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos de los sedimentos de la laguna de Tecocomulco.

Parámetro	Estación de muestreo	Periodo de muestreo 2009 (Resultados con un IC del 95%)				Media
		Marzo	Junio	Septiembre	Diciembre	
pH	Sitio 1	6.48 ± 0.13	6.22 ± 0.26	6.41 ± 0.14	6.53 ± 0.13	6.41
	Sitio 2	7.25 ± 0.15	7.21 ± 0.15	7.67 ± 0.16	7.73 ± 0.20	7.46
	Sitio 3	7.45 ± 0.17	7.23 ± 0.13	7.57 ± 0.15	7.61 ± 0.12	7.46
	Sitio 4	7.60 ± 0.16	7.33 ± 0.23	7.71 ± 0.14	7.65 ± 0.19	7.57
	Sitio 5	7.68 ± 0.22	7.63 ± 0.12	7.72 ± 0.11	7.77 ± 0.13	7.70
Conductividad (dS/cm)	Sitio 1	0.291 ± 0.012	0.283 ± 0.009	0.262 ± 0.005	0.254 ± 0.007	0.273
	Sitio 2	0.139 ± 0.009	0.178 ± 0.009	0.101 ± 0.001	0.109 ± 0.015	0.132
	Sitio 3	0.161 ± 0.014	0.183 ± 0.012	0.172 ± 0.013	0.169 ± 0.006	0.171
	Sitio 4	0.122 ± 0.010	0.124 ± 0.008	0.109 ± 0.010	0.112 ± 0.005	0.117
	Sitio 5	0.127 ± 0.010	0.135 ± 0.013	0.121 ± 0.001	0.119 ± 0.003	0.126
% Corgánico	Sitio 1	6.01 ± 0.11	7.25 ± 0.15	6.94 ± 0.03	6.86 ± 0.03	6.77
	Sitio 2	6.40 ± 0.11	7.72 ± 0.09	7.10 ± 0.20	7.02 ± 0.01	7.06
	Sitio 3	6.01 ± 0.29	6.55 ± 0.13	6.32 ± 0.10	6.24 ± 0.10	6.28
	Sitio 4	6.40 ± 0.16	7.10 ± 0.11	7.02 ± 0.05	6.86 ± 0.02	6.85
	Sitio 5	6.71 ± 0.02	7.33 ± 0.02	7.18 ± 0.03	7.02 ± 0.11	7.06
% Materia orgánica	Sitio 1	10.35 ± 0.13	12.51 ± 0.01	11.97 ± 0.15	11.83 ± 0.10	11.67
	Sitio 2	11.03 ± 0.20	13.31 ± 0.03	12.24 ± 0.10	12.90 ± 0.09	12.37
	Sitio 3	10.35 ± 0.12	11.30 ± 0.01	10.90 ± 0.11	10.76 ± 0.09	10.83
	Sitio 4	11.03 ± 0.02	12.24 ± 0.10	12.10 ± 0.09	11.83 ± 0.08	11.80
	Sitio 5	11.56 ± 0.14	12.64 ± 0.11	12.37 ± 0.09	12.10 ± 0.09	12.17

Tabla 17. Concentración de metales pesados promedio anual para la laguna de Tecocomulco en mg/Kg de muestra seca.

Metal	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Zn	2.342	2.58	12.234	13.49	18.485	20.38	22.024	24.28	35.624	39.27	90.708
Cd	0.077	1.29	0.257	4.30	0.362	6.06	1.428	23.90	3.849	64.45	5.973
Cu	0.018	0.05	0.143	0.39	0.320	0.87	8.837	24.09	27.371	74.60	36.689
Ni	0.274	1.20	0.260	1.15	4.349	19.14	4.069	17.90	13.775	60.61	22.726
Co	0.045	4.38	0.616	60.06	0.193	18.85	0.091	8.84	0.081	7.86	1.026
Pb	0.692	0.90	9.264	12.02	42.858	55.60	5.154	6.69	19.118	24.80	77.085
Cr	0.024	0.13	0.222	1.22	1.435	7.85	2.501	13.67	14.111	77.14	18.293
Mn	98.234	19.92	247.417	50.18	52.494	10.65	9.528	1.93	85.423	17.32	493.095
Fe	1.571	0.01	1.915	0.02	2557.844	23.43	1533.762	14.05	6820.469	62.48	10915.561
As	0.009	0.08	0.001	0.01	1.841	16.37	0.674	5.99	8.725	77.56	11.249

Se utilizó una modificación del método de extracción sucesiva propuesta por Hall (Zakir y Shikazono, 2008). Se determinaron las siguientes fracciones:

- a) *Metales intercambiables*. Están sujetos a procesos de adsorción-desorción de acuerdo a los cambios en las propiedades del agua como el pH y la fuerza iónica. Pueden ser liberados fácilmente del sedimento hacia la columna del agua.
- b) *Metales unidos a carbonatos*. Están moderadamente disponibles. Se liberan principalmente debido a las variaciones de pH. Los metales unidos a esta fase se liberan al descender el pH del agua y de los sedimentos al disolverse los metales precipitados en forma de carbonato.
- c) *Metales unidos a óxidos de hierro y manganeso*. Los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn juegan un papel importante en la retención de los metales pesados. Tienen la capacidad de fijar a los metales e inmovilizarlos, principalmente metales divalentes como el Cu y Pb; y en menor proporción el Zn, Co, Cr, Mo y Ni.
- d) *Metales unidos a la materia orgánica*. La materia orgánica reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Los metales una vez que forman complejos pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil.
- e) *Fracción residual*. Esta fracción está compuesta principalmente de minerales primarios y secundarios que poseen metales dentro de su estructura cristalina. Los metales en esta fracción son considerados muy estables por estar inmóviles. Su liberación en un periodo razonable de tiempo es ciertamente improbable.

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 18-67.

Tabla 18. Concentración de Zn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Zn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	2.739	2.84	12.301	12.77	19.624	20.38	23.881	24.80	37.761	39.21	96.306
Sitio 2	1.928	2.14	11.241	12.50	17.123	19.04	21.385	23.78	38.245	42.53	89.922
Sitio 3	2.352	2.49	13.242	14.00	19.437	20.56	24.293	25.69	35.232	37.26	94.556
Sitio 4	3.001	3.32	12.364	13.70	18.376	20.36	23.241	25.74	33.291	36.88	90.273
Sitio 5	2.235	2.34	13.002	13.64	17.589	18.45	26.358	27.65	36.141	37.91	95.325

Tabla 19. Contenido de Zn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Zn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	2.432	2.53	14.216	14.80	20.019	20.84	20.249	21.08	39.123	40.74	96.039
Sitio 2	2.652	2.98	10.346	11.64	18.245	20.53	24.356	27.40	33.287	37.45	88.886
Sitio 3	2.745	2.74	12.353	12.31	19.456	19.39	25.786	25.69	40.018	39.88	100.358
Sitio 4	1.351	1.51	13.242	14.80	17.349	19.39	22.234	24.85	35.314	39.46	89.49
Sitio 5	3.239	3.58	14.531	16.07	18.854	20.85	20.573	22.75	33.238	36.75	90.435

Tabla 20. Contenido de Zn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Zn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	1.949	2.16	12.352	13.69	18.342	20.32	22.387	24.80	35.236	39.04	90.266
Sitio 2	2.001	2.37	10.632	12.61	18.243	21.64	23.298	27.64	30.123	35.73	84.297
Sitio 3	2.451	2.67	11.732	12.76	19.874	21.61	20.762	22.58	37.127	40.38	91.946
Sitio 4	1.902	2.08	11.736	12.83	19.242	21.04	22.287	24.37	36.271	39.67	91.438
Sitio 5	2.944	3.51	12.126	14.44	17.341	20.65	19.363	23.05	32.214	38.36	83.988

Tabla 21. Contenido de Zn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Zn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	2.934	3.27	12.237	13.62	19.224	21.40	20.249	22.54	35.192	39.17	89.836
Sitio 2	2.701	2.91	11.284	12.16	16.242	17.50	24.124	25.99	38.462	41.44	92.813
Sitio 3	2.083	2.37	12.319	14.00	17.251	19.60	19.214	21.84	37.126	42.19	87.993
Sitio 4	1.263	1.43	11.349	12.87	19.234	21.81	21.157	23.99	35.183	39.90	88.186
Sitio 5	1.931	2.36	12.084	14.77	18.628	22.77	15.274	18.67	33.897	41.43	81.814

Tabla 22. Contenido de Cd por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cd total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.105	1.88	0.342	6.12	0.453	8.10	1.194	21.35	3.497	62.55	5.591
Sitio 2	Nd		0.143	3.74	0.197	5.15	1.368	35.74	2.119	55.37	3.827
Sitio 3	0.311	6.06	0.103	2.01	0.440	8.57	1.023	19.93	3.256	63.43	5.133
Sitio 4	Nd		0.274	5.41	0.237	4.68	1.208	23.87	3.342	66.03	5.061
Sitio 5	0.220	3.52	0.401	6.42	0.623	9.98	1.230	19.70	3.769	60.37	6.243

Tabla 23. Contenido de Cd por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cd total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.170	2.29	0.412	5.55	0.411	5.53	1.067	14.36	5.369	72.27	7.429
Sitio 2	0.008	0.09	0.207	2.43	0.841	9.85	2.641	30.94	4.838	56.68	8.535
Sitio 3	0.153	1.88	0.454	5.56	0.512	6.28	1.033	12.66	6.007	73.62	8.159
Sitio 4	Nd		0.212	2.37	0.392	4.37	1.923	21.46	6.435	71.80	8.962
Sitio 5	Nd		0.487	5.26	0.533	5.76	3.265	35.27	4.973	53.72	9.258

Tabla 24. Contenido de Cd por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cd total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1		Nd	0.112	1.64	0.249	3.64	1.159	16.94	5.321	77.78	6.841
Sitio 2		Nd	0.214	4.65	0.214	4.65	1.267	27.53	2.907	63.17	4.602
Sitio 3	0.082	1.34	0.322	5.28	0.351	5.75	1.006	16.49	4.341	71.14	6.102
Sitio 4	0.071	1.49	0.124	2.60	0.126	2.64	1.168	24.47	3.284	68.80	4.773
Sitio 5	0.053	0.91	0.301	5.16	0.511	8.76	1.249	21.40	3.722	63.78	5.836

Tabla 25. Contenido de Cd por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cd total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.091	2.49	0.146	3.99	0.276	7.54	1.029	28.12	2.117	57.86	3.659
Sitio 2		Nd	0.291	4.96	0.166	2.83	2.410	41.05	3.004	51.17	5.871
Sitio 3	0.104	2.51	0.155	3.75	0.205	4.96	1.208	29.21	2.464	59.57	4.136
Sitio 4	0.052	0.92	0.236	4.16	0.190	3.35	1.003	17.70	4.186	73.87	5.667
Sitio 5	0.117	3.11	0.201	5.34	0.314	8.34	1.101	29.24	2.032	53.97	3.765

Tabla 26. Contenido de Cu por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cu total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.030	0.08	0.184	0.47	0.322	0.83	9.817	25.27	28.497	73.35	38.850
Sitio 2	0.032	0.09	0.123	0.34	0.243	0.66	9.241	25.23	26.987	73.68	36.626
Sitio 3		Nd	0.147	0.43	0.251	0.74	8.245	24.18	25.452	74.65	34.095
Sitio 4		Nd		Nd	0.351	0.93	9.002	23.95	28.231	75.11	37.584
Sitio 5	0.023	0.06	0.126	0.33	0.386	1.01	9.281	24.32	28.347	74.28	38.163

Tabla 27. Contenido de Cu por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cu total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.034	0.09	Nd		0.521	1.30	10.002	25.01	29.438	73.60	39.995
Sitio 2	0.061	0.15	0.254	0.61	0.239	0.58	9.023	21.79	31.831	76.87	41.408
Sitio 3	0.009	0.03	0.197	0.55	0.634	1.79	10.241	28.84	24.429	68.79	35.510
Sitio 4	0.003	0.01	0.248	0.62	0.235	0.59	8.761	21.90	30.763	76.89	40.010
Sitio 5	0.021	0.05	0.092	0.23	0.312	0.78	9.614	24.12	29.821	74.81	39.860

Tabla 28. Contenido de Cu por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cu total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	Nd		0.023	0.06	0.249	0.66	9.962	26.60	27.221	72.68	37.455
Sitio 2	Nd		0.123	0.35	0.287	0.81	8.912	25.29	25.917	73.55	35.239
Sitio 3	0.013	0.03	0.113	0.29	0.313	0.81	9.231	23.89	28.973	74.98	38.643
Sitio 4	Nd		0.235	0.64	0.268	0.73	7.825	21.30	28.412	77.33	36.740
Sitio 5	0.011	0.03	0.341	0.91	0.234	0.62	8.844	23.55	28.126	74.89	37.556

Tabla 29. Contenido de Cu por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cu total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.023	0.07	0.100	0.29	0.341	0.98	7.414	21.26	26.987	77.40	34.865
Sitio 2	0.027	0.09	0.141	0.48	0.385	1.30	9.003	30.47	19.987	67.65	29.543
Sitio 3	0.031	0.08	0.134	0.36	0.274	0.73	8.237	21.93	28.892	76.91	37.568
Sitio 4	0.020	0.06	0.083	0.23	0.172	0.48	6.841	19.07	28.763	80.17	35.879
Sitio 5	0.031	0.11	0.192	0.68	0.381	1.35	7.238	25.68	20.341	72.17	28.183

Tabla 30. Contenido de Ni por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Ni total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.331	1.54	0.154	0.72	3.854	17.93	3.585	16.68	13.572	63.14	21.496
Sitio 2	0.152	0.57	0.128	0.48	3.346	12.60	4.211	15.85	18.726	70.50	26.563
Sitio 3	0.230	0.99	0.244	1.05	4.763	20.46	4.348	18.68	13.691	58.82	23.276
Sitio 4	0.352	1.62	0.347	1.60	4.831	22.22	3.451	15.87	12.763	58.70	21.744
Sitio 5	0.406	1.64	0.135	0.55	4.193	16.95	4.264	17.24	15.739	63.63	24.737

Tabla 31. Contenido de Ni por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Ni total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.430	1.97	0.354	1.62	3.128	14.32	3.381	15.48	14.551	66.61	21.844
Sitio 2	0.126	0.50	0.234	0.92	4.418	17.41	4.849	19.11	15.743	62.05	25.370
Sitio 3	0.234	0.83	0.451	1.59	5.631	19.90	4.851	17.14	17.133	60.54	28.300
Sitio 4	0.347	1.60	0.212	0.98	4.131	19.02	4.374	20.14	12.653	58.26	21.717
Sitio 5	0.282	1.22	0.346	1.50	5.633	24.43	4.124	17.89	12.672	54.96	23.057

Tabla 32. Contenido de Ni por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Ni total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.488	2.25	0.283	1.30	3.386	15.58	3.312	15.24	14.263	65.63	21.732
Sitio 2	0.261	1.24	0.214	1.02	4.841	22.98	4.356	20.67	11.397	54.09	21.069
Sitio 3	0.252	1.14	0.349	1.58	5.148	23.28	4.237	19.16	12.123	54.83	22.109
Sitio 4	0.420	1.90	0.241	1.09	4.019	18.14	3.385	15.28	14.085	63.59	22.150
Sitio 5	0.124	0.55	0.317	1.41	4.974	22.10	4.852	21.56	12.239	54.38	22.506

Tabla 33. Contenido de Ni por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Ni total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.354	1.47	0.239	0.99	4.742	19.66	4.552	18.87	14.237	59.02	24.124
Sitio 2	0.126	0.64	0.247	1.25	2.985	15.14	3.482	17.66	12.873	65.30	19.713
Sitio 3	0.361	1.86	0.132	0.68	3.938	20.24	3.342	17.18	11.681	60.04	19.454
Sitio 4	0.093	0.45	0.457	2.19	4.131	19.77	3.932	18.82	12.279	58.77	20.892
Sitio 5	0.101	0.45	0.121	0.53	4.884	21.54	4.482	19.77	13.084	57.71	22.672

Tabla 34. Contenido de Co por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Co total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.117	5.72	1.059	51.73	0.871	42.55	Nd		Nd		2.047
Sitio 2	0.036	14.01	0.221	85.99			Nd		Nd		0.257
Sitio 3	Nd		0.261	22.68			0.418	36.32	0.472	41.01	1.151
Sitio 4	0.091	5.36	1.191	70.14	0.416	24.50			Nd		1.698
Sitio 5	0.035	17.33	0.167	82.67					Nd		0.202

Tabla 35. Contenido de Co por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Co total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.174	4.11	3.132	73.99	0.927	21.90			Nd		4.233
Sitio 2	Nd		0.158	100.00					Nd		0.158
Sitio 3	0.025	2.01	0.278	22.37			0.609	48.99	0.331	26.63	1.243
Sitio 4	0.031	2.34	0.960	72.40	0.335	25.26			Nd		1.326
Sitio 5	Nd		0.199	100.00					Nd		0.199

Tabla 36. Contenido de Co por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)											Co total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales			
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%		
Sitio 1	0.142	8.21	1.172	67.75	0.416	24.05		Nd		Nd		1.73
Sitio 2		Nd	0.251	100.00				Nd		Nd		0.251
Sitio 3	0.040	4.07		Nd			0.522	53.10	0.421	42.83		0.983
Sitio 4	0.020	1.74	0.871	75.61	0.261	22.66		Nd		Nd		1.152
Sitio 5	0.031	16.49	0.106	56.38	0.051	27.13		Nd		Nd		0.188

