



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



MCIAM
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

**FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD EN AGUA Y SEDIMENTOS
DEL RÍO GRANDE DE MORELIA, MICHOACÁN**

TESIS

presenta la

I.Q.LAURA SELENE DÍAZ RODRÍGUEZ

Directora de Tesis:

***DOCTORA EN INGENIERÍA. RUTH ALFARO CUEVAS
VILLANUEVA***

Morelia, Michoacán, Febrero del 2013

DEDICADO A...

A MIS PADRES

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a la UMSNH por brindarme la oportunidad de estudiar la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, así también por la beca complementaria otorgada para finalizar el proceso.

A CONACYT por la beca proporcionada para llevar a cabo la investigación en el cual me otorgo el número de becario 260784.

Al apoyo económico de PROMEP por medio del Cuerpo Académico UMSNH-CA-167.

Al Instituto de Investigaciones Químicas-Biológicas por todas las facilidades prestadas para realizar este trabajo.

A la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por su amable atención, enseñanza y apoyo para llevar a cabo esta tesis.

A mis sinodales el Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, Dr. Raúl CortésMartínez, Dr. Otoniel Buenrostro Delgado y a la Dra. MaríaAlcaláde Jesús, por cada una de las observaciones, comentarios y ayuda que me proporcionaron para que todo saliera de la mejor manera.

Al Ing. Juan Rangel Camarena y al laboratorio de calidad de agua de la dirección en Michoacán de la Comisión Nacional del Agua.

A la Dra. Isabel Israde Alcántara del laboratorio de cuencas lacustres y al M.C. Neftalí por permitirme usar las instalaciones a su cargo para llevar a cabo los análisis correspondientes para este trabajo.

A la Dra. María Alcalá de Jesús del Laboratorio de Edafología por brindarme el uso de sus equipos e instalaciones para la investigación realizada.

A mis compañeros de Maestría por los buenos momentos los cuales hicieron más ameno el camino.

A mis compañeros de laboratorio principalmente al M.C. Benjamín Villalobos Castañeda y a la M. C. Alejandra Páez Sánchez por el apoyo prestado para sacar adelante este trabajo.

A mi familia por siempre estar a mi lado luchando por mis sueños y a Alejandro por su constante aliento, apoyo y comprensión.

ÍNDICE	Pág.
RESUMEN _____	i
ABSTRACT _____	ii
INTRODUCCIÓN _____	iii
1. MARCO TEÓRICO _____	1
1.1. Generalidades _____	1
1.1.1. Agua _____	1
1.1.2. Distribución _____	1
1.1.3. Ciclo hidrológico _____	2
1.1.4. Agua superficial _____	2
1.1.4.1. Ríos _____	3
1.2. Contaminación del agua _____	3
1.2.1. Generalidades _____	3
1.2.2. Principales contaminantes del agua _____	5
1.3. Contaminación de sedimentos _____	7
1.4. Parámetros a evaluar _____	10
1.4.1. Parámetros fisicoquímicos _____	10
1.4.2. Parámetros bacteriológicos _____	12
1.4.3. Constituyentes mayores _____	12
1.4.4. Metales _____	14
1.4.5. Mecanismos de reacción _____	20
1.4.6. Disponibilidad _____	20
1.4.7. Toxicidad _____	22
1.5. El agua en México _____	24
1.5.1. Uso del agua en México _____	24
1.5.2. Uso del agua en Michoacán _____	25
1.5.3. Hidrología de la zona de Morelia _____	26
2. ANTECEDENTES _____	27
3. JUSTIFICACIÓN _____	28
4. HIPÓTESIS _____	29
5. OBJETIVOS _____	29
5.1. Objetivo general _____	29