Tabla 37. Contenido de Co por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)											Co total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales			
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%		
Sitio 1	0.102	5.82	1.062	60.55	0.59	33.64		Nd		Nd		1.754
Sitio 2		Nd	0.217	100.00				Nd		Nd		0.217
Sitio 3	0.032	3.83	0.173	20.72			0.241	28.86	0.389	46.59		0.835
Sitio 4	0.023	3.62	0.612	96.38				Nd		Nd		0.635
Sitio 5		Nd	0.231	90.94			0.023	9.06		Nd		0.254

Tabla 38. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)											Pb total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales			
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%		
Sitio 1	0.882	1.12	9.946	12.64	43.806	55.69	5.471	6.96	18.556	23.59		78.661
Sitio 2	0.671	0.90	9.106	12.20	39.627	53.08	5.618	7.53	19.633	26.30		74.655
Sitio 3	0.471	0.63	8.731	11.68	42.676	57.11	5.177	6.93	17.674	23.65		74.729
Sitio 4	0.617	0.77	9.963	12.40	45.002	56.02	4.617	5.75	20.127	25.06		80.326
Sitio 5	0.674	0.87	9.125	11.84	43.182	56.05	4.937	6.41	19.12	24.82		77.038

Tabla 39. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Pb total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.879	1.10	10.121	12.66	45.156	56.49	5.667	7.09	18.117	22.66	79.94
Sitio 2	0.884	1.08	9.719	11.89	44.687	54.67	6.725	8.23	19.722	24.13	81.737
Sitio 3	0.847	1.09	8.622	11.08	43.156	55.46	5.120	6.58	20.067	25.79	77.812
Sitio 4	0.492	0.62	9.226	11.58	46.659	58.56	4.674	5.87	18.624	23.37	79.675
Sitio 5	1.024	1.25	10.62	12.93	44.667	54.39	5.143	6.26	20.675	25.17	82.129

Tabla 40. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Pb total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.519	0.70	9.117	12.22	41.636	55.81	4.713	6.32	18.624	24.96	74.609
Sitio 2	0.647	0.83	9.546	12.31	43.121	55.61	5.117	6.60	19.107	24.64	77.538
Sitio 3	0.491	0.67	8.619	11.74	39.962	54.44	5.774	7.87	18.565	25.29	73.411
Sitio 4	0.438	0.58	8.487	11.20	42.096	55.57	5.116	6.75	19.616	25.89	75.753
Sitio 5	0.972	1.25	9.014	11.60	43.662	56.20	4.974	6.40	19.072	24.55	77.694

Tabla 41. Concentración de Pb por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Pb total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.667	0.88	9.116	12.06	43.077	56.98	4.616	6.11	18.118	23.97	75.594
Sitio 2	0.821	1.10	8.615	11.51	41.175	55.01	5.022	6.71	19.216	25.67	74.849
Sitio 3	0.717	0.96	9.501	12.73	40.066	53.70	5.117	6.86	19.211	25.75	74.612
Sitio 4	0.615	0.81	9.116	12.08	41.675	55.20	4.616	6.11	19.471	25.79	75.493
Sitio 5	0.512	0.68	8.962	11.88	42.066	55.75	4.866	6.45	19.047	25.24	75.453

Tabla 42. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cr total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.035	0.19	0.244	1.32	1.765	9.52	2.962	15.97	13.543	73.01	18.549
Sitio 2	0.032	0.16	0.263	1.34	1.723	8.75	2.834	14.40	14.834	75.35	19.686
Sitio 3	0.023	0.13	0.192	1.09	1.625	9.20	1.941	10.99	13.873	78.58	17.654
Sitio 4	0.021	0.10	0.242	1.15	1.332	6.35	3.41	16.25	15.981	76.15	20.986
Sitio 5	Nd		0.161	1.01	0.927	5.81	2.234	13.99	12.642	79.19	15.964

Tabla 43. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cr total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.038	0.19	0.252	1.26	1.872	9.35	2.983	14.90	14.871	74.30	20.016
Sitio 2	0.034	0.18	0.246	1.30	1.922	10.14	3.023	15.95	13.731	72.44	18.956
Sitio 3	Nd		0.247	1.18	1.987	9.53	2.783	13.35	15.831	75.94	20.848
Sitio 4	0.081	0.41	0.124	0.63	1.534	7.74	1.983	10.01	16.098	81.22	19.820
Sitio 5	0.028	0.13	0.234	1.11	1.083	5.16	2.891	13.77	16.763	79.83	20.999

Tabla 44. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cr total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.034	0.19	0.236	1.29	1.634	8.92	2.673	14.59	13.741	75.01	18.318
Sitio 2	0.024	0.13	0.348	1.84	1.745	9.24	1.986	10.52	14.784	78.28	18.887
Sitio 3	Nd		0.234	1.33	1.143	6.51	2.712	15.44	13.48	76.73	17.569
Sitio 4	0.021	0.12	0.193	1.15	0.972	5.78	2.863	17.03	12.763	75.92	16.812
Sitio 5	Nd		0.175	0.99	0.762	4.31	1.983	11.21	14.768	83.49	17.688

Tabla 45. Concentración de Cr por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cr total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.032	0.18	0.239	1.36	1.753	10.00	2.634	15.02	12.874	73.43	17.532
Sitio 2	0.034	0.19	0.274	1.50	1.634	8.93	2.486	13.58	13.873	75.80	18.301
Sitio 3	0.024	0.15	0.241	1.53	1.533	9.72	1.987	12.59	11.992	76.01	15.777
Sitio 4	0.023	0.14	0.301	1.88	0.973	6.07	1.732	10.80	13.009	81.11	16.038
Sitio 5	Nd		Nd		0.786	5.08	1.911	12.36	12.763	82.55	15.460

Tabla 46. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Mn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	99.764	20.46	235.894	48.39	53.074	10.89	10.132	2.08	88.631	18.18	487.495
Sitio 2	98.483	18.66	276.754	52.44	54.987	10.42	9.987	1.89	87.541	16.59	527.752
Sitio 3	89.548	18.32	253.901	51.93	53.121	10.87	10.001	2.05	82.341	16.84	488.912
Sitio 4	97.092	20.05	241.874	49.94	48.431	10.00	9.092	1.88	87.876	18.14	484.365
Sitio 5	99.624	20.77	238.876	49.81	50.517	10.53	10.873	2.27	79.716	16.62	479.606

Tabla 47. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Mn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	102.384	22.58	199.542	44.01	54.782	12.08	8.746	1.93	87.904	19.39	453.358
Sitio 2	99.641	19.12	267.873	51.40	53.136	10.20	11.726	2.25	88.764	17.03	521.140
Sitio 3	98.748	18.95	276.763	53.11	55.819	10.71	10.764	2.07	79.014	15.16	521.108
Sitio 4	98.541	20.41	235.987	48.88	53.182	11.02	8.922	1.85	86.147	17.84	482.779
Sitio 5	99.450	19.39	276.764	53.97	48.187	9.40	9.287	1.81	79.125	15.43	512.813

Tabla 48. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Mn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	96.918	18.42	289.450	55.01	52.917	10.06	7.0184	1.33	79.872	15.18	526.175
Sitio 2	98.182	20.05	250.187	51.08	53.013	10.82	8.233	1.68	80.153	16.37	489.768
Sitio 3	99.141	22.05	197.137	43.85	54.973	12.23	10.482	2.33	87.817	19.53	449.550
Sitio 4	98.654	18.71	273.844	51.92	55.031	10.43	10.872	2.06	89.001	16.88	527.402
Sitio 5	99.010	18.89	271.741	51.86	53.715	10.25	9.913	1.89	89.651	17.11	524.030

Tabla 49. Concentración de Mn por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Mn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	97.627	20.37	234.827	48.99	49.896	10.41	8.873	1.85	88.153	18.39	479.376
Sitio 2	99.136	20.77	230.931	48.39	52.746	11.05	8.170	1.71	86.265	18.08	477.248
Sitio 3	96.615	21.64	200.983	45.03	53.871	12.07	11.187	2.51	83.713	18.75	446.369
Sitio 4	97.871	19.41	263.131	52.19	48.873	9.69	7.513	1.49	86.786	17.21	504.174
Sitio 5	98.245	20.53	231.873	48.46	49.615	10.37	8.762	1.83	89.991	18.81	478.486

Tabla 50. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Fe total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	1.018	0.01	2.036	0.02	2222.15	21.83	1366.068	13.42	6588.07	64.72	10179.342
Sitio 2	2.586	0.02	2.587	0.02	2856.802	22.09	1708.391	13.21	8362.194	64.66	12932.56
Sitio 3	1.023	0.01	1.731	0.02	2514.352	24.70	1526.934	15.00	6136.241	60.28	10180.281
Sitio 4	1.191	0.01	1.191	0.01	2709.304	22.74	1602.469	13.45	7600.11	63.79	11914.265
Sitio 5	1.079	0.01	1.634	0.02	2792.116	25.87	1400.915	12.98	6597.683	61.13	10793.427

Tabla 51. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Fe total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	1.019	0.01	2.038	0.02	2205.975	21.65	1375.551	13.50	6604.680	64.82	10189.263
Sitio 2	1.131	0.01	2.531	0.02	2582.985	22.84	1543.684	13.65	7180.111	63.48	11310.442
Sitio 3	1.016	0.01	1.731	0.02	2417.954	23.79	1432.071	14.09	6311.683	62.10	10164.455
Sitio 4	2.375	0.02	2.147	0.02	3055.176	25.73	1591.113	13.40	7222.945	60.83	11873.756
Sitio 5	3.301	0.03	1.100	0.01	2968.580	26.98	1542.605	14.02	6487.305	58.96	11002.891

Tabla 52. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Fe total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	2.033	0.02	1.016	0.01	2207.503	21.73	1358.855	13.38	6588.070	64.86	10157.477
Sitio 2	2.209	0.02	1.104	0.01	2316.982	20.98	1519.622	13.76	7203.847	65.23	11043.764
Sitio 3	3.060	0.03	1.020	0.01	2136.090	20.94	1618.899	15.87	6441.933	63.15	10201.002
Sitio 4	1.165	0.01	2.33	0.02	2753.834	23.63	1554.640	13.34	7342.004	63.00	11653.973
Sitio 5	1.097	0.01	1.841	0.02	2724.758	24.83	1511.072	13.77	6735.628	61.38	10974.396

Tabla 53. Concentración de Fe por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Fe total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	1.016	0.01	4.064	0.04	2208.749	21.74	1351.258	13.30	6594.751	64.91	10159.838
Sitio 2	1.098	0.01	2.195	0.02	2415.400	22.00	1479.982	13.48	7080.416	64.49	10979.091
Sitio 3	1.761	0.02	1.891	0.02	2428.674	24.04	1720.479	17.03	5951.463	58.90	10104.268
Sitio 4	1.186	0.01	2.372	0.02	2910.070	24.53	1876.776	15.82	7072.907	59.62	11863.311
Sitio 5	1.063	0.01	1.731	0.02	2729.426	25.67	1593.849	14.99	6307.346	59.32	10633.415

Tabla 54. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (marzo).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)											As total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales			
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%		
Sitio 1	0.011	0.09	0.009	0.08	2.758	23.00	0.736	6.14	8.479	70.70	11.993	
Sitio 2	0.023	0.20		Nd	1.764	15.12	0.793	6.80	9.083	77.88	11.663	
Sitio 3		Nd		Nd	2.163	19.21	0.753	6.69	8.346	74.11	11.262	
Sitio 4	0.028	0.27	0.003	0.03	1.941	18.91	0.654	6.37	7.641	74.42	10.267	
Sitio 5	0.012	0.11	0.001	0.01	1.663	14.97	0.434	3.91	9.001	81.01	11.111	

Tabla 55. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (junio).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)											As total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales			
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%		
Sitio 1	0.009	0.08	0.002	0.02	1.787	15.18	0.713	6.06	9.263	78.67	11.774	
Sitio 2	0.012	0.11	0.001	0.01	2.012	18.57	0.631	5.83	8.176	75.48	10.832	
Sitio 3	0.002	0.02	0.003	0.02	2.631	21.11	0.599	4.81	9.231	74.05	12.466	
Sitio 4		Nd		Nd	1.973	16.96	0.652	5.60	9.009	77.44	11.634	
Sitio 5		Nd		Nd	1.122	10.33	0.753	6.94	8.982	82.73	10.857	

Tabla 56. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (septiembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)											As total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales			
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%		
Sitio 1		Nd		Nd	1.287	11.65	0.675	6.11	9.082	82.23	11.044	
Sitio 2		Nd		Nd	1.276	13.14	0.652	6.72	7.781	80.14	9.709	
Sitio 3		Nd		Nd	2.082	18.16	0.618	5.39	8.762	76.44	11.462	
Sitio 4	0.012	0.10		Nd	2.021	16.69	0.541	4.47	9.532	78.74	12.106	
Sitio 5		Nd		Nd	1.892	18.12	0.871	8.34	7.679	73.54	10.442	

Tabla 57. Concentración de As por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca (diciembre).

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										As total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1		Nd	0.002	0.02	1.872	16.42	0.651	5.71	8.879	77.86	11.404
Sitio 2		Nd	0.001	0.01	1.216	11.12	0.713	6.52	9.001	82.34	10.931
Sitio 3	0.012	0.10		Nd	1.381	11.49	0.862	7.17	9.761	81.23	12.016
Sitio 4	0.008	0.07		Nd	2.001	16.55	0.542	4.48	9.543	78.91	12.094
Sitio 5	0.041	0.41		Nd	1.975	19.94	0.627	6.33	7.264	73.32	9.907

Tabla 58. Concentración de Zn promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Zn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	2.514	2.70	12.777	13.72	19.302	20.73	21.692	23.30	36.828	39.55	93.1118
Sitio 2	2.321	2.61	10.876	12.22	17.463	19.63	23.291	26.18	35.029	39.37	88.9795
Sitio 3	2.408	2.57	12.412	13.24	19.005	20.28	22.514	24.02	37.376	39.88	93.7133
Sitio 4	1.879	2.09	12.173	13.55	18.550	20.65	22.230	24.74	35.015	38.97	89.8468
Sitio 5	2.587	2.94	12.936	14.72	18.103	20.60	20.392	23.20	33.873	38.54	87.8905

Tabla 59. Concentración de Cd promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cd total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.092	1.56	0.253	4.30	0.347	5.91	1.112	18.92	4.076	69.32	5.880
Sitio 2	0.002	0.04	0.214	3.74	0.355	6.21	1.922	33.66	3.217	56.35	5.709
Sitio 3	0.163	2.76	0.259	4.39	0.377	6.41	1.068	18.15	4.017	68.29	5.883
Sitio 4	0.031	0.50	0.212	3.46	0.236	3.86	1.326	21.67	4.312	70.50	6.116
Sitio 5	0.098	1.55	0.348	5.54	0.495	7.89	1.711	27.27	3.624	57.75	6.276

Tabla 60. Concentración de Cu promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cu total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.022	0.06	0.077	0.20	0.358	0.95	9.299	24.61	28.036	74.19	37.791
Sitio 2	0.030	0.08	0.160	0.45	0.289	0.81	9.045	25.33	26.181	73.33	35.704
Sitio 3	0.013	0.04	0.148	0.41	0.368	1.01	8.989	24.66	26.937	73.89	36.454
Sitio 4	0.006	0.02	0.142	0.38	0.257	0.68	8.107	21.59	29.042	77.34	37.553
Sitio 5	0.022	0.06	0.188	0.52	0.328	0.91	8.744	24.33	26.659	74.17	35.941

Tabla 61. Concentración de Ni promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Ni total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.401	1.80	0.258	1.15	3.778	16.94	3.708	16.63	14.156	63.48	22.299
Sitio 2	0.166	0.72	0.206	0.89	3.898	16.81	4.225	18.23	14.685	63.35	23.179
Sitio 3	0.269	1.16	0.294	1.26	4.870	20.91	4.195	18.01	13.657	58.65	23.285
Sitio 4	0.303	1.40	0.314	1.45	4.278	19.78	3.786	17.50	12.945	59.86	21.626
Sitio 5	0.228	0.98	0.230	0.99	4.921	21.17	4.431	19.06	13.434	57.80	23.243

Tabla 62. Concentración de Co promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Co total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.134	5.48	1.606	65.80	0.701	28.72		Nd		Nd	2.441
Sitio 2	0.009	4.08	0.212	95.92				Nd		Nd	0.221
Sitio 3	0.024	2.30	0.178	16.90			0.448	42.50	0.403	38.30	1.053
Sitio 4	0.041	3.43	0.909	75.54	0.253	21.04		Nd		Nd	1.203
Sitio 5	0.017	7.83	0.176	83.39	0.013	6.05	0.006	2.73		Nd	0.211

Tabla 63. Concentración de Pb promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Pb total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.737	0.95	9.575	12.40	43.419	56.24	5.117	6.63	18.354	23.77	77.201
Sitio 2	0.756	0.98	9.247	11.98	42.153	54.61	5.621	7.28	19.420	25.16	77.195
Sitio 3	0.632	0.84	8.868	11.80	41.465	55.18	5.297	7.05	18.879	25.13	75.141
Sitio 4	0.541	0.69	9.198	11.82	43.858	56.36	4.756	6.11	19.460	25.01	77.812
Sitio 5	0.796	1.02	9.430	12.08	43.394	55.58	4.980	6.38	19.479	24.95	78.079

Tabla 64. Concentración de Cr promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Cr total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.035	0.19	0.243	1.30	1.756	9.44	2.813	15.12	13.757	73.95	18.604
Sitio 2	0.031	0.16	0.283	1.49	1.756	9.26	2.582	13.62	14.306	75.46	18.958
Sitio 3	0.012	0.07	0.229	1.27	1.572	8.75	2.356	13.12	13.794	76.80	17.962
Sitio 4	0.037	0.20	0.215	1.17	1.203	6.53	2.497	13.56	14.463	78.54	18.414
Sitio 5	0.007	0.04	0.143	0.81	0.890	5.07	2.255	12.86	14.234	81.21	17.528

Tabla 65. Concentración de Mn promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Mn total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	99.173	20.38	239.928	49.31	52.667	10.82	8.692	1.79	86.140	17.70	486.601
Sitio 2	98.861	19.62	256.436	50.88	53.471	10.61	9.529	1.89	85.681	17.00	503.977
Sitio 3	96.013	20.15	232.196	48.73	54.446	11.43	10.609	2.23	83.221	17.47	476.485
Sitio 4	98.040	19.62	253.709	50.77	51.379	10.28	9.100	1.82	87.453	17.50	499.680
Sitio 5	99.082	19.87	254.814	51.09	50.509	10.13	9.709	1.95	84.621	16.97	498.734

Tabla 66. Concentración de Fe promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										Fe total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	1.272	0.01	2.289	0.02	2211.094	21.74	1362.933	13.40	6593.893	64.83	10171.480
Sitio 2	1.756	0.02	2.104	0.02	2543.042	21.99	1562.920	13.51	7456.642	64.47	11566.464
Sitio 3	1.715	0.02	1.593	0.02	2374.268	23.36	1574.596	15.49	6210.330	61.11	10162.502
Sitio 4	1.479	0.01	2.010	0.02	2857.096	24.16	1656.250	14.00	7309.492	61.81	11826.326
Sitio 5	1.635	0.02	1.577	0.01	2803.720	25.84	1512.110	13.94	6531.991	60.20	10851.032

Tabla 67. Concentración de As promedio anual por sitio de muestreo en mg/Kg de muestra seca.