5.2. Objetivos específicos _____	29
6. ZONA DE ESTUDIO _____	30
7. METODOLOGÍA _____	33
7.1 Selección de los puntos de muestreo _____	33
7.2. Parámetros a evaluar _____	34
7.3. Toma de muestras _____	34
7.4. Toma de muestras de agua _____	35
7.4.1. Parámetros fisicoquímicos _____	37
7.4.2. Metales pesados _____	37
7.4.3. Coliformes fecales _____	37
7.4.4. Toxicidad en agua _____	37
7.4.5. Modelación de la especiación química de metales pesados y As en agua ____	37
7.5. Toma de muestras de sedimentos _____	38
7.5.1. Transporte y almacenamiento _____	38
7.5.2. Homogenización _____	38
7.5.3. Secado _____	38
7.6. Procedimiento general para análisis de agua _____	38
7.6.1. Parámetros físicos _____	38
7.6.1.1. Color _____	38
7.6.1.2. Turbidez _____	39
7.6.1.3. Profundidad _____	39
7.6.2. Parámetros fisicoquímicos <i>in situ</i> _____	39
7.6.3. Parámetros fisicoquímicos en laboratorio _____	39
7.6.4. Componentes mayores _____	40
7.6.5. Metales pesados y arsénico _____	40
7.6.6. Coliformes fecales _____	40
7.6.7. Toxicidad en agua _____	41
7.6.8. Modelación de la especiación química en agua _____	41
7.6.9. Análisis estadístico para agua _____	41
7.6.9.1. Componentes principales _____	41
7.6.9.2. ANOVA y Tukey _____	42
7.7. Procedimiento general para análisis de sedimentos _____	43

7.7.1. Parámetros físicos	43
7.7.1.1. Color	43
7.7.1.2. Tamaño de partícula	43
7.7.2. Parámetros químicos	43
7.7.2.1. pH	43
7.7.3. Metales pesados y arsénico totales	43
7.7.4. Fases geoquímicas de los sedimentos	43
7.7.4.1. Esquema de extracción secuencial para sedimentos	44
7.7.5. Análisis estadístico para sedimentos	45
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
8.1. Agua	46
8.1.1. Parámetros fisicoquímicos <i>in situ</i>	46
8.1.1.1. Temperatura	46
8.1.1.2. pH	47
8.1.1.3. Conductividad eléctrica (C.E.)	48
8.1.1.4. Oxígeno disuelto (O.D.)	49
8.1.1.5. Sólidos disueltos totales	50
8.1.2. Parámetros físicos	51
8.1.2.1. Turbiedad	51
8.1.2.2. Color	52
8.1.3. Parámetros químicos	53
8.1.3.1. Demanda química de oxígeno (DQO)	53
8.1.3.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	54
8.1.3.3. Dureza total	55
8.1.3.4. Alcalinidad total	56
8.1.3.5. Sólidos sedimentables	57
8.1.3.6. Sólidos suspendidos totales	58
8.1.3.7. Sólidos totales	59
8.1.4. Coliformes fecales	60
8.1.5. Componentes mayoritarios	61
8.1.5.1. Calcio, magnesio y sodio (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Na ⁺)	61
8.1.5.2. Cloruros (Cl ⁻)	63

8.1.5.3. Carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-)	64
8.1.5.4. Sulfatos (SO_4^{2-})	65
8.1.5.5. Nitrógeno amoniacal (N-NH_3)	66
8.1.6. Metales pesados y As	67
8.1.6.1. Hierro (Fe)	67
8.1.6.2. Zinc (Zn)	68
8.1.6.3. Cobre (Cu)	69
8.1.6.4. Cadmio (Cd)	70
8.1.6.5. Arsénico (As)	71
8.1.7. Toxicidad	72
8.1.8. Modelación de la especiación química de los metales pesados	74
8.1.8.1. Modelación de la especiación química del Fe	74
8.1.8.2. Modelación de la especiación química del Zn	75
8.1.9. Análisis estadístico	76
8.1.9.1. Análisis de componentes principales	76
8.1.9.2. ANOVA y prueba de Tuckey	79
8.1.9.2.1. ANOVA y Tukey de Parámetros fisicoquímicos in situ	79
8.1.9.2.2. ANOVA y Tukey de Parámetros fisicoquímicos de laboratorio	81
8.1.9.2.3. ANOVA y Tukey de los metales pesados en agua	88
8.2. Sedimentos	90
8.2.1. Parámetros físicos	90
8.2.1.1. Color	90
8.2.1.2. Tamaño de partícula	91
8.2.2. Parámetros químicos	92
8.2.2.1. pH	92
8.2.3. Metales pesados y As totales	93
8.2.3.1. Hierro (Fe)	93
8.2.3.2. Zinc (Zn)	94
8.2.3.3. Níquel (Ni)	95
8.2.3.4. Cobre (Cu)	96
8.2.3.5. Plomo (Pb)	97
8.2.3.6. Cadmio (Cd)	98