Sitio	Fracciones (mg/Kg; resultados con un IC del 95%)										As total (mg/Kg)
	Intercambiables		Asociados a carbonatos		Asociados a oxihidróxidos de Fe amorfos y óxidos de Fe cristalinos		Asociados a la materia orgánica		Asociados a silicatos y residuales		
	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	mg/Kg	%	
Sitio 1	0.005	0.04	0.003	0.03	1.926	16.67	0.694	6.00	8.926	77.25	11.554
Sitio 2	0.009	0.08	0.001	0.00	1.567	14.53	0.697	6.47	8.510	78.92	10.784
Sitio 3	0.004	0.03	0.001	0.01	2.064	17.49	0.708	6.00	9.025	76.47	11.802
Sitio 4	0.012	0.10	0.001	0.01	1.984	17.21	0.597	5.18	8.931	77.49	11.525
Sitio 5	0.013	0.13		Nd	1.663	15.72	0.671	6.34	8.232	77.81	10.579

El orden de aparición de los metales en las diversas fracciones fue:

Zn	fase residual>materia orgánica>óxidos de Fe-Mn>carbonatos>intercambiables
Cd	fase residual>materia orgánica>óxidos de Fe-Mn>carbonatos>intercambiables
Cu	fase residual>materia orgánica>óxidos de Fe-Mn>carbonatos>intercambiables
Ni	fase residual>óxidos de Fe-Mn>materia orgánica>intercambiables>carbonatos
Co	carbonatos>óxidos de Fe-Mn>materia orgánica>fase residual>intercambiables
Pb	óxidos de Fe-Mn>fase residual>carbonatos>materia orgánica>intercambiables
Cr	fase residual>materia orgánica>óxidos de Fe-Mn>carbonatos>intercambiables
Mn	carbonatos>intercambiables>fase residual>óxidos de Fe-Mn>materia orgánica
Fe	fase residual>óxidos de Fe-Mn>materia orgánica>carbonatos>intercambiables
As	fase residual>óxidos de Fe-Mn>materia orgánica>intercambiables>carbonatos

La secuencia que siguieron los metales pesados en las fracciones estudiadas fue:

Intercambiables	Mn>Co>Zn>Cd>Ni>Pb>Cr>As>Cu>Fe
Carbonatos	Co>Mn>Zn>Pb>Cd>Cr>Ni>Cu>Fe≈As
Óxidos de Fe-Mn	Pb>Fe>Zn>Ni>Co>As>Mn>Cr>Cd>Cu
Materia orgánica	Zn>Cu>Cd>Ni>Fe>Cr>Co>Pb>As>Mn
Fase residual	As>Cr>Cu>Cd>Fe>Ni>Zn>Pb>Mn>Co

De acuerdo a las secuencias expuestas, se puede observar que el origen de la mayoría de los metales es litogénico. Puede considerarse que el Mn, Co, Zn y Cd son los metales más móviles y biodisponibles en los sedimentos de la laguna de Tecocomulco. El Cd y el Co se encuentran en muy bajas concentraciones. Destaca el Pb como el elemento de mayor afinidad a ser adsorbido por los óxidos de Fe-Mn.

La fracción de metal más móvil es la adsorbida como ion intercambiable (fracción 1), lo que representa un riesgo de contaminación debido a la liberación de metales al agua bajo condiciones naturales. Aunque se haya presentado una concentración baja de metales en esta fracción, se debe prestar atención especial a la misma, ya que estos contaminantes están débilmente unidos a complejos orgánicos e inorgánicos del sedimento, por lo que están fácilmente disponibles para los organismos acuáticos.

La concentración de metales ligados a carbonatos (fracción 2) fue baja en todos los sitios de muestreo, a excepción del Mn. El mayor porcentaje de Co se haya unido a esta fracción. Otros metales encontrados en bajas concentraciones, en orden decreciente, fueron: Zn>Pb>Cd. En la fracción de carbonatos los metales son susceptibles a cambios de pH.

La disminución de pH conduce a la disolución de carbonatos e hidróxidos, liberando los metales por un incremento en la desorción de iones metálicos, debido a la competencia con los iones hidrógeno. Esto es de especial importancia en la laguna de Tecocomulco, ya que esta fracción puede ser considerada como una fuente significativa de metales que pueden ser incorporados a la cadena trófica.

Los oxihidróxidos de Fe (fracción 3) se caracterizan por tener una gran área superficial específica, estas fases sólidas juegan un papel importante en el transporte de metales, regulando su concentración a través de procesos de adsorción y desorción (Davidson *et al.*, 1994). La afinidad de los precipitados de hidróxidos de Fe con respecto a los metales es: Pb>Zn>Cd>Co>Sr>Mg. La estabilidad de estos complejos está controlada por el pH.

Así, para la laguna de Tecocomulco, se observó, que un elevado porcentaje de Pb se haya unido a esta fracción de los sedimentos para todos los sitios y periodos de muestreo, por lo que una disminución en el pH, causada por la actividad microbiana, descomposición de la materia orgánica, alteraciones en el sistema amortiguador de carbonatos, etc., puede ocasionar la disolución de esta fase mineral y la liberación de este metal a la columna de agua. Se encontró también la presencia de Zn, Ni, Co y As. En esta fracción se detectaron valores altos de metales pesados. Esto se debe a que durante la precipitación del Fe como hidróxido, se lleva a cabo la adsorción y co-precipitación de otros metales. Se ha reportado que los metales como Cu, Pb, Mn y Zn pueden formar complejos estables con los óxidos de Fe y Mn (Sutherland y Tack, 2002).

En la fracción de óxidos de Fe, los metales están adsorbidos o co-precipitados y son inestables en condiciones reductoras. Tessier y Campbell (1991) señalan que los metales asociados a esta fracción pueden ser movilizados bajo condiciones anóxicas (reductoras) en sedimentos acuáticos, y ser captados por organismos bentónicos. Por tanto, la fracción de óxidos de Fe puede ser considerada como una fuente potencial de metales pesados presentes en el sedimento de la laguna de Tecocomulco.

En la fracción 4 (materia orgánica) se presentaron los valores más elevados de Zn, Cu, Cd y Ni. Las altas concentraciones de materia orgánica en los sedimentos de la laguna favorecen la adsorción y acumulación de metales pesados. Las condiciones en el sedimento pueden afectar la degradación y solubilidad de la materia orgánica e influenciar la liberación de metales. Morillo (2002), reportó que bajo condiciones oxidantes la materia orgánica puede degradarse, ocasionando la liberación de metales solubles.

En la fracción residual (fracción 5) se detectaron las concentraciones más elevada de al menos 7 de los 10 metales estudiados. Destacando por su abundancia el Fe y el Mn. La fracción residual contiene los metales que son inertes y se encuentran dentro de la estructura cristalina de algunos minerales primarios. Los metales ligados en esta fracción son estables, no se solubilizan bajo condiciones normales y por lo tanto, no tienen impacto en la calidad del agua de la laguna, ni son biológicamente disponibles, tal es el caso de la mayor parte del As, Cr, Ni, Cu, Cd y Zn.

Del total de metales encontrados en la laguna, el 60.22% son de origen litogénico; mientras que el 39.78% restantes deben su presencia a factores antropogénicos. En la fracción no residual se encuentran los metales unidos a materiales que son componentes del sedimento como las arcillas, óxidos e hidróxidos de Fe y Mn y la materia orgánica. En esta fracción, los metales se encuentran libres o ligados por interacciones iónicas, puentes de hidrógeno, entre otros. En esta fracción se suman la

concentración de metales de las cuatro primeras fracciones, y son potencialmente biodisponibles. Los metales en la fracción no residual indican aportes antropogénicos debido a las actividades que se desarrollan en las áreas aledañas a la laguna.

5.6 Colecta e identificación de macrófitas acuáticas

Las especies estudiadas fueron colectadas en la laguna de Tecocomulco, ubicada en el municipio de Tepeapulco, Hidalgo. Un espécimen de cada hidrófita (fotografías 7-12) se preparó y envió al herbario del Centro de Investigaciones Biológicas de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, para su identificación taxonómica por parte del M. en C. Manuel González Ledesma. La tabla 68, resume las familias, géneros y especies de las macrófitas acuáticas consideradas para el estudio de acumulación de metales pesados.

Tabla 68. Identificación taxonómica de macrófitas acuáticas.

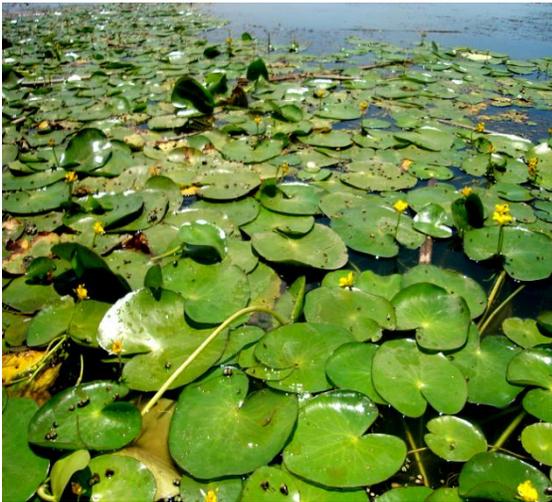
Nombre común	Familia	Genero	Especie	Nombre científico
Tule	Cyperaceae	Schoenoplectus	californicus	<i>Schoenoplectus californicus</i>
Trébol	Marsileacea	Marsilea	mollis	<i>Marsilea mollis</i> B. L.
Redondita de agua	Araliaceae	Hydrocotyle	ranunculoides	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f.
Lentejilla	Ricciaceae	Ricciocarpus	natans	<i>Ricciocarpus natans</i>
Lirio, ninfa	Menyanthaceae	Nymphoides	fallax	<i>Nymphoides fallax</i>
Helecho de agua, doradilla	Azollaceae	Azolla	mexicana	<i>Azolla mexicana</i>

Fotografía 7. *Schoenoplectus californicus*



Fotografía 8. *Marsilea mollis* B. L.



Fotografía 9. *Hydrocotyle ranunculoides* L. f.Fotografía 10. *Ricciocarpus natans*Fotografía 11. *Nymphoides fallax*Fotografía 12. *Azolla mexicana*

5.7 Determinación de metales pesados en macrófitas acuáticas

La disponibilidad de los metales en los organismos acuáticos, se halla en función de las propiedades fisicoquímicas del agua y de los sedimentos, tales como: temperatura, pH, potencial redox y dureza. El valor del pH del agua de la laguna es ligeramente ácido con variaciones espaciales y temporales que promueven la movilidad y biodisponibilidad de los metales. En este sentido, es importante el análisis de aquellos organismos que pueden ser considerados como indicadores de la contaminación, tal es el caso de los peces y las plantas.

En la laguna de Tecocomulco, se tiene evidencia del ingreso de metales pesados en la biota acuática. En los peces, los metales pesados pueden ingresar por tres vías posibles: branquias, alimento o superficie corporal. Se ha detectado la presencia de As en la carpa común (*Cyprinus carpio*) en concentraciones importantes de 1.6 mg/100 g base seca, la cual es comercializada en esta zona (Bustos *et al.*, 2006).

Por su parte, las macrófitas acuáticas juegan un papel fundamental en el transporte y eliminación de contaminantes dentro de este ecosistema. Su eficiencia de remoción dependerá principalmente de la especie de planta utilizada, su estado de crecimiento, su estacionalidad y el tipo de metal a remover. Por lo que, se planteó la realización de un estudio químico dirigido, con la finalidad de seleccionar una especie de macrófita acuática que permitió estudiar los compuestos orgánicos responsables del proceso de quelación. Para ello, se llevó a cabo la colecta de 6 especies de hidrófitas tomando en cuenta los siguientes criterios: antecedentes bibliográficos de su participación en procesos de remediación de la contaminación, ser acumuladoras de metales, tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad, ser especies locales, representativas de la comunidad natural y ser fácilmente cosechables. La primera fase del estudio dirigido consistió en la detección de metales pesados en las plantas seleccionadas, para asegurar que son capaces de acumular concentraciones elevadas de dichos contaminantes. Se encontró la presencia de Zn, Mn, Fe, Cu, Pb, Ni, As, Cd y Cr (Tabla 69). Destacó la elevada concentración de Zn, Mn, Fe, Pb, Ni, As y Cr en la raíz del *Hydrocotyle ranunculoides L. f.*; esta planta también fue capaz de acumular metales como el Cd, aunque en más baja concentración.

El As se encontró en todas las plantas, destacando su presencia en *Hydrocotyle ranunculoides L. f.*, *Ricciocarpus natans* y *Azolla mexicana*. La concentración de este último elemento en agua, sedimentos, peces y plantas, pone de manifiesto su capacidad de paso a través de la cadena trófica.

5.8 Compuestos con actividad quelante del *Hydrocotyle ranunculoides L. f.*

Los metales pesados tienen la capacidad para unirse con moléculas orgánicas. Este fenómeno depende de reacciones con ligandos presentes en gran abundancia en la célula. Para comprender el proceso de su acumulación, es necesaria la identificación de aquellos compuestos orgánicos responsables del proceso de quelación.

En este sentido, para la selección de la hidrófita a estudiar durante la última parte de esta investigación, se tomó en cuenta el contenido de metales pesados encontrados en la especie de estudio, agua y sedimento; así como los reportes previos sobre la acumulación de metales en *Cyprinus carpio*. Se decidió trabajar con la macrófita *Hydrocotyle ranunculoides L. f.* debido a su capacidad para acumular Mn, Pb y As; que como ya se discutió anteriormente, son susceptibles a movilizarse desde los sedimentos, dadas las variaciones en los parámetros fisicoquímicos del cuerpo de agua.

El *Hydrocotyle ranunculoides L. f.* es una macrófita acuática de hojas flotantes. Algunas investigaciones relacionadas con ella, se basan en el estudio de su composición (glicósidos y triterpenos; Della *et al.*, 1993; Della *et al.*, 1994), propagación en forma de alfombras extensas, crecimiento, fotosíntesis (Hussner, 2007) y eliminación, a través de métodos físicos, químicos y biológicos, ya que se le considera como una maleza que altera la ecología, calidad y usos recreativos de los cuerpos de agua (Gassmann *et al.*, 2006).

Tabla 69. Concentración de metales pesados en macrófitas acuáticas.

Macrófita	Zn (mg/Kg)	Mn (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/L)	Ni (mg/Kg)	As (mg/Kg)	Cd (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Co (mg/L)
<i>Schoenoplectus californicus</i> (aérea)	0.027 ± 0.001	0.094 ± 0.001	0.668 ± 0.001	0.005 ± 0.0001	0.004 ± 0.002	0.053 ± 0.001	0.005 ± 0.0001	0.001 ± 0.0001	7.937 ± 0.127	Nd
<i>Schoenoplectus californicus</i> (raíz)	0.098 ± 0.002	13.622 ± 0.131	40.711 ± 0.172	0.035 ± 0.001	0.148 ± 0.001	0.091 ± 0.001	0.015 ± 0.0001	0.002 ± 0.0001	9.500 ± 0.100	Nd
<i>Marsilea mollis</i> B. L.	0.076 ± 0.001	0.340 ± 0.017	4.725 ± 0.093	0.040 ± 0.001	0.013 ± 0.001	0.066 ± 0.001	0.010 ± 0.0001	0.001 ± 0.0001	6.937 ± 0.182	Nd
<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f. (aérea)	0.039 ± 0.001	0.243 ± 0.011	0.218 ± 0.002	0.010 ± 0.001	0.020 ± 0.001	0.051 ± 0.001	0.004 ± 0.0001	0.002 ± 0.0001	9.812 ± 0.176	Nd
<i>Hydrocotyle ranunculoides</i> L. f. (raíz)	0.324 ± 0.022	127.893 ± 0.137	45.124 ± 0.123	0.060 ± 0.001	0.150 ± 0.001	0.083 ± 0.001	0.027 ± 0.0001	0.002 ± 0.0001	7.125 ± 0.0972	Nd
<i>Ricciocarpus natans</i>	0.104 ± 0.002	122.138 ± 0.283	42.305 ± 0.170	0.110 ± 0.001	0.024 ± 0.001	0.108 ± 0.002	0.025 ± 0.0001	0.003 ± 0.0002	5.437 ± 0.0988	Nd
<i>Nymphoides fallax</i> (aérea)	0.087 ± 0.001	0.187 ± 0.003	5.017 ± 0.123	0.025 ± 0.002	0.026 ± 0.001	0.062 ± 0.001	0.004 ± 0.0001	0.002 ± 0.0001	7.812 ± 0.093	Nd
<i>Nymphoides fallax</i> (raíz)	0.071 ± 0.001	0.247 ± 0.001	4.541 ± 0.093	0.027 ± 0.001	0.007 ± 0.001	0.034 ± 0.001	0.001 ± 0.0001	0.001 ± 0.0001	5.278 ± 0.092	Nd
<i>Azolla mexicana</i>	0.055 ± 0.001	34.675 ± 0.193	33.826 ± 0.102	0.055 ± 0.001	0.050 ± 0.001	0.069 ± 0.001	0.025 ± 0.0001	0.006 ± 0.0001	8.125 ± 0.078	Nd

Esta hidrófita se puede emplear como emético y hepático (Del Vitto *et al.*, 1997), como condimento para alimentos (Wolverton *et al.*, 1981) y como indicador de eutrofización por nitrógeno y fósforo en lagunas (Poi de Neiff, 2003; Hauenstein, 2008).

Para la identificación de los compuestos responsables del fenómeno de quelación de metales pesados en el *Hydrocotyle ranunculoides L. f.*, se recurrió a la espectrofotometría Uv-Vis.

La primera parte de la experimentación consistió en la elaboración de la respectiva curva de calibración, absorbancia en función de la concentración, donde se evaluó la capacidad de coordinación de Pb^{2+} al EDTA, el cual sirvió como punto de referencia para la determinación de la actividad quelante de los compuestos de la especie de estudio.

La realización de la curva de calibración se fundamenta en la Ley de Lambert-Beer la cual enuncia que la concentración de la especie absorbente está en relación directa y lineal con la absorbancia, esto quiere decir que sí se cumple con ella, la relación debe ser una recta, que pase por el origen de los ejes cartesianos.

Se realizó la curva de calibración para un rango de concentración de 0.0 a 50 ppm de Pb^{2+} . La curva de calibración presentó un coeficiente de correlación elevado, aproximadamente de 0.9991, lo cual indica que es posible cuantificar la presencia de grupos cromóforos en las muestras de estudio (figura 18).

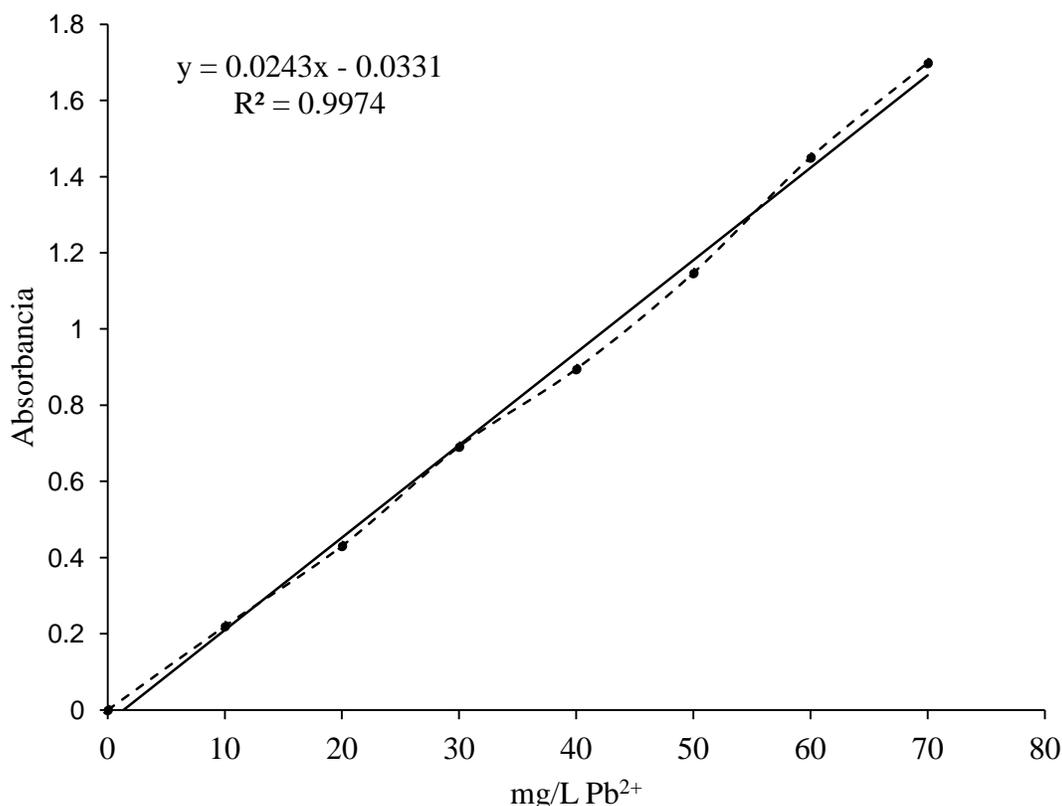


Figura 18. Curva de calibración EDTA a $\lambda=214$ nm.

Al evaluar los extractos crudos del *Hydrocotyle ranunculoides* L. f., se observó que solamente el extracto etanólico presentó una disminución significativa en la absorbancia, lo que indica que está compitiendo con el EDTA por el Pb^{2+} (tabla 70). El extracto etanólico disminuyó la actividad del EDTA en un 38.3%.

A partir del extracto etanólico crudo se realizó un primer fraccionamiento disolviéndolo en una mezcla $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ 1:1, de la que se obtuvieron dos fracciones: soluble e insoluble.

Únicamente la fracción insoluble presentó actividad quelante, registrando una absorbancia de 0.379 (a una $\lambda = 214$ nm y a 30 ppm de Pb^{2+}), lo cual indica que disminuyó la actividad del EDTA en un 43.53%.

Mediante cromatografía en columna se fraccionó la parte insoluble de la mezcla $\text{CH}_3\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$, del extracto etanólico crudo, obteniéndose un total de 35 fracciones, de las cuales a aquellas mayoritarias (9, 15, 17 y 23) se les midió la actividad quelante. Las fracciones 17 y 23 dieron resultados positivos para esta prueba (figura 19).

Tabla 70. Absorbancia de extractos crudos a $\lambda = 214$ nm y a 30 ppm de Pb^{2+}

Extracto	Absorbancia
EDTA	0.691
Hexánico	1.032
Acetato	0.923
Etanólico	0.415
Acuoso	0.642

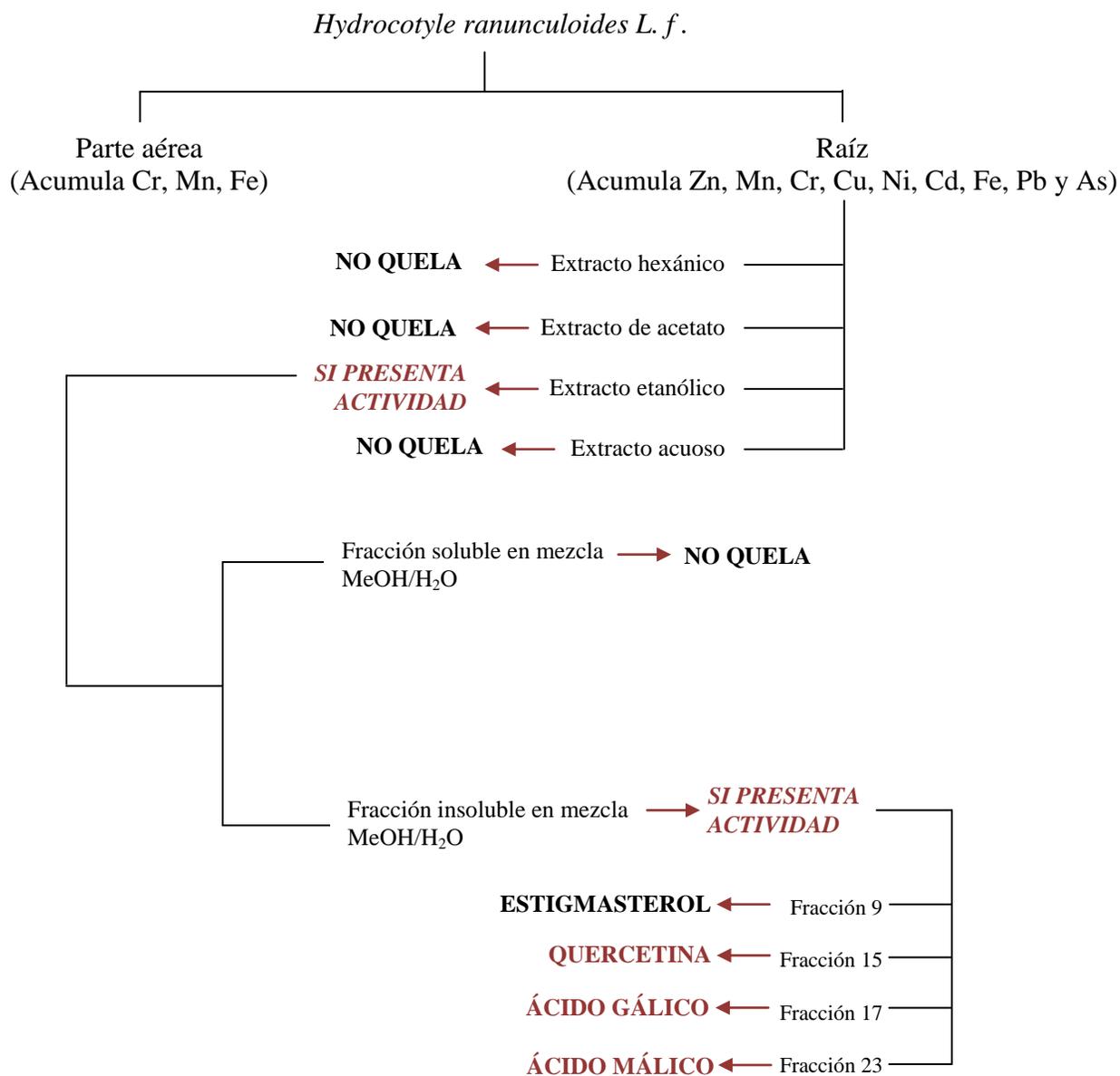


Figura 19. Esquema de fraccionamiento del *Hydrocotyle ranunculoides* L. f.

5.9 Identificación de metabolitos del *Hydrocotyle ranunculoides* L. f.

5.9.1 Estigmasterol

Tras el fraccionamiento por cromatografía en columna, de la fracción 9 se purificó el estigmasterol (figura 20), identificado a través de RMN ¹H.

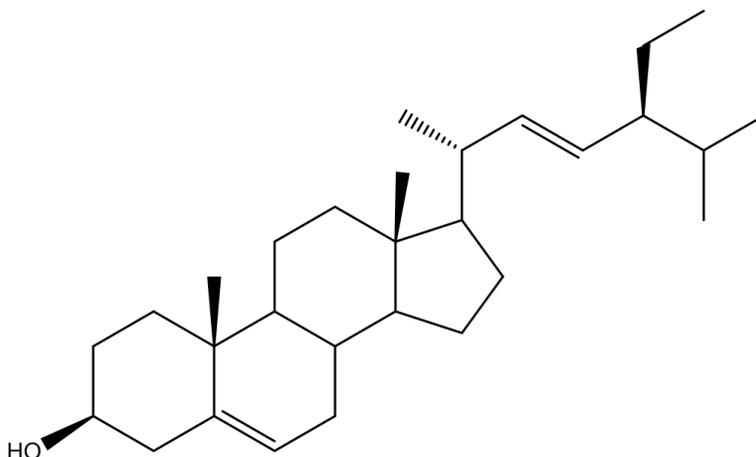


Figura 20. Estructura del estigmasterol.

En el espectro de RMN ^1H (figura 21) se aprecia la señal del protón base del hidroxilo a 3.52 ppm; mientras que a 5.24 ppm se observa la señal doble propia del protón vinílico de H-6; las señales correspondientes a los metilos se observaron entre 0.64 y 0.96 ppm. Las señales de los protones vinílicos H-22 y H-23 aparecen en 5.03 y 4.93 ppm.

El espectro de RMN fue consistente con la literatura, deducido por la medición de las integrales de algunas señales. Los datos de RMN ^1H para el estigmasterol se presentan en la tabla 71.

Tabla 71. Datos de RMN de ^1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para el estigmasterol.

Posición	δ en ppm	#H	Mult
6	5.24	1H	<i>b</i>
22	5.03	1H	<i>dd</i>
23	4.93	1H	<i>dd</i>
3	3.52	1H	<i>m</i>
18	0.64	3H	<i>s</i>
19	0.96	3H	<i>s</i>
26	0.69	3H	<i>d</i>
27	0.71	3H	<i>d</i>
29	0.82	3H	<i>t</i>
21	0.89	3H	<i>d</i>
4	2.17	2H	<i>m</i>
M1 (7, 2, 20)	1.86-1.93	3H	<i>m</i>
M2 (1, 2)	1.72-1.75	2H	<i>m</i>
M3 (16)	1.45-1.69	1H	<i>m</i>
M4 (7, 8, 11, 15, 24, 25, 28)	1.40-1.44	7H	<i>m</i>
M5 (1, 12, 15, 16, 17, 28)	0.91-1.14	6H	<i>m</i>
M6 (9, 11, 12, 14)	0.91-0.73	4H	<i>m</i>

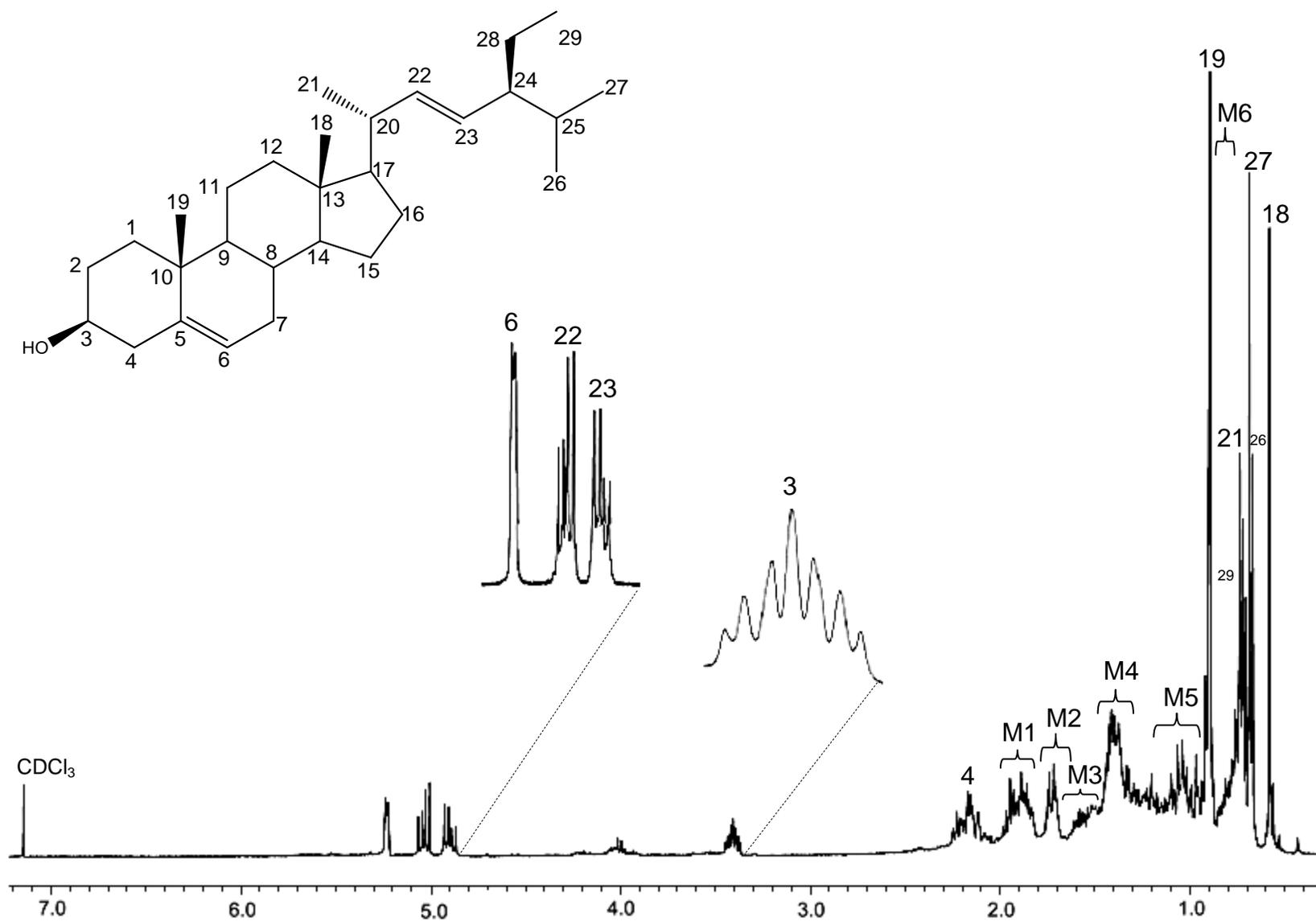


Figura 21. Espectro de RMN de ¹H (400 MHz) de estigmasterol en CDCl₃.