8.2.3.7. Cromo (Cr)	99
8.2.3.8. Arsénico (As)	100
8.2.4.- Análisis estadístico en sedimentos	101
8.2.5. Distribución de metales pesados y As en fracciones geoquímicas	104
8.2.5.1. Fracciones de Fe	104
8.2.5.2. Fracciones de Zn	107
8.2.5.3. Fracciones de Ni	110
8.2.5.4. Fracciones de Cu	113
8.2.5.5. Fracciones de Pb	116
8.2.5.6. Fracciones de Cd	119
8.2.5.7. Fracciones de Cr	122
8.2.5.8. Fracciones de As	125
CONCLUSIONES	128
RECOMENDACIONES	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ANEXOS	137
ANEXO A.- Cuadros de valores de los parámetros obtenidos en agua y sedimentos del río Grande de Morelia.	137
ANEXO B.- Valores obtenidos de metales pesados y As en agua y sedimentos	140
ANEXO C.- Cuadros de especiación química	150
ANEXO D.- Tablas de estadística	152
Tablas del Minitab	152
Cuadros de ANOVA y Tukey para agua	154
Cuadros de ANOVA y Tukey para sedimentos	169
ANEXO E.- Métodos de digestión ácida de agua y sedimentos.	174
Digestión ácida para agua	174
Digestión ácida para sedimentos	174
ANEXOF.- Métodos para la determinación de parámetros fisicoquímicos en sedimentos	177
Determinación de color en sedimento	177
Determinación del tamaño de partículas para sedimento	178
Determinación de pH en sedimento	181

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1.- Principales reservas hídricas en el mundo (PNUMA, 2002).	1
Figura 2.- Ciclo hidrológico (Universidad de Madrid, 2011).	2
Figura 3.- Distribución del agua Nacional (Jiménez, 2011).	24
Figura 4.- Distribución del uso del agua en México (CNA, 2011).	25
Figura 5. Localización de los sitios de muestreo en la zona de estudio.	33
Figura 6.- Triángulo de texturas de suelo.	180

ÍNDICE DE ECUACIONES	Pág.
Ecuación 1. Cálculo de la concentración de CO_3^{2-} en agua.	40
Ecuación 2. Cálculo de la concentración de HCO_3^- en agua.	40

ÍNDICE DE CUADROS	Pág.
Cuadro 1.- Efectos positivos y negativos de los metales (Carazo <i>et al.</i> , 2005)	15
Cuadro 2.- Consumo de agua superficial y subterránea de casa uso (CNA,2011)	25
Cuadro 3.- Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.	34
Cuadro 4.- Recomendaciones para el almacenamiento y transporte de la muestra (Jiménez, 2011)	36
Cuadro 5.- Esquema de extracción secuencial para metales pesados en sedimentos.	44
Cuadro 6.- Porcentaje de toxicidad del agua en el río Grande de Morelia.	73
Cuadro 7.- Valor acumulado de las variables creadas por Minitab.	77
Cuadro 8.- Color en los sedimentos del río grande de Morelia.	90
Cuadro 9.- Tamaño de partícula en los sedimentos del río Grande de Morelia.	91
Cuadro 10.- pH promedio obtenido en los sedimentos del río Grande de Morelia.	92
Cuadro 11.- Concentraciones de los parámetros <i>in situ</i> en el agua del río Grande de Morelia.	137
Cuadro 12.- Concentraciones de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en el agua del río Grande de Morelia.	138
Cuadro 13.- Concentraciones de los componentes mayoritarios en el agua del río Grande de Morelia.	139
Cuadro 14.- Concentraciones de metales pesados y As en agua del río Grande de Morelia.	141
Cuadro 15.- Concentraciones de metales pesados y As en los sedimentos del río Grande de Morelia.	141
Cuadro 16.- Fracciones geoquímicas del hierro en los sedimentos del río Grande de Morelia.	142

Cuadro 17.- Fracciones geoquímicas del zinc en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	143
Cuadro 18.- Fracciones geoquímicas de níquel en lo sedimentos del río Grande de Morelia. _____	144
Cuadro 19.- Fracciones geoquímicas de cobre en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	145
Cuadro 20.- Fracciones geoquímicas de plomo en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	146
Cuadro 21.- Fracciones geoquímicas de cadmio en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	147
Cuadro 22.- Fracciones geoquímicas de cromo en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	148
Cuadro 23.- Fracciones geoquímicas de arsénico en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	149
Cuadro 24.- Especiación química del Fe (II) en el agua del río Grande de Morelia.	151
Cuadro 25.- Especiación química del Fe (III) en el agua del río Grande de Morelia.	151
Cuadro 26.- Especiación química del zinc en el agua del río Grande de Morelia. __	151
Cuadro 27.- Nombre de los sitios correspondientes a los números del Minitab. __	152
Cuadro 28.- Valores de las variables creadas para cada parámetros en Minitab. __	153
Cuadro 29.- ANOVA para temperatura en agua. _____	154
Cuadro 30.- Comparación de medias para temperatura utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	154
Cuadro 31.- ANOVA para pH en agua. _____	154
Cuadro 32.- Comparación de medias para pH utilizando Tukey-Kramer en agua. _	154
Cuadro 33.- ANOVA para conductividad eléctrica en agua. _____	155
Cuadro 34.- Comparación de medias para Conductividad eléctrica utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	155
Cuadro 35.-ANOVA para oxígeno disuelto en agua. _____	155
Cuadro 36.- Comparación de medias para oxígeno disuelto utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	156
Cuadro 37.- ANOVA para sólidos disueltos totales en agua. _____	156
Cuadro 38.-Comparación de medias para sólidos disueltos totales utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	157
Cuadro 39.- ANOVA para la demanda química de oxígeno en agua _____	157
Cuadro 40.- Comparación de medias para la demanda química de oxígeno utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	157
Cuadro 41.- ANOVA para la Demanda bioquímica de oxígeno en agua _____	158
Cuadro 42.- Comparación de medias para la demanda bioquímica de oxígeno utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	158
Cuadro 43.- ANOVA para dureza total en agua _____	158
Cuadro 44.- Comparación de medias para la dureza total utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	159
Cuadro 45.-ANOVA Alcalinidad total en agua _____	159

Cuadro 46.- Comparación de medias para la alcalinidad total utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	159
Cuadro 47.-ANOVA para el Calcio en agua _____	160
Cuadro 48.- Comparación de medias para el calcio utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	160
Cuadro 49.- ANOVA para el magnesio en agua _____	160
Cuadro 50.- Comparación de medias para el magnesio utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	161
Cuadro 51.- ANOVA para Sodio en agua _____	161
Cuadro 52.- Comparación de medias para el sodio utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	161
Cuadro 53.- ANOVA para sulfatos en agua _____	162
Cuadro 54.- Comparación de medias para sulfatos utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	162
Cuadro 55.-ANOVA para bicarbonatos en agua _____	162
Cuadro 56.- Comparación de medias para bicarbonatos utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	163
Cuadro 57.-ANOVA para cloruros en agua. _____	163
Cuadro 58.- Comparación de medias para cloruros utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	163
Cuadro 59.- ANOVA para nitrógeno amoniacal en agua. _____	164
Cuadro 60.- Comparación de medias para nitrógeno amoniacal utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	164
Cuadro 61.- ANOVA para los sólidos sedimentables en agua. _____	164
Cuadro 62.- Comparación de medias para los sólidos sedimentables utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	165
Cuadro 63.- ANOVA para sólidos totales en agua. _____	165
Cuadro 64.- Comparación de medias para sólidos totales utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	165
Cuadro 65.- ANOVA sólidos suspendidos totales en agua. _____	166
Cuadro 66.- Comparación de medias para sólidos suspendidos totales utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	166
Cuadro 67.- ANOVA para coliformes fecales en agua. _____	166
Cuadro 68.- Comparación de medias para coliformes fecales utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	167
Cuadro 69.- ANOVA para hierro en agua. _____	167
Cuadro 70.- Comparación de medias para hierro utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	167
Cuadro 71.- ANOVA para zinc en agua. _____	168
Cuadro 72.- Comparación de medias para zinc utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	168
Cuadro 73.- ANOVA para arsénico en agua. _____	168
Cuadro 74.- Comparación de medias para arsénico utilizando Tukey-Kramer en agua. _____	169