5.9.2 Quercetina

La fracción insoluble de la mezcla CH₃OH/H₂O se sometió a un fraccionamiento por cromatografía en columna usando como eluyentes mezclas de hexano/AcOEt y CHCl₃/CH₃OH en orden creciente de polaridad. A partir de la fracción 15, se purificó la quercetina (figura 22).

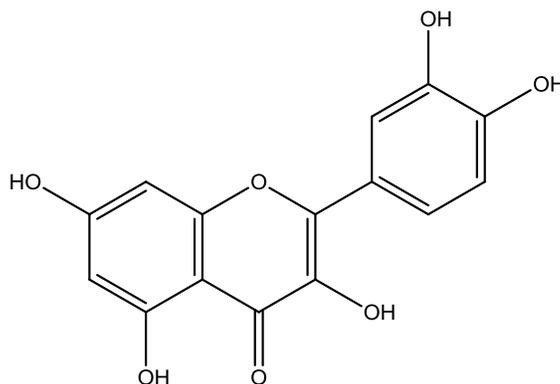


Figura 22. Estructura de la quercetina.

La quercetina se aisló como un sólido amarillo amorfo. El espectro de RMN de ¹H (figura 23 y tabla 72) muestra en 7.68 ppm la señal doble ($J= 2.2$ Hz) correspondiente al protón 2'; en 7.54 ppm la señal doble de dobles ($J= 8.0$ y 2.2 Hz) correspondiente a H-6'; en 6.86 ppm se observó la señal doble ($J= 2.2$ Hz) de H-5'; así como las señales dobles de 6 y 8 en 6.17 ($J= 2.2$ Hz) y 6.32 ($J=2.2$ Hz) ppm respectivamente.

Tabla 72. Datos de RMN de ¹H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para la quercetina.

Posición	δ en ppm	#H	Mult
6	6.17	1H	<i>d</i>
8	6.32	1H	<i>d</i>
2'	7.68	1H	<i>d</i>
5'	6.86	1H	<i>d</i>
6'	7.54	1H	<i>dd</i>

A pesar de que la quercetina no presentó actividad con el Pb²⁺, se ha reportado que tiene capacidad para quelar iones metálicos tales como: Mn, Fe, Cu, Pd, Pt, Al, Mo, Zn, Ni, Co y As (Dusan y Vesna, 2007; Tan *et al.*, 2007; Swapnila y Flora, 2012; Ghosh *et al.*, 2011); formando complejos octaédricos, en los que los ligandos son dos moléculas de dicho compuesto (figura 24).

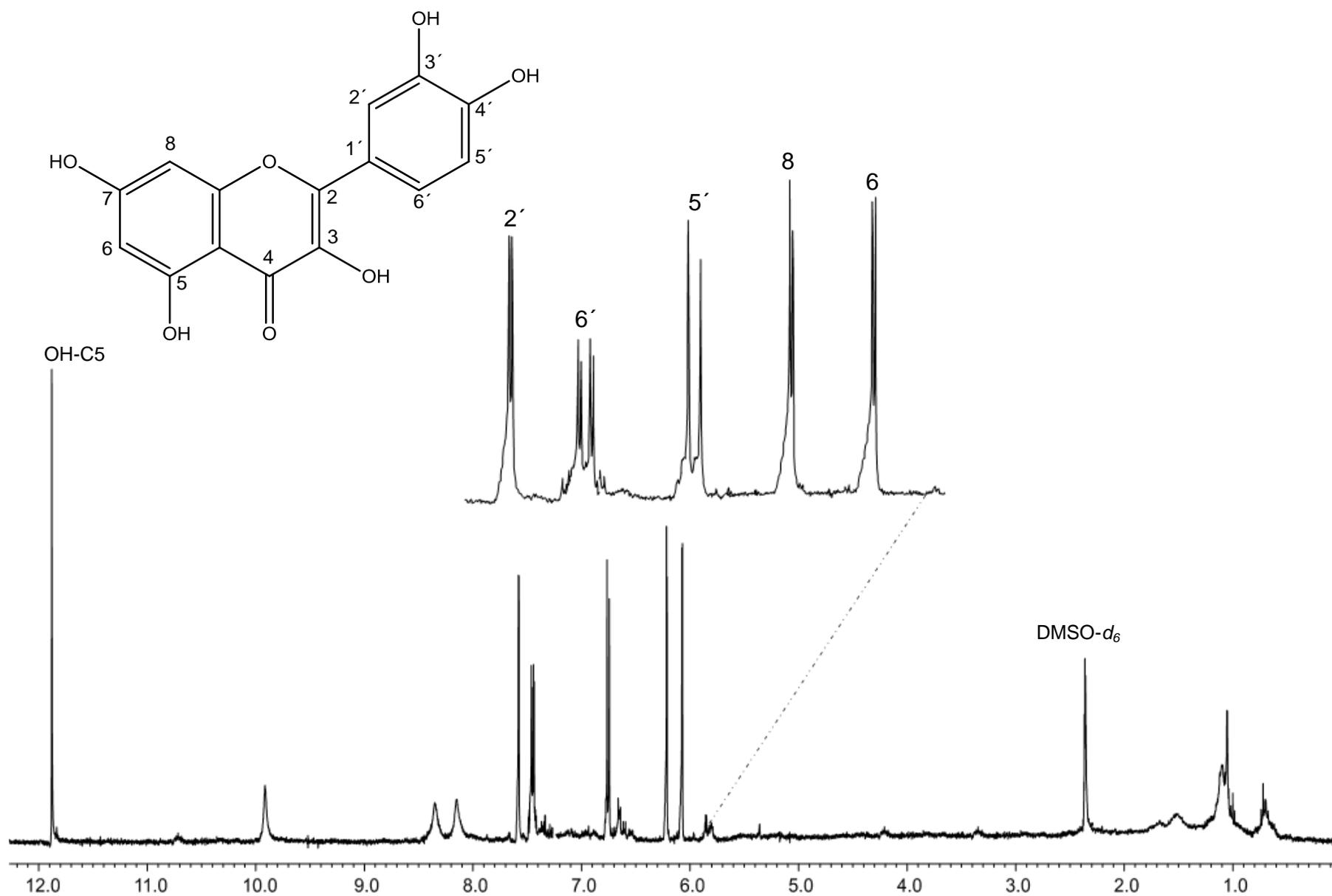


Figura 23. Espectro de RMN de ^1H (400 MHz) de quercetina en $\text{DMSO-}d_6$.

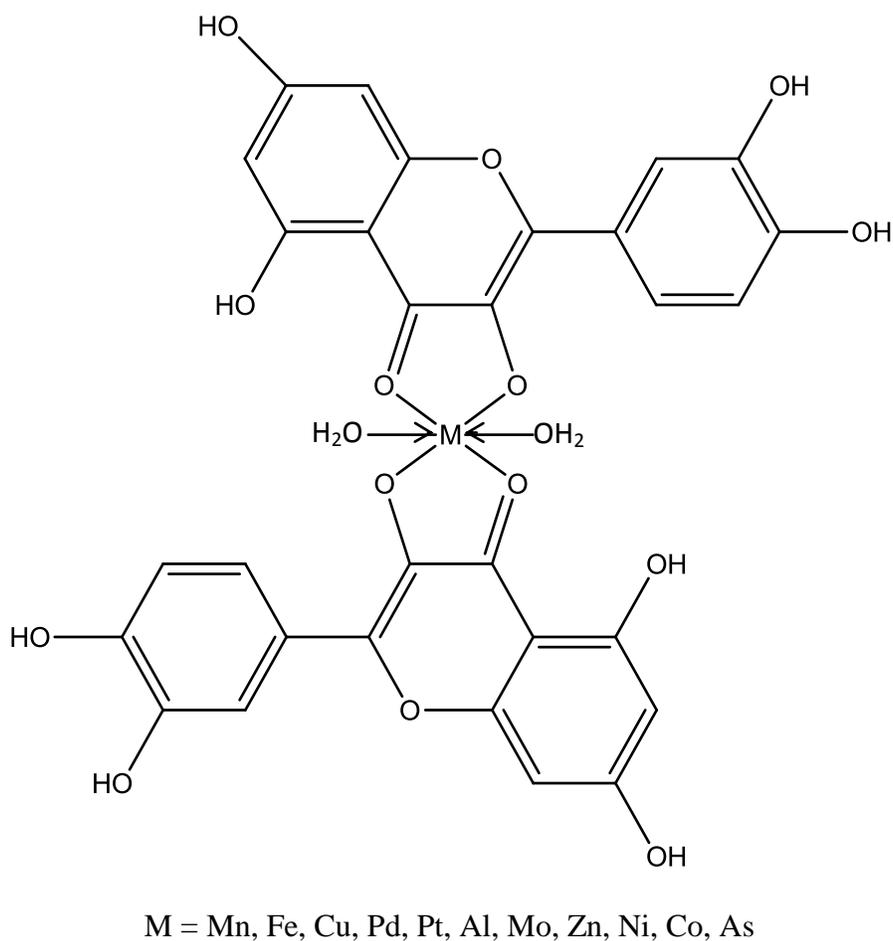


Figura 24. Modelo estructural de quelatos quercetina-metal (Dusan y Vesna, 2007).

5.9.3 Ácido gálico

A partir de la fracción 17, se purificó e identificó el ácido gálico o ácido 3,4,5-trihidroxibenzoico (figura 25).

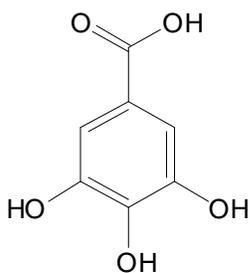


Figura 25. Estructura del ácido gálico.

El espectro de RMN ^1H (figura 26) muestra una señal simple en 7.01 ppm correspondiente a los protones H-2 y H-6 del anillo aromático, característica del grupo galoílo. Los datos de RMH de ^1H (tabla 73) y ^{13}C (figura 27 y tabla 74) confirman la estructura de este compuesto.

Tabla 73. Datos de RMN de ^1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para el ácido gálico.

Posición	δ en ppm	#H	Mult
2	7.01	1H	<i>s</i>
6	7.01	1H	<i>s</i>
COOH	9.91	1H	<i>b</i>
OH-C3, C5	8.72	2H	<i>b</i>
OH-C4	8.45	1H	<i>b</i>

Tabla 74. Datos de RMN de ^{13}C (100 MHz), desplazamiento químico (δ) y posición para el ácido gálico.

Posición	δ en ppm
1	131.1
2	112.3
3	146.8
4	138.5
5	146.8
6	112.3
COO	177.1

El ácido gálico es un ácido fenólico natural exudado por las raíces de las plantas. Es un agente quelante o ligando polidentado ya que posee dos átomos donadores que se coordinan simultáneamente a iones metálicos, por lo que, ocupa dos sitios de coordinación, es decir, tiene la habilidad para formar una estructura de anillo.

Se ha demostrado, que el ácido gálico participa en los mecanismos de complejación en el interior de las células de plantas terrestres y así detoxicar los metales, uniéndose a ellos para formar complejos. De esta manera, el metal queda inmerso en una interacción química que le mantiene en equilibrio electrónico (acomplejado), pero no lo deja fuera del metabolismo, no se ha eliminado del citoplasma de la célula y, por ello, sigue siendo potencialmente tóxico (Clístenes, 2006).

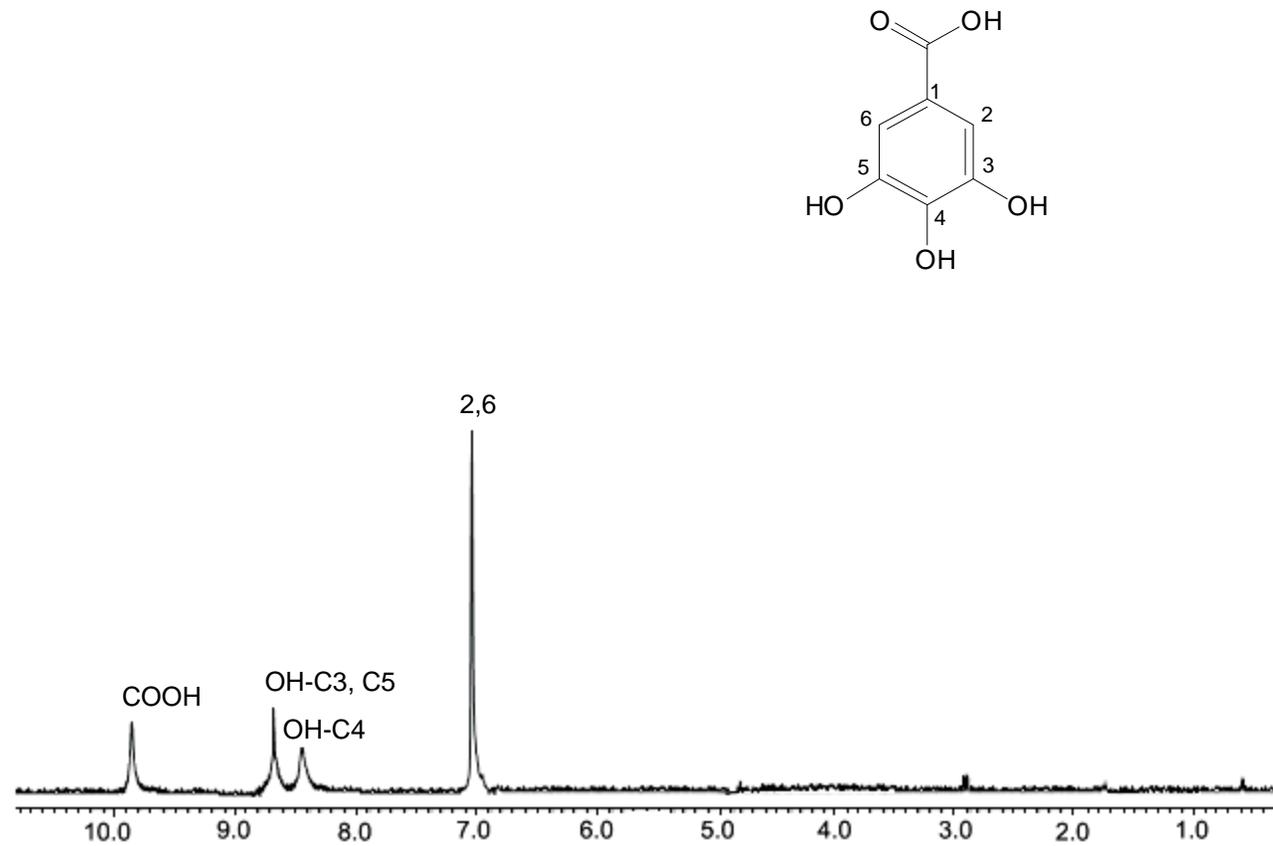


Figura 26. Espectro de RMN de ¹H (400 MHz) de ácido gálico en DMSO-d₆.