Cuadro 75.- ANOVA para hierro en sedimentos. _____	169
Cuadro 76.- Comparación de medias para hierro utilizando Tukey_kramer en sedimentos. _____	169
Cuadro 77.- ANOVA para zinc en sedimentos. _____	170
Cuadro 78.- Comparación de medias para zinc utilizando Tukey-Kramer en sedimentos. _____	170
Cuadro 79.- ANOVA para níquel en sedimentos. _____	170
Cuadro 80.- Comparación de medias para níquel utilizando Tukey-Kramer en sedimentos. _____	170
Cuadro 81.- ANOVA para cobre en sedimentos. _____	171
Cuadro 82.- Comparación de medias para cobre utilizand Tukey-Kramer en sedimentos. _____	171
Cuadro 83.- ANOVA para plomo en sedimentos. _____	171
Cuadro 84.- Comparación de medias para plomo utilizando Tukey-Kramer en sedimentos. _____	172
Cuadro 85.- ANOVA para arsénico en sedimentos. _____	172
Cuadro 86.- Comparación de medias para arsénico utilizando Tukey-Kramer en sedimentos. _____	173
Cuadro 87.- Profundidad de pipeta en cm en función de la temperatura y tiempo de sedimentación. _____	179

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1.- Temperatura en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia. _____	46
Gráfica 2.- pH en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia. ____	47
Gráfica 3.- C.E en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia. ____	48
Gráfica 4.- Concentraciones de O.D en el agua del río Grande de Morelia. _____	49
Gráfica 5.- Concentraciones de los SDT en el agua del río Grande de Morelia. ____	51
Gráfica 6.- Turbiedad en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia. _____	52
Gráfica 7.- Color en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia. __	53
Gráfica 8.- Concentraciones de DQO en el agua del río Grande de Morelia. _____	54
Gráfica 9.- Concentraciones de DBO5 en el agua del río Grande de Morelia. _____	55
Gráfica 10.- Concentraciones de la dureza total en el agua del río Grande de Morelia. _____	56
Gráfica 11.- Concentraciones de la alcalinidad total en el agua del río Grande de Morelia. _____	57
Gráfica 12.- Concentraciones de los sólidos sedimentables en el agua del río Grande de Morelia. _____	58
Gráfica 13.- Concentraciones de los sólidos suspendidos en el agua del río Grande de Morelia. _____	59

Gráfica 14.- Concentraciones de los sólidos totales en el agua del río Grande de Morelia. _____	60
Gráfica 15.- Concentraciones de los coliformes fecales en el agua del río Grande de Morelia. _____	61
Gráfica 16.- Concentraciones de calcio en el agua del río Grande de Morelia. _____	62
Gráfica 17.- Concentraciones de magnesio en el agua del río Grande de Morelia. _____	63
Gráfica 18.- Concentraciones de sodio en el agua del río Grande de Morelia. _____	63
Gráfica 19.- Concentraciones de los cloruros en el agua del río Grande de Morelia. _____	64
Gráfica 20.- Concentraciones de carbonatos en el agua del río Grande de Morelia. _____	65
Gráfica 21.- Concentraciones de bicarbonatos en el agua del río Grande de Morelia. _____	65
Gráfica 22.- Concentraciones de los sulfatos en el agua del río Grande de Morelia. _____	66
Gráfica 23.- Concentraciones de nitrógeno amoniacal en el agua del río Grande de Morelia. _____	67
Gráfica 24.- Concentraciones de hierro en el agua del río Grande de Morelia. _____	68
Gráfica 25.- Concentraciones de zinc en el agua del río Grande de Morelia. _____	69
Gráfica 26.- Concentraciones de cobre en el agua del río Grande de Morelia. _____	70
Gráfica 27.- Concentraciones de cadmio en el agua del río Grande de Morelia. _____	71
Gráfica 28.- Concentraciones de arsénico en el agua del río Grande de Morelia. _____	72
Gráfica 29.- Toxicidad de EC ₅₀ en el agua del río Grande de Morelia. _____	73
Gráfica 30.- Porcentaje de concentración de las especies predominantes de Fe (II) en el agua del río Grande de Morelia. _____	74
Gráfica 31.- Porcentajes de concentración de las especies predominantes de Fe (III) en el agua del río Grande de Morelia. _____	75
Gráfica 32.- Porcentaje de concentración de las especies predominantes de Zn en el agua del río Grande. _____	76
Gráfica 33.- Valor otorgado estadísticamente por el Minitab a cada variable creada. _____	77
Gráfica 34.- Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos, metales pesados y sitios, con respecto al primer y segundo componente. _____	77
Gráfica 35.- Comportamiento estadístico de los sitios en el análisis de componentes principales. _____	78
Gráfica 36.- Comportamiento estadístico de los parámetros fisicoquímicos y metales pesados en el análisis de componente principales. _____	79
Gráfica 37.- Análisis de una vía para la temperatura (°C) por muestreo. _____	80
Gráfica 38.- Análisis de una vía para el pH por muestreo. _____	80
Gráfica 39.- Análisis de una vía para la conductividad eléctrica ($\mu\text{s cm}^{-1}$) por muestreos. _____	80
Gráfica 40.- Análisis de una vía para oxígeno disuelto (mg L^{-1}) por muestreo. _____	81
Gráfica 41.- Análisis de una vía para sólidos disueltos totales (mg L^{-1}) por muestreo. _____	81
Gráfica 42.- Análisis de una vía para la DQO (mg L^{-1}) por muestreo. _____	83
Gráfica 43.- Análisis de una vía para la DBO ₅ (mg L^{-1}) por muestreo. _____	83

Gráfica 44.- Análisis de una vía para la dureza total (mg L^{-1}) por muestreo. _____	83
Gráfica 45.- Análisis de una vía para la alcalinidad total (mg L^{-1}) por muestreo. _____	84
Gráfica 46.- Análisis de una vía para el calcio (mg L^{-1}) por muestreo. _____	84
Gráfica 47.- Análisis de una vía para el magnesio (mg L^{-1}) por muestreo. _____	84
Gráfica 48.- Análisis de una vía para el sodio (mg L^{-1}) por muestreo. _____	85
Gráfica 49.- Análisis de una vía para los sulfatos (mg L^{-1}) por muestreo. _____	85
Gráfica 50.- Análisis de una vía para los bicarbonatos (mg L^{-1}) por muestreo. _____	85
Gráfica 51.- Análisis de una vía para cloruros (mg L^{-1}) por muestreo. _____	86
Gráfica 52.- Análisis de una vía para el nitrógeno amoniacal (mg L^{-1}) por muestreo. _____	86
Gráfica 53.- Análisis de una vía para los sólidos sedimentables (mg L^{-1}) por muestreo. _____	86
Gráfica 54.- Análisis de una vía para los sólidos totales (mg L^{-1}) por muestreo. _____	87
Gráfica 55.- Análisis de una vía para los sólidos suspendidos totales (mg L^{-1}) por muestreo. _____	87
Gráfica 56.- Análisis de una vía para los coliformes fecales (mg L^{-1}) por muestreo. _____	87
Gráfica 57.- Análisis de una vía para el hierro (mg L^{-1}) por muestreo. _____	88
Gráfica 58.- Análisis de una vía para el zinc (mg L^{-1}) por muestreo. _____	88
Gráfica 59.- Análisis de una vía para el arsénico (mg L^{-1}) por muestreo. _____	89
Gráfica 60.- Comportamiento del pH promedio en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	92
Gráfica 61.- Concentraciones de hierro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	94
Gráfica 62.- Concentraciones de zinc en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	95
Gráfica 63.- Concentraciones de níquel en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	96
Gráfica 64.- Concentración de cobre en los sedimentos en el río Grande de Morelia. _____	97
Gráfica 65.- Concentraciones de plomo en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	98
Gráfica 66.- Concentraciones de cadmio en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	99
Gráfica 67.- Concentraciones de cromo en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	100
Gráfica 68.- Concentraciones de arsénico en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	101
Gráfica 69.- Análisis de una vía para hierro (mg L^{-1}) por muestreo. _____	102
Gráfica 70.- Análisis de una vía para el zinc (mg L^{-1}) por muestreo. _____	102
Gráfica 71.- Análisis de una vía para el níquel (mg L^{-1}) por muestreo. _____	102
Gráfica 72.- Análisis de una vía para cobre (mg L^{-1}) por muestreo. _____	103
Gráfica 73.- Análisis de una vía para el plomo (mg L^{-1}) por muestreo. _____	103
Gráfica 74.- Análisis de una vía para el arsénico (mg L^{-1}) por muestreo. _____	103