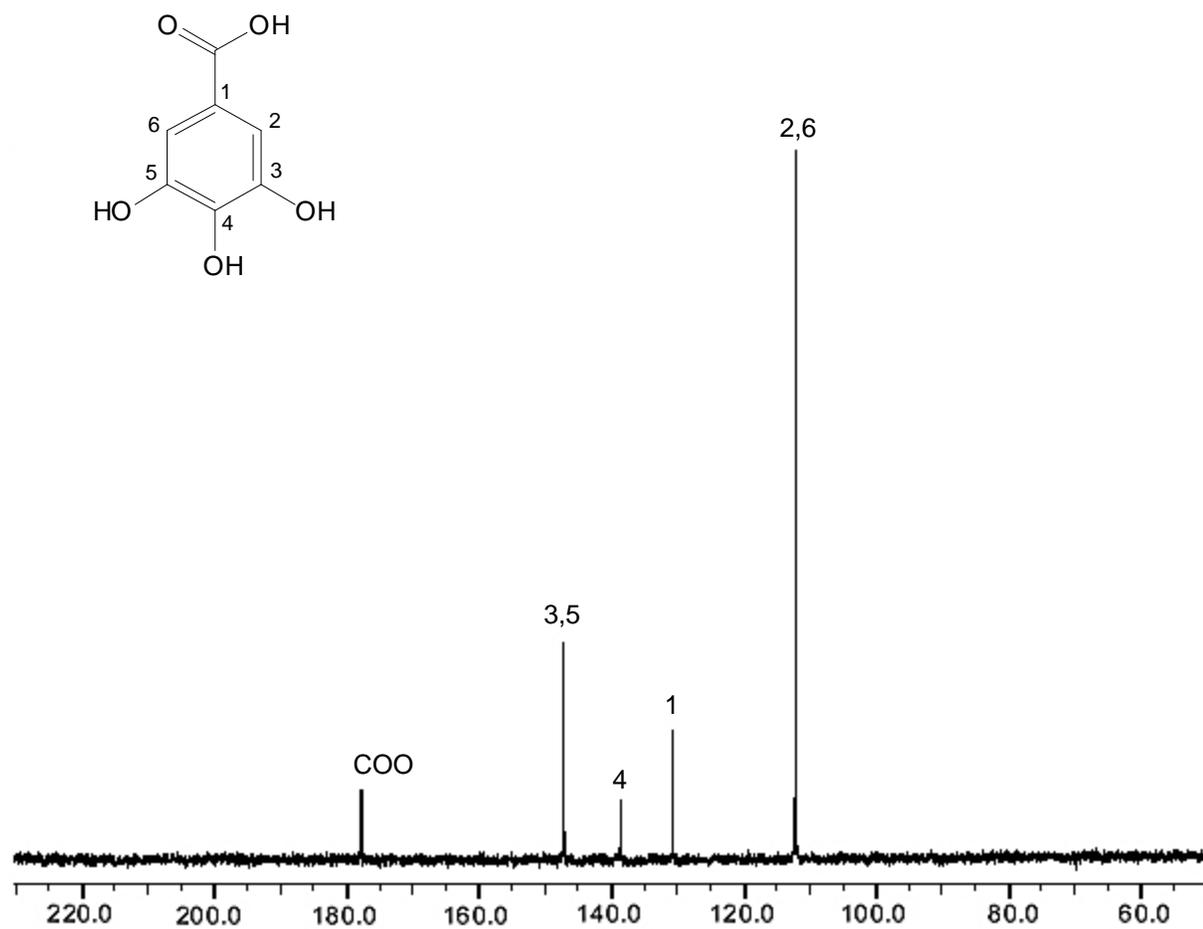
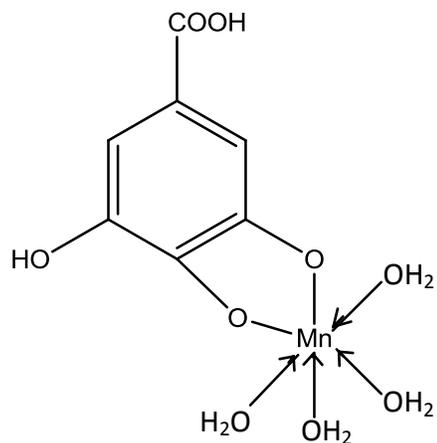
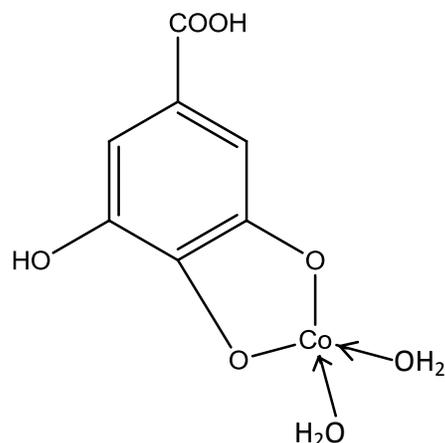


Figura 27. Espectro de RMN de ^{13}C (100 MHz) de ácido gálico en DMSO-d_6 .

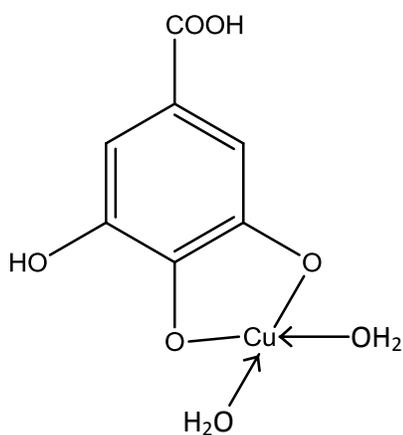
Mamdouh *et al.* (2012), señalaron que el ácido gálico reacciona con cationes divalentes de Mn, Co, Cu, Cd, Pb y Zn, para formar galatos metálicos de geometría octaédrica, tetraédrica y plana cuadrada (figura 28).



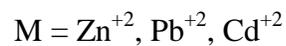
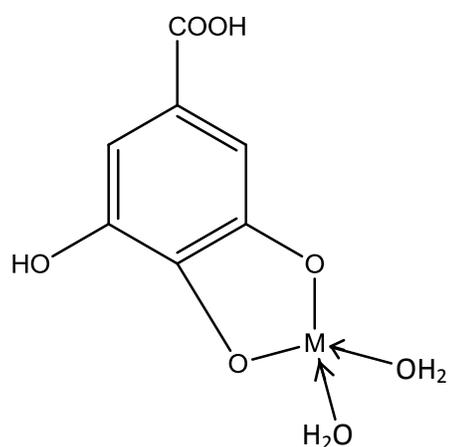
Modelo estructural del complejo ácido gálico-Mn (octaédrico)



Modelo estructural del complejo ácido gálico-Co (tetraédrico)



Modelo estructural del complejo ácido gálico-Cu (plano cuadrado)



Modelo estructural del complejo ácido gálico-M (tetraédrico)

Figura 28. Modelos estructurales de quelatos ácido gálico-metal.

Los galatos de Ni y Fe, reaccionan con el oxígeno presente en el medio para producir agua y pirogalatos metálicos, complejos octaédricos en los que los ligandos son dos moléculas de ácido gálico (figura 29).

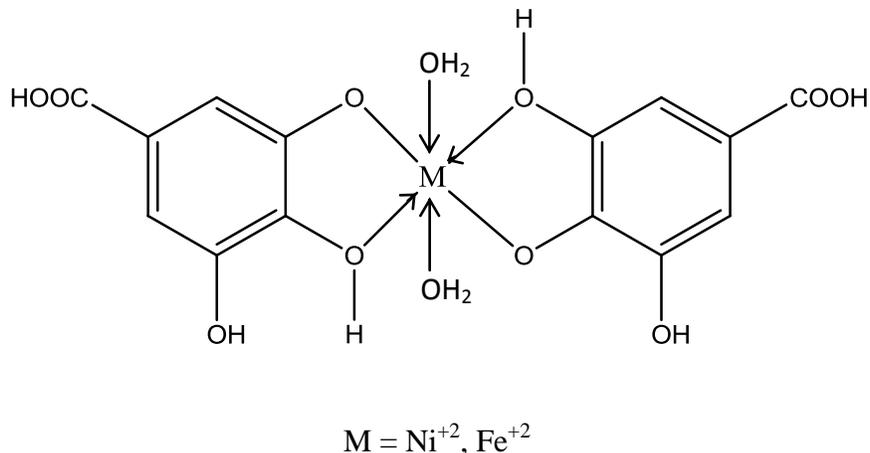


Figura 29. Modelo estructural de pirogalatos.

5.9.4 Ácido málico

De la fracción insoluble de la mezcla CH_3OH/H_2O , se purificó e identificó al ácido málico o ácido 2-hidróxibutanodioico a partir de la fracción 23 (figura 30).

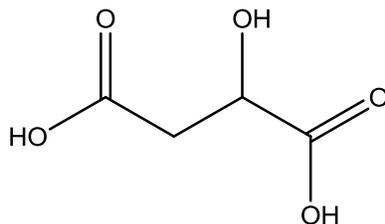
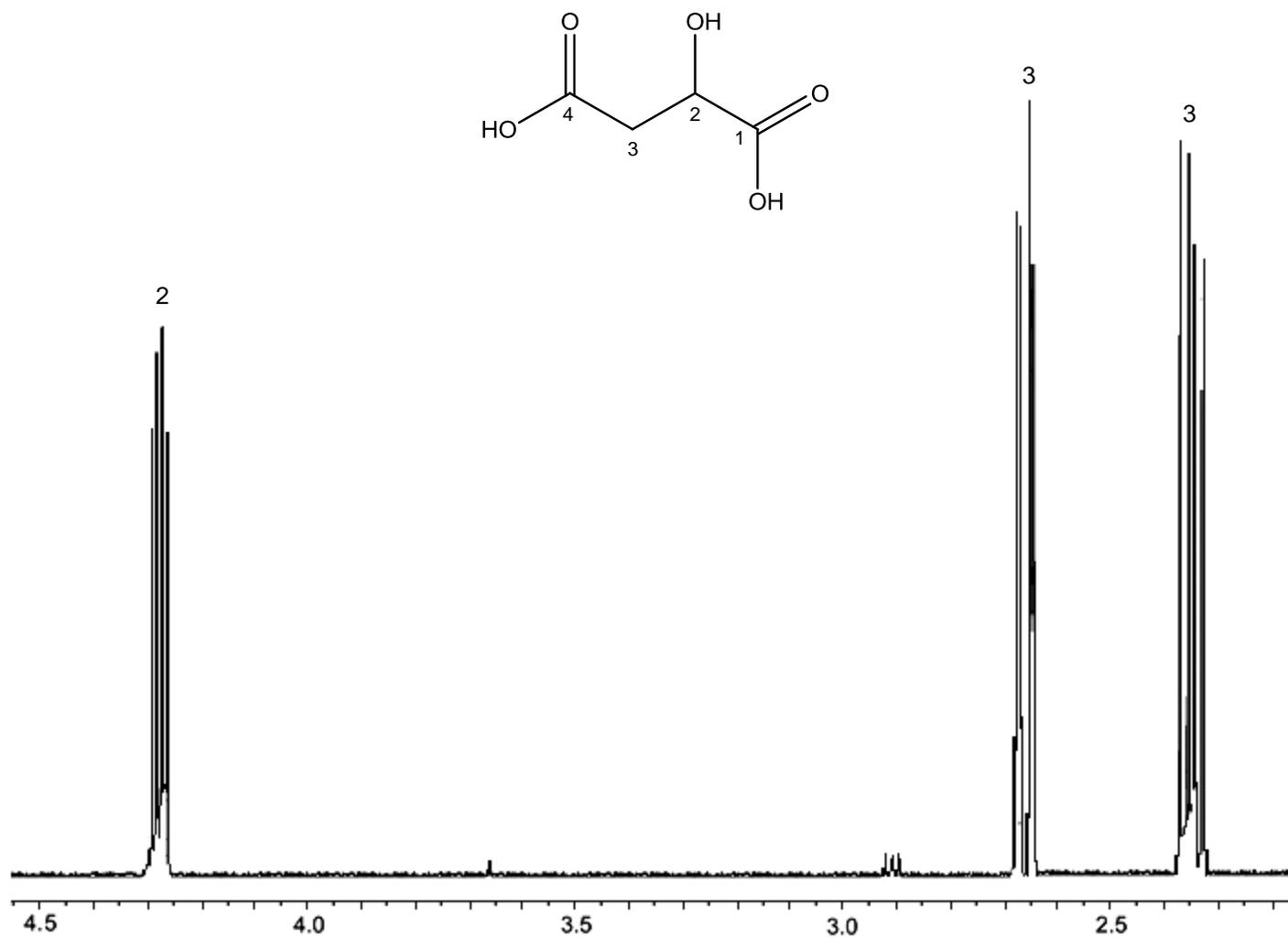


Figura 30. Estructura del ácido málico.

El espectro de RMN de 1H del ácido málico (figura 31) muestra en 4.29 ppm el multiplete correspondiente a H-2; así como las señales dobles de dobles para los protones ubicados en C3. Los datos de RMH de 1H (tabla 75) y ^{13}C (figura 32 y tabla 76) confirman la estructura de este compuesto.

Tabla 75. Datos de RMN de 1H (400 MHz), desplazamiento químico (δ), número de hidrógenos (#H) y multiplicidad (Mult) para el ácido málico.

Posición	δ en ppm	#H	Mult
2	4.29	1H	dd
3	2.35	1H	dd
3	2.66	1H	dd

Figura 31. Espectro de RMN de ^1H (400 MHz) de ácido málico en D_2O .

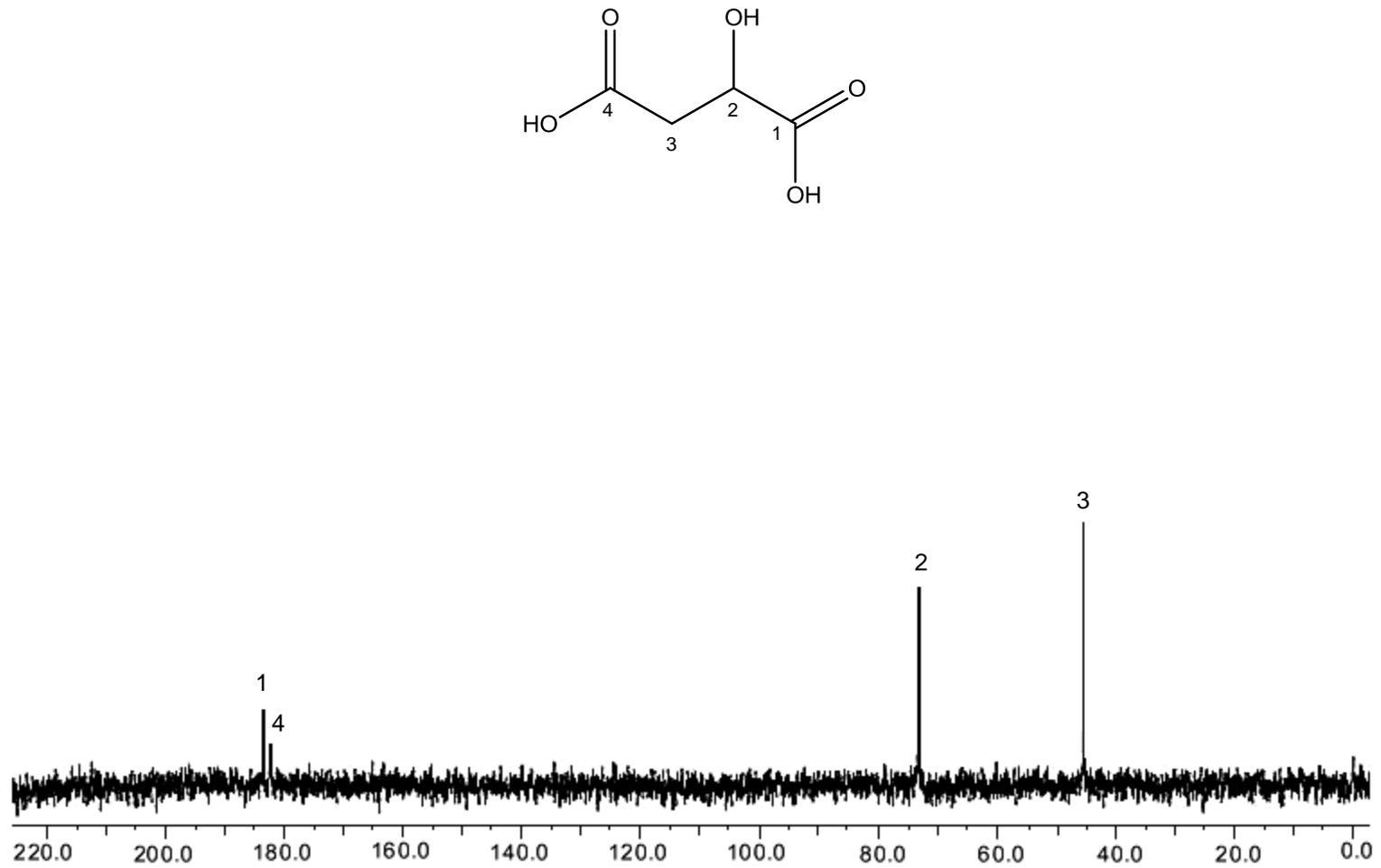


Figura 32. Espectro de RMN de ^{13}C (100 MHz) de ácido málico en D_2O .

Tabla 76. Datos de RMN de ^{13}C (100 MHz), desplazamiento químico (δ) y posición para el ácido málico.

Posición	δ en ppm
1	183.58
2	73.12
3	45.34
4	182.41

El ácido málico es un compuesto importante para las plantas. Dentro de la célula se encuentra en el citosol y en la mayoría de los organelos (mitocondria, cloroplasto, vacuola, peroxisoma y glioxisoma). A nivel de tejido y órgano se halla en hojas, tallos, raíces, conductos del xilema y floema, apoplasto, semillas, frutos y exudados.

El ácido málico cumple con tal variedad de funciones metabólicas y fisiológicas que resulta de vital importancia para la planta. Las más conocidas a la fecha son:

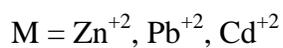
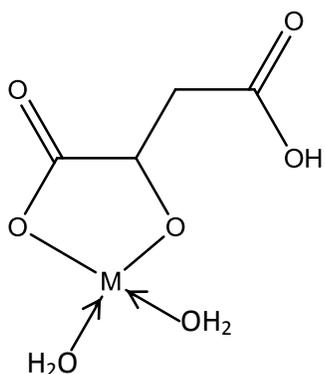
1. Intermediario en el ciclo de Krebs.
2. Transportador de equivalentes reductores hacia el citosol o peroxisoma.
3. Compensador de las cargas eléctricas de iones absorbidos por la raíz.
4. Quelante de cationes tóxicos presentes en el medio.

Cuando los cationes de metales pesados se encuentran en el sustrato en concentraciones del orden micromolar pueden inhibir el crecimiento de la raíz de las especies vegetales. En plantas tolerantes a dichas sustancias, se ha encontrado que éstas exudan ligandos como el ácido málico para quelar (secuestrar) los cationes presentes en la rizósfera (Martínez y Calderón, 2005).