Gráfica 75.- Fracciones geoquímica del hierro en lo sedimentos del río Grande de Morelia. _____	105
Gráfica 76.- Concentraciones de hierro en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	106
Gráfica 77.- Fracciones geoquímicas del zinc en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	108
Gráfica 78.- Concentraciones de zinc en la fracción cuatro de los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	109
Gráfica 79.- Fracciones geoquímicas de níquel en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	111
Gráfica 80.- Concentraciones de níquel en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	112
Gráfica 81.- Fracciones geoquímicas de cobre en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	114
Gráfica 82.- Concentraciones de cobre en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	115
Gráfica 83.- Fracciones geoquímicas de plomo en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	117
Gráfica 84.- Concentraciones de plomo en la fracción cuatro de los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	118
Gráfica 85.- Fracciones geoquímicas de cadmio en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	120
Gráfica 86.- Concentraciones de cadmio en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	121
Gráfica 87.- Fracciones geoquímicas de cromo en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	123
Gráfica 88.- Concentraciones de cromo en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	124
Gráfica 89.- Fracciones geoquímicas de arsénico en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	126
Gráfica 90.- Concentraciones de arsénico en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia. _____	127

RESUMEN

El río Grande de Morelia es uno de los más importantes de la zona de Morelia ya que sus aguas son utilizadas para riego agrícola, el río desembocan en el lago de Cuitzeo en donde la principal actividad de las poblaciones asentadas a la orilla de éste es la pesca, por lo cual conocer la calidad de sus aguas y de sus sedimentos es de suma importancia.

De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo se realizaron cuatro muestreos, en doce sitios a lo largo del río Grande, en los que se tomaron muestras de agua y sedimento.

En las muestras de agua se realizaron análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados. El pH encontrado osciló entre siete y ocho, el O.D (Oxígeno Disuelto) presentó valores de 0.2 mg L^{-1} , la DQO (Demanda Química de Oxígeno) alcanzó el valor de 129.35 mg L^{-1} , las sales se presentaron en una alta proporción como Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , y con respecto a los metales pesados se analizaron nueve: Fe, Zn, Ni, Cu, Pb, Cd, Cr, Ag y As, de los cuales solo cinco fueron los que se detectaron: Fe, Zn, Cu, As y el Cd, este último solo se presentó en un sitio.

Todos los parámetros se analizaron conforme a la Normatividad Mexicana y a la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), también se compararon con los límites permisibles de las NOM-001-SEMARNAT-1996, la NOM-127-SSA1-1994 y la OMS (Organización Mundial de la Salud). El Fe y Zn presentaron las concentraciones más altas, para el Zn predominaron dos especies Zn^{2+} y ZnCO_3 , para el Fe (II) fue Fe^{2+} y para el Fe (III) la especie $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Se hizo la prueba de toxicidad presentándose las mayores en los sitios ubicados en la zona de Morelia.

El pH de los sedimentos osciló entre cinco y siete, el color predominante fue gris, el cual se debe a la materia orgánica, la textura fue franco limosa en la mayoría de los sitios. En los sedimentos se midieron nueve metales pesados donde se observó la presencia de la mayoría a excepción de la Ag. Se realizaron las fracciones geoquímicas en donde se encontraron los metales pesados más disponibles: Fe, Zn, Ni y Cd.

Los sitios que presentan mayor contaminación se localizan dentro de la zona de Morelia, debido a que aquí es donde se tiene la mayor variación de los parámetros fisicoquímicos. En cuanto a las concentraciones de los metales pesados en agua como en sedimentos se encontraron dentro de la normatividad.

Palabras claves: Metales pesados, límite permisible, calidad, toxicidad y fracciones geoquímicas.

ABSTRACT

The Rio Grande de Morelia is one of the most important places of Morelia because its waters are used for irrigation, the river flowing into the lake Cuitzeo where the main activity of the populations located at the edge of this is the fishing, so it is important to know the quality of its waters and sediments.