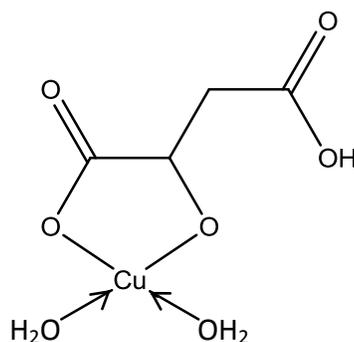
Para lograr este efecto, el ácido málico posee ciertas propiedades químicas, dentro de las cuales dos de ellas son fundamentales:

1. Posee al menos dos átomos donadores de un par electrónico, que se puedan ligar al ión metálico.
2. Estos grupos funcionales están situados en la molécula de tal manera que permiten la formación de un anillo con un átomo metálico cerrando el miembro.

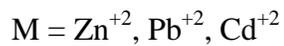
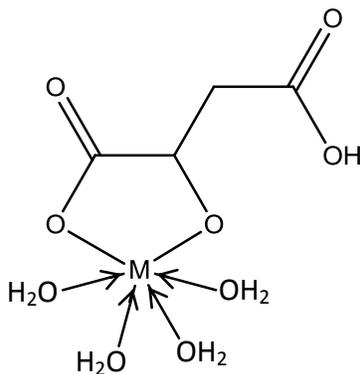
Así, el ácido málico actúa como ligando bidentado para formar malatos metálicos de geometría octaédrica, tetraédrica y plana cuadrada con el Fe, Mn, Cu, Co, Zn y Pb (figura 33).



Modelo estructural del complejo ácido málico-M (tetraédrico)



Modelo estructural del complejo ácido málico-Cu (plano cuadrado)



Modelo estructural del complejo ácido málico-M (octaédrico)

Figura 33. Modelos estructurales de quelatos ácido málico-metal (Montargés *et al.*, 2008).

Capítulo 6. Conclusiones y sugerencias de trabajos futuros a desarrollar

6.1 Conclusiones

Los parámetros fisicoquímicos del agua la laguna de Tecocomulco, muestran que:

1. La temperatura promedio presenta distribución espacio-temporal con valores máximos en junio y mínimos en invierno.
2. La CE, la concentración de SD y la turbiedad muestran valores máximos en junio.
3. El pH es ligeramente ácido durante los dos primeros periodos de muestreo.
4. Los valores de alcalinidad indican una alta productividad primaria.
5. El agua es moderadamente dura debido a la concentración de Ca.
6. Se presentan condiciones hipóxicas en estaciones de muestreo con elevada cantidad de tulle; no así, en aquellas que tienen vegetación sumergida y alta transparencia.
7. El periodo de septiembre a diciembre registra los % SO más elevados.
8. Junio presenta los mayores niveles de DBO₅.
9. El % GB fue bajo para todos los sitios y periodos de muestreo.
10. Existe baja concentración de metales en agua. Se detectó la presencia de Cd, Cr, As, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn y Co.
11. Los límites establecidos por la EPA indican que las concentraciones de Mn, Fe, Pb, Ni y Cd, sobrepasan los valores permitidos para el uso del agua con fines de consumo humano.
12. Según la Normatividad Mexicana, las concentraciones de Fe, Cd y Co rebasan los límites máximos permitidos para el uso del agua con fines de consumo humano.
13. El análisis del TSI, del índice trófico TRIX y de la clasificación propuesta por la OECD, indica que la laguna de Tecocomulco se encuentra en estado eutrófico, con agua de poca calidad y altamente productiva.

El estudio de metales pesados en el sedimento muestra que:

1. Existe la presencia de 10 metales pesados en el siguiente orden decreciente de concentración: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr>As>Cd>Co.

2. El 60.22% de los metales detectados son de origen litogénico, el 39.78% restantes deben su presencia a factores antropogénicos.
3. La concentración de Mn, Zn, Cd, Cu, Co, Pb, Cr y Fe fue baja en la fracción de iones intercambiables. Estos metales representan un riesgo de contaminación debido a que su liberación al agua es favorecida por las pequeñas modificaciones de las condiciones naturales de la laguna.
4. Las variaciones del pH favorecen la liberación del Mn y del Co ligados a carbonatos.
5. Las condiciones ligeramente ácidas que presenta el agua la laguna, favorecen la liberación del Pb unido a los precipitados de hidróxidos de Fe.
6. Las concentraciones más elevadas de Zn, Cu, Cd y Ni se hayan adsorbidas y acumuladas en la materia orgánica.
7. El Fe y el Mn se encuentra en elevadas concentraciones en la fracción residual, por lo tanto, no tienen impacto en la calidad del agua de la laguna.
8. Las modificaciones en los parámetros fisicoquímicos de la laguna de Tecocomulco provocan la migración de los metales de la columna de agua a los sedimentos, o viceversa, y por lo tanto, permiten su incorporación a la cadena trófica.

El análisis de las hidrófitas indica que:

1. Las macrófitas *Schoenoplectus californicus*, *Marsilea mollis* B. L., *Hydrocotyle ranunculoides* L. f., *Ricciocarpus natans*, *Nymphoides fallax* y *Azolla mexicana*, acumulan Zn, Mn, Fe, Cu, Pb, Ni, As, Cd y Cr.
2. El *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. contiene altas concentraciones de Zn, Mn, Fe, Pb, Ni, As y Cr en su raíz, por lo que puede ser utilizado para rizofiltración de aguas contaminadas con estas sustancias.
3. En el *Hydrocotyle ranunculoides* L. f., el ácido gálico y el ácido málico son compuestos responsables de la acumulación de Pb.
4. La quercetina encontrada en el *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. no tiene capacidad para coordinarse con el Pb^{2+} .
5. El estigmasterol es un metabolito del *Hydrocotyle ranunculoides* L. f. que no presenta actividad quelante.
6. En la laguna de Tecocomulco, el estado eutrófico y la variabilidad estacional y temporal de los parámetros fisicoquímicos del agua y del sedimento influyen en la disponibilidad, acumulación y toxicidad de metales en la biota acuática.

8.2 Sugerencias de trabajos futuros a desarrollar

Con base en los resultados presentados se pueden desarrollar las siguientes investigaciones:

1. Modelación matemática de la variación de parámetros fisicoquímicos presentados, con el propósito de predecir cambios en cuerpos de agua bajo condiciones similares.
2. Determinación de la capacidad de bioabsorción, acumulación y tolerancia de metales pesados en macrófitas acuáticas invasoras.
3. Determinación de compuestos quelantes en macrófitas acuáticas invasoras.
4. Síntesis y caracterización espectroscópica de complejos: ácido gálico-metal, ácido málico-metal y quercetina-metal.
5. Utilización de macrófitas acuáticas invasoras en rizofiltración de ecosistemas acuáticos contaminados con metales pesados.
6. Aprovechamiento de macrófitas acuáticas invasoras como fuente de biomasa para la generación de bioenergéticos.

Referencias bibliográficas

- Adriano, D. C., Wenzelb, W. W., Vangronsveldc, J., Boland, N. S. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*. 122: 121-142.
- Aguilar-Martínez, J. 2007. Determinación de pesticidas organoclorados en *Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758 del lago de Tecocomulco, Hidalgo. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. UAEH.
- Alonso, A. 2005. Valoración de la degradación ambiental y efectos ecotoxicológicos sobre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la cabecera del río Henares. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares (Madrid), España.
- Antunes, A. P. M., Watkins, G. M., Duncan, J. R. 2001. Batch studies on the removal of gold (III) from aqueous solution by *Azolla filiculoides*. *Biotechnol. Lett.* **23**: 249-251.
- Bani, A., Echevarria, G., Sulçe, S., Morel, J. L., Mullai, A. 2007. In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramaWc site (Albania). *Plant and Soil*. 293:79-89.
- Barcelona, M. J., Robbins, G. A. 2004. Soil and Groundwater Pollution. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Elsevier. 3rd Edition.. ISBN-13: 978-0-12-227410-7. ISBN-10: 0-12-227410-5. 49-62.
- Barton, C., Marx, D., Adriano, D., Jun-Koo, B., Newman, L., Czapka, S., Blake, J. 2005. Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environmental Geosciences*. 12 (4): 251-265.
- Begonia, G. B., Davis, C. D., Begonia, M. F. T., Gray, C. N. 1998. Growth Responses of Indian Mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern.] and Its Phytoextraction of Lead from a Contaminated Soil Bull. *Environmental Contamination and Toxicology*. 61:38-43.
- Bennicelli, R., Stepniewska, Z., Banach, A., Szajnocha, K., Ostrowski, J. 2004. The ability of *Azolla caroliniana* to remove heavy metals (Hg(II), Cr(III), Cr (VI)) from municipal waste water. *Chemosphere*. 55: 141-146.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., Naidu, R. 2003. Role of phosphorus in immobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 177:1-44.
- Boniardi, N., Rota, R., Nano, G. 1999. Effect of dissolved metals on the organic load removal efficiency of *Lemna gibba*. *Water Research*. 33(2): 530-538.
- Boonyapookana, B., Parkplan, P., Techapinyawat, S., De Laune, R. D., Jugsujinda, A. 2005. Phytoaccumulation of lead by sunflower (*Helianthus annuus*), tobacco (*Nicotiana tabacum*), and vetiver (*Vetiveria zizanioides*). *Journal of Environmental Science and Health A*. 40: 117-137.

- Burken, J. G., Ma, X. 2006. Phytoremediation of volatile organic compounds. En: Phytoremediation Rhizoremediation. Springer Netherlands (ed). ISBN 978-1-4020-4952-1. 199-216.
- Bustos-Vázquez, Z. G., Monks-Sheets, W. S., Prieto-García, F., Román-Gutiérrez, A. D. 2006. Estudio de bioacumulación de metales pesados en la carpa (*Cyprinus carpio*) de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo. Cartel. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. UAEH.
- Camargo, J. A., Alonso, A. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environment International*. 32: 831-849.
- Camargo, J. A., Alonso, A. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Ecosistemas*. 16 (2): 98-110.
- Campos-Enríquez, J. O., Alatríste-Vilchis, D. R., Huizar-Álvarez, R., Marines-Campos, R. y Alatorre-Zamora, M. A. 2003. Subsurface structure of the Tecocomulco sub-basin (northeastern Mexico basin), and its relationship to regional tectonics. *Geofísica Internacional*. 42 (1): 3-24.
- Carlson, R. E., Simpson, J. 1996. A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. North American Lake Management Society. Madison, Wisconsin.
- Carpena, R. O., Bernal, M. P. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*. 16(2):1-3.
- Castro-García, A., Córdoba-Méndez, D. 1994. Estratigrafía del área volcánica de Tulancingo, Hidalgo, México: Pachuca, Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 26-39.
- CCLT (Comisión de Cuenca de la Laguna de Tecocomulco, A. C.). 2007. Informe anual de actividades de la Comisión de Cuenca de la Laguna de Tecocomulco. 5 p.
- Chandra, P., Kulshreshtha K. 2004. Chromium accumulation and toxicity in aquatic vascular plants. *The Botanical Review*. 70 (3): 313-327.
- Chandra, S. K., Kamala, C. T., Chary, N. S., Balaram, V., Garcia, G. 2005. Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils. *Chemosphere*. 58:507-514.
- Chaudhry, Q., Schröder, P., Werck-Reichhart, D., Grajek, W., Marecik, R. 2002. Prospects and limitations of phytoremediation for the removal of persistent pesticides in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 9 (1): 4-17.
- Chávez-Cárdenas, J. A., Rodríguez-Castro, J. A., Ruíz-Chávez, R., García-Acevedo, M., Serrano-Medrano, M. 2006. La importancia de la dureza del agua. Determinación de la dureza. 2° foro académico nacional de ingenierías y arquitectura. Facultad de ingeniería civil. 7 p.

- Chen C., S., Oliveira, M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39 (24): 9377-9390.
- Cho, C., Yavuz-Corapcioglu, M., Park, S., Sung, K. 2008. Effects of Grasses on the Fate of VOCs in Contaminated Soil and Air. *Water, Air, & Soil Pollution*. 187: 243-250.
- Clemente, R., Almela, C., Bernal, P. M. 2006. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste. *Environmental Pollution*. 143 (3): 397-406.
- Clemente, R., Walker, J. D., Roig, A., Bernal, P. M. 2003. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcóllar (Spain). *Biodegradation*. 14: 199-205.
- Clístenes W. A. 2006. Organic acids effects on desorption of heavy metals from a contaminated soil. *Sci. Agric*. 63 (3): 276-280.
- Cohen-Shoel, Z. Barkay, N., Ilzyer, D., Gilath, L., Tel-Or, E. 2002. Biofiltration of toxic elements by *Azolla* biomass. *Water, Air, Soil Pollut*. **135**: 93–104.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Tecocomulco, Estado de Hidalgo. 1-25.
- Conesa, H. M., Faz, A., Arnaldos, R. 2007. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Chemosphere*. 66 (1): 38-44.
- Davidson, C. M., Thomas, R. P., McVey, S. E. 1994. Evaluation of a sequential extraction procedure for the speciation of heavy metals in sediments. *Analytica Chimica Acta*. 291 (3): 277.286.
- De la Barra, R. N. 2003. Clasificación Ecológica de la Vegetación Acuática en Ambientes Lacustres de Bolivia. *Rev. Bol. Ecol*. 13: 65-93.
- Del Vitto, L. A., Petenatti, E. M., Petenatti, M. E. 1997. Recursos herbolarios de San Luis (República Argentina). Primera parte: Plantas nativas. *Multequina*. *Latin American Journal of Natural Resources*. 6: 44-66.
- Delgadillo, L. A. E., González, R. C. A., Villagómez, I. J. R., Acevedo, S. O. A., Prieto, G. F. 2009. Determinación de la calidad del agua de la laguna de Tecocomulco, Hidalgo. En: *Estudios ambientales realizados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Ciencia al día. 1era. Edición. ISBN 978-607-482-079-9.
- Delgadillo, L. A. E., González, R. C. A., Villagómez, I. J. R., Acevedo, S. O. A., Prieto, G. F. 2011. Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 14: 597-612.

- Della, G. M., Fiorentino, A., Monaco, P., Previtera L. 1994. Oleanane glycosides from *Hydrocotyle ranunculoides*. *Phytochemistry*. 36 (6): 1479-1483.
- Della, G. M., Fiorentino, A., Monaco, P., Previtera, L. 1993. Polyoxygenated oleanane triterpenes from *hydrocotyle ranunculoides*. *Phytochemistry*. 35 (1): 201-204.
- Demant, A. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de Interpretación: México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. 2 (2): 172- 187.
- Denys, S., Rollin, C., Guillot, F., Baroudi, H. 2006. In-Situ Phytoremediation of Paha Contaminated Soils Following a Bioremediation Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*. 6 (3-4): 299-315.
- Dilek, D. Y. 2007. Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae). *Journal of Hazardous Materials*. 147 (1-2): 74-77.
- Dusan, M., Vesna, K. 2007. Investigation of metal-flavonoid chelates and the determination of flavonoids *via* metal-flavonoid complexing reactions. *J. Serb. Chem. Soc.* 72 (10): 921-939.
- Dushenkov, V., Kumar, P. B., Motto, H., Raskin, I. 1995. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science & Technology*. 29:1239-1245.
- Eapen, S., Singh, S., D'Souza S. F. 2007. Advances in development of transgenic plants for remediation of xenobiotic pollutants. *Biotechnology Advances* . 25: 442-451.
- Eapen, S., Suseelan, K., Tivarekar, S., Kotwal, S., Mitra, R. 2003. Potential for rhizofiltration of uranium using hairy root cultures of *Brassica juncea* and *Chenopodium amaranticolor*. *Environmental Research*. 91: 127-133.
- Echaniz, S., Vignatti, A. 2009. Determinación del estado trófico y de la capacidad de carga del embalse Casa de Piedra. *BioScriba*. 2 (1): 41-51.
- EEA. 2000. Nutrients in European ecosystems. Environmental Assessment Report No 4. European Environment Agency Copenhagen.
- EEA. 2005. Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment. Environmental Assessment Report No 7. European Environment Agency, Copenhagen.
- Elosegi, A., Sabater, S. 2009. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Primera edición. Ed. Rubes. España.
- EPA. 1999. Update of ambient water quality criteria for ammonia. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- EPA. 2006. National recommended water quality criteria. US Environmental Protection Agency, Washington, DC.

- Fogarty, R. V., Dostalek, P., Patzak, M., Votruba, J., Tel-Or, E., Tobin, J. M. 1999. Metal removal by immobilised and non-immobilised *Azolla filiculoides*. *Biotechnology Technology*. **13**: 530-538.
- Frérot, H., Lefévre, C., Gruber, W., Collin, C., Dos-Santos, A., Escarré, J. 2006. Specific interactions between local metalicolous plants improve the phytostabilization of mine soils. *Plant and Soil*. **282**: 53-65.
- GEH (Gobierno del Estado de Hidalgo). Consejo Estatal de Ecología. (2003). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar. 1-10.
- Ghosh, M., Singh, S. P. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research*. **3** (1): 1-18.
- Ghosh, S., Ddung, S. R., Chowdhury, S. T., Mandal, A. K., Sarkar, S., Ghosh, D., Das, N. 2011. Encapsulation of the flavonoid quercetin with an arsenic chelator into nanocapsules enables the simultaneous delivery of hydrophobic and hydrophilic drugs with a synergistic effect against chronic arsenic accumulation and oxidative stress. *Free Radic Biol Med*. **51** (10): 1893-1902.
- Goyenola, G. 2007. Determinación de la alcalinidad total. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. 4 p.
- Groudeva, V. I., Groudev, S. N., Doycheva, A. S. 2001. Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals. *International Journal of Mineral Processing*. **62** (1-4): 293-299.
- Hannink, N., Rosser, S. J., French, C. E., Basran, A., Murray, J. A. H., Nicklin, S., Bruce, N. C. 2001. Phytoremediation of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase. *Nature Biotechnology*. **19**: 1168-1172.
- Harry, C. 2006. The potential for biological control of invasive alien aquatic weeds in Europe: a review. *Hydrobiologia*. **570** (1): 217-222.
- Hauenstein, E., Peña, C. F., Bertrán, C., Tapia, J., Schlatter, R. 2008. Comparación florística y estado trófico basado en plantas indicadoras de lagunas costeras de la región de La Araucanía, Chile. *Ecología Austral*. **18**: 43-53.
- Huizar, Á. R., Campos, E. O., Miltre, S. L. M., Alatraste, V. D., Méndez, G. T., Juárez, S. F. 2001. Evaluación hidrogeológica de la subcuenca de Tecocomulco, Estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. **18** (1): 55-73.
- Huizar, Á. R., Ruiz, G. J. E. 2005. Aspectos físicos y socioeconómicos de la subcuenca de Tecocomulco. En: *La Laguna de Tecocomulco: Geo-egología de un desastre*. 1era. ed. UNAM. ISBN 9703232388, 9789703232383. 9-20.
- Hussner, A., Lösch, R. 2007. Growth and photosynthesis of *Hydrocotyle ranunculoides* L. fil. En *Central Europe. Flora, Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. **202** (8): 653-660.

- Jiménez, F. E. J., Juárez, L. J. C., Alonso, M. L. 2005. Ornitofauna y fauna acuática de la laguna de Tecocomulco. En *La Laguna de Tecocomulco: Geo-egología de un desastre*. 1era. ed. UNAM. ISBN 9703232388, 9789703232383. 179-192.
- Kamal, M., Ghaly, A. E., Mahmoud, N., Cote, R. 2004. Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. *Environment International*. 29: 1029-1039.
- Kelley, C., Gaither, K. K., Baca-Spry, A., Cruickshank, B. J. 2000. Incorporation of phytoremediation strategies into the introductory chemistry laboratory. *Chem Educator*. 5: 140-143.
- Keverrn, T. 1999. Parámetros físico-químicos: alcalinidad. *Hach Water Analysis Handbook*. 430 p.
- Khan, G., Kuek, C., Chaudhary, T., Fhoo, C., Hayes, W. 2000. Role of mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*. 41: 197-207.
- Kucharski, R., Sas-Nowosielska, A., Małkowski, E., Japenga, J., Kuperberg, J. M., Pogrzeba, M., Krzyzak, J. 2005. The use of indigenous plant species and calcium phosphate for the stabilization of highly metal-polluted sites in southern Poland. *Plant and Soil*. 273: 291-305.
- Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science & Technology*. 29 (5): 1239-1245.
- Ledezma-Guerrero, O. 1987. Hoja Calpulalpan 14Q-h(3), con resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, estados de Hidalgo, México y Tlaxcala: México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológicas de México, Serie de 1: 100,000, mapa con secciones y texto. 12 p.
- Li, M. S., Luo, Y. P., Su, Z. Y. 2007. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental Pollution*. 147 (1): 168-175.
- Lin, Z. Q., De-Souza, M., Pickering, I. J., Terry, N. 2002. Evaluation of the macroalga, *Chara canescens*, for the remediation of selenium-contaminated agricultural drainage by microcosms. *Journal of Environmental Quality*. 31: 2104-2110.
- Lot, H. A. 2005. Vegetación acuática de la laguna de Tecocomulco. En *La Laguna de Tecocomulco: Geo-egología de un desastre*. 1era. ed. UNAM. ISBN 9703232388, 9789703232383. 141-1480.
- Lot, H. A., Novelo, R. A. 1978. Guías Botánicas de Excursiones en México. Laguna de Tecocomulco, Hidalgo. Sociedad Botánica de México, A. C. 4-15.
- Mains, D., Craw, D., Rufaut, C. G., Smith, C. M. S. 2006. Phytostabilization of gold mine tailings, New Zealand. Part 1: Plant establishment in alkaline saline substrate. *International Journal of Phytoremediation*. 8 (2): 131-147.

- Maleva, M. G., Nekrasova, G. F., Bezel, V. S. 2004. The Response of Hydrophytes to Environmental Pollution with Heavy Metals. *Russian Journal of Ecology*. 35 (4): 230-235.
- Mamdouh, S., Masoud, S. S., Hagagg, A. E., AliNessma, M. N. 2012. Synthesis and spectroscopic characterization of gallic acid and some of its azo complexes. *Journal of Molecular Structure*. 1014: 17-25.
- Martínez, C. J. L., Calderón, S. J. V. 2005. La función y transporte del ácido L-málico en plantas: un dicarboxílico estrella. *REB*. 24 (2): 39-46.
- McGrath, S. P., Zhao, F. J., Lombi, E. 2001. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils. *Plant and Soil*. 232:207-214.
- Méndez, M. O., Maier, R. M. 2008. Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology. *Environ Health Perspect*. 116 (3): 278-283.
- Miretzky, P., Saralegui, A., Fernández-Cirelli, A. 2004. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). *Chemosphere*. 57:997-1005.
- Mkandawire, M., Taubert, B., Dudel, E. G. 2005. Resource manipulation in uranium and arsenic attenuation by *Lemna gibba* L. (duckweed) in tailing water of a former uranium mine. *Water, Air, & Soil Pollution*. 166 (1-4): 83-101.
- Montarges, P. E., Chardot, V., Echevarria, G., Michot, L. J., Bauer, A., Morel, J. L. 2008. Identification of nickel chelators in three hyperaccumulating plants: An X-ray spectroscopic study. *Phytochemistry*. 69 (8): 1695-1709.
- Mooser, F. 1975. Historia geológica de la Cuenca de México. En: Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal: México, D.F., Departamento del Distrito Federal. 1: 7-38.
- Mooser, F., Nair, A. E. M., Negendank, J. F. W. 1974. Paleomagnetic Investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII. A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico. *Geologische Rundschau*. 63 (1-2): 451-483.
- Morillo, J., Usero, J., Gracia, I. 2002. Heavy metals fractionation in sediments from the Tinto River (Spain). *International Journal of Environment Analytical Chemistry*. 82 (4): 245-257.
- Movahed, N. M., Mohammad, M. 2009. Phytoremediation and sustainable urban design methods (Low Carbon Cities through Phytoremediation). 45th ISOCARP Congress. Página consultada el 04 Septiembre del 2009. En: <http://www.isocarp.net>.
- Navarro-Aviñó, J. P., Aguilar, A. I., López, M. J. R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*. 16 (2): 10-25.

- Nedelkoska, T. V., Doran, P. M. 2000. Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens*. *Biotechnology and Bioengineering*. 67: 607-615.
- Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En [http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-007-SCFI 2000.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-007-SCFI%202000.pdf)
- Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua. Determinación del pH. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2000/nmx-aa-008-scfi-2000.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001. Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-012-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-014-1980. Cuerpos receptores – Muestreo. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-014-1980.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-026-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-026-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas. Página consultada el 28 de Abril del 2012. En <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-028-SCFI-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 28 de Abril del 2012. En <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-030-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-034-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-036-scfi-2001.pdf>

- Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-038-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-051-SCFI-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-072-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas. Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2001/nmx-aa-079-scfi-2001.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. Determinación de la conductividad electrolítica. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2000/nmx-aa-093-scfi-2000.pdf>
- Norma Mexicana NMX-AA-099-SCFI-2006. Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales. Página consultada el 14 de Mayo del 2009. En <http://www.economia.gob.mx/work/normas/nmx/2006/nmx-aa-099-scfi-2006.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Página consultada el 28 de Abril de 2012. En http://www.temixco.gob.mx/archivo/media/documentos/normas%20oficiales/NOM_001_ECOL_1996.pdf
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Página consultada el 28 de Abril de 2012. En <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Página consultada el 18 de Septiembre de 2008. En <http://www.economia-noms.gob.mx/>
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse al agua para su potabilización. Página consultada el 28 de Abril de 2012. En <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>

- Odjegba, V. J., Fasidi, I. O. 2004. Accumulation of trace elements by *Pistia stratiotes*: Implications for phytoremediation. *Ecotoxicology*. 13: 637-646.
- OECD. 2006. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Research of the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Ed. Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax (SWCSMH). Página consultada el 19 de febrero de 2011. En <http://lakes.chebucto.org/TPMODELS/OECD/oecd.html>
- Orozco, B. C., Pérez, S. A., Alfayate, B. J. M., González, D. M. N., Rodríguez, V. F. J. 2003. Contaminación ambiental: una visión desde la química. Thomson. 1era. Edición. ISBN: 8497321782, 9788497321785. 682 p.
- Ozkan, E. Y., Kocatas, A., Buyukisik, B. 2008. Nutrient dynamics between sediment and overlying water in the inner part of Izmir Bay, Eastern Aegean. *Environmental Monitoring and Assessment*. 143: 313-325.
- Padmavathiamma, P. K., Li, L. Y. 2007. Phytoremediation Technology: Hyper-accumulation Metals in Plants. *Water, Air, & Soil Pollution*. 184: 105-126.
- Poi, de N. A. S. G., Patiño, C., Neiff, J. J., Ramos, A. O. 2003. Calidad del agua en el tramo bajo del río Negro (Chaco-Argentina). *FACENA*. 19: 67-85.
- Prasad, M. N. V., Freitas, H. M. O. 2003. Metal hyperaccumulation in plants- biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Journal of Molecular Biology & Genetics*. 6 (3): 276-312.
- Qin, G., Terry, N. 2003. Selenium Removal by Constructed Wetlands: Quantitative Importance of Biological Volatilization in the Treatment of Selenium-Laden Agricultural Drainage Water. *Environ. Sci. Technol.* 37: 606-615.
- Ramsar. 1999. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). 10 p.
- Reeves, R. D. 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. *Plant and Soil*. 249: 57-65.
- Reeves, R. D. 2006. Hyperaccumulation of trace elements by plants. En: *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils*. Springer Netherlands (ed). ISBN 978-1-4020-4686-5. 25-52.
- Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Borhidi, A., Berazain, R. 1999. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany*. 83 (1): 29-38.
- Reichenauer, T.G., Germida, J. J. 2008. Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. *ChemSusChem*. 1 (8-9): 708-717.

- Rivera, D. 2002. Modelación del oxígeno disuelto en lagos estratificados incorporando los efectos del viento. Informe de memoria de título para optar al título de ingeniero civil. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Concepción.
- Rizzi, L., Petruzzelli, G., Poggio, G., Vigna, G. 2004. Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. *Chemosphere*. 57 (9): 1039-1046.
- Robin, C. 1976. Las series volcánicas de la Sierra Madre Oriental (basaltos e ignimbritas). Descripción y caracteres químicos: México, D.F. Universidad Nacional Autónoma México, Instituto de Geología. 2: 13-42.
- Robin, C. 1978. Particularités géochimiques des suites andésitiques de la zone orientale de l' Axe Transmexicain, dans leur contexte tectonique. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 7eme serie. 20 (2): 193-202.
- Romo-Gómez, C., Monks, S., Pulido-Flores, G., Acevedo-Sandoval, O. A., Gordillo-Martínez, A. J., Villagómez-Ibarra, J. R. 2009. Evaluación de metales en el sedimento del Lago de Tecocomulco Hidalgo, México. Capítulo de libro. En: Estudios Ambientales realizados en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ciencia al Día. 1era. Edición. ISBN 978-607-482-079-9.
- Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., Mihoc, A., Fortin, N., Masson, C., Leblan, R., Cha, G., Sura, C., Gallipeau, C., Olsen, C., Delisle, S., Labrecque, M., Greer, C. W. 2005. Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil*. 272: 277-290.
- Schroeder, E. D. 2004. Water Resources. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Elsevier. 3rd Edition. ISBN-13:978-0-12-227410-7. ISBN-10:0-12-227410-5. 721-751.
- Schwartz, C., Echevarria, G., Morel, J. L. 2003. Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*. 249: 27-35.
- SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. 2001. Programa Integral de Protección, Conservación, Restauración y Aprovechamiento de la Cuenca de Tecocomulco, Hidalgo. 34 p.
- Sharma, N. C., Gardea-Torresdey, J. L., Parsons, J., Sahi, S. V. 2004. Chemical speciation and cellular deposition of lead in *Sesbania drummondii*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 23: 2068-2073.
- Shiowatana, J., Tantidanai, N., Nookabkaew, S., Nacaprica, D. 2001. Heavy Metals in the Environment. A novel Continuous-Flow Sequential Extracción Procedura for Metal Speciation in Solids. *J. Environ. Qual.*, 30: 1195-1205.
- Shrestha, B., Lipe, S., Johnson, K.A., Zhan, T.Q., Retzlaff, W., Lin, Q. 2006. Soil hydraulic manipulation and organic amendment for the enhancement of selenium volatilization in a soil-pickleweed system. *Plant and Soil*. 288: 189-196.

- Singh, O. V., Jain, R. K. 2003. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied and Microbiology Biotechnology*. 63 (2): 128-135.
- Suseela, M. R., Sinha, S., Singh, S., Saxena, R. 2002. Accumulation of chromium and scanning electron microscopic studies in *Scirpus lacustris* L. Treated with metal and tannery effluent. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 68 (4): 540-548.
- Sutherland, R. A., Tack, F. M. G. 2002. Determination of Al, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in certified reference materials using the optimized BCR sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*. 454: 249-257.
- Swapnila, C., Flora, S. J. S. 2012. Arsenic and fluoride: Two major ground water pollutants. *Indian Journal of Experimental Biology*. 48: 666-678.
- Tan, J., Wang, B., Zhu, L. 2007. Hydrolytic cleavage of DNA by quercetin manganese(II) complexes. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 55 (2): 149-152.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C. 1991. Comment on "Pitfalls of sequential extractions". *Water Res.* 25: 115-117.
- Thangavel, P., Subhram, C. V. 2004. Phytoextraction – Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B*. 70 (1): 109-130.
- Thiemann, S., y Kaufmann, H. 2000. Determination of Chlorophyll Content and Trophic State of Lakes Using Field Spectrometer and IRS-1C Satellite Data in the Mecklenburg Lake District, Germany. *Remote Sensing of Environment*. 73 (2): 227-235.
- Vardanyan, L. G., Ingole, B. S. 2006. Studies on heavy metal accumulation in aquatic macrophytes from Sevan (Armenia) and Carambolim (India) lake systems. *Environment Internacional*. 32: 208-218.
- Vázquez, S., Agha, R., Granado, A., Sarro, M. J., Esteban, E., Peñalosa, J. M., Carpena, R. O. 2006. Use of White Lupin Plant for Phytostabilization of Cd and As Polluted Acid Soil. *Water, Air, & Soil Pollution*. 177 (1-4): 349-365.
- Vollenweider, R. E., Giovanardi, F., Montanari, G., y Rinaldi, A. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a tropic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*. 9: 329-357.
- Wania, F. 2004. Transport and Fate of Chemicals in the Environment. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Elsevier. 3rd Edition. ISBN-13: 978-0-12-227410-7. ISBN-10: 0-12-227410-5. 89-105.

- Watanabe, M. E. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environmental Science & Technology*. 31: 182-186.
- Weis, J. S., Weis, P. 2004. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment International*. 30 (5): 685-700.
- Wenzel, W. W., Unterbrunner, R., Sommer, P., Sacco, P. 2003. Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments. *Plant and Soil*. 249:83-96.
- Wolverton, B. C., McDonald, R. C. 1981. Energy from vascular plant wastewater treatment Systems. *Economic Botany*. 35 (2): 224-232.
- Wu, Q. T., Wei, Z. B., Ouyang, Y. 2007. Phytoextraction of Metal-Contaminated Soil by *Sedum alfredii* H: Effects of Chelator and Co-planting. *Water, Air, & Soil Pollut.* 180: 131-139.
- Yang, X. E., Long, X. X., Ye, H. B., He, Z. L., Calvert, D. V., Stoffella, P. J. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant and Soil*. 259: 181-189.
- Zakir, H. M., Shikazono, N. 2008. Metal Fractionation in Sediments: A Comparative Assessment of Four Sequential Extraction Schemes. *Journal of Environmental Science for Sustainable Society*. 2: 1-12.
- Zhang, B., Wu, Z., Cheng, S., He, F., Wang, Y., Gao, Y. 2007. Primary study on phytodegradation of Bisphenol A by *Elodea nuttallii*. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. 12 (6): 1118-1124.
- Zhao, M., Duncan, J. R. 1998. Removal and recovery of nickel from aqueous solution and electroplating rinse effluent using *Azolla filiculoides*. *Process Biochem*. 33: 249-255.
- Zheng, J., Hintelmann, H., Dimock, B., Dzurko, M. S. 2003. Speciation of arsenic in water, sediment, and plants of the Moira watershed, Canada, using HPLC coupled to high resolution ICP-MS. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 377 (1): 14-24.
- Zhuang, P., Yang, Q. W., Wang, H. B., Shu, W. S. 2007. Phytoextraction of Heavy Metals by Eight Plant Species in the Field. *Water, Air, & Soil Pollution*. 184: 235-242.
- Zhuang, P., Ye, Z. H., Lan, C. Y., Xie, Z. W., Shu, W. S. 2005. Chemically assisted phytoextraction of heavy metal contaminated soils using three plant species. *Plant and Soil*. 276: 153-162.