According to the above, in the present work four samplings were performed in twelve sites along the Rio Grande, where water and sediment samples were taken.

In the water samples were performed the physicochemical, bacteriological and heavy metals analysis. The pH found was between seven and eight, DO (Dissolved Oxygen) showed values of 0.2 mg L⁻¹, the COD (chemical oxygen demand) reached the value of 129.35 mg L⁻¹, the salts are presented in a high proportion as Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃, and with respect to the heavy metals analyzed nine: Fe, Zn, Ni, Cu, Pb, Cd, Cr, Ag and As, of which only five were those detected: Fe, Zn, Cu, As and Cd, the latter only be provided on a site.

All parameters were analyzed according to the Mexican Norms and the EPA (Environmental Protection Agency of the United States), also compared with the permissible limits of the NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-1994 and WHO (World Health Organization). The highest concentrations were present for the Fe and Zn, for the Zn predominates two species Zn²⁺ and ZnCO₃, for the Fe (II) was Fe²⁺ and Fe (III) species Fe(OH)₂. Toxicity test presented the highest concentrations at sites located in the area of Morelia

The pH of the sediments ranged between five and seven, the predominant color was gray which is due to organic matter, the texture was silt loam in most places. Nine heavy metals in sediment, where the majority is present except for the Ag were measured. Heavy metals more available were determined entirely by the geochemical fractions: Fe, Zn, Ni and Cd.

Sites that have higher pollution are located within the area of Morelia, because this is where it has the greatest variation of physico-chemical parameters. As for the concentrations of heavy metals in water and sediments were found within the regulations.

Keywords: Heavy metals, allowable limit, quality, toxicity and geochemical fractions.

INTRODUCCIÓN

Los ríos han sido utilizados como receptores de desechos urbanos, gracias a los volúmenes de agua que transportan y al movimiento de las mismas, son capaces en muchos casos de regenerarse por sí mismos, neutralizando los efectos de las grandes cantidades de aguas residuales industriales, domésticas, agrícolas, entre otras, que reciben. Sin embargo, con frecuencia las descargas de agua contaminada superan la capacidad de auto regeneración y los ríos se deterioran, lo cual conlleva a la pérdida del oxígeno disuelto (O.D), al aumento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), así como la modificación del pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza, sólidos disueltos y coliformes fecales, entre otros, que cambian la calidad del río, dando así la desaparición de especies, y como consecuencia la destrucción del ecosistema por la interrupción de las cadenas alimenticias (Mena, 2004).

En relación con la ciudad de Morelia, el crecimiento poblacional, industrial y agrícola ha ocasionado que el río Grande reciba gran cantidad de aguas residuales, teniendo en suspensión compuestos orgánicos como aceites, grasas, nutrientes y compuestos inorgánicos como carbonatos, cloruros, sulfatos y algunas sustancias tóxicas como el arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, zinc, entre otros; por lo tanto modifican las características del agua ocasionando que sean peligrosas para los diferentes usos a los que está destinada.

El río Grande es el principal de la zona, al salir de la ciudad de Morelia sus aguas riegan a los diferentes cultivos de los poblados cercanos a su rivera y su desembocadura se da en el segundo lago más grande de México, el lago de Cuitzeo, donde su principal actividad económica es la pesca; como se sabe gracias a varios estudios el río Grande presenta un grado de contaminación considerable, ya que sus aguas contienen diferentes compuestos que hacen peligroso su uso, entre ellos, metales pesados, que tienen una alta peligrosidad ya que son tóxicos para los seres vivos y no son biodegradables, por lo tanto, tiene una alta persistencia en las cadenas tróficas.

El presente estudio tiene como objetivo realizar la evaluación de la calidad de agua y sedimentos por medio de parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y así determinar la disponibilidad y la concentración de metales pesados para conocer el grado de contaminación del río Grande de Morelia. Con el fin tener un panorama del riesgo que represente la utilidad de esta agua para uso agrícola y para la calidad que le llega al lago de Cuitzeo, ya que de acuerdo a la bibliografía consultada no se encontraron registros sobre estudios de este río que incluyan todos estos parámetros, por lo que se pretende así obtener un mejor diagnóstico de la calidad del agua y los sedimentos del río en la actualidad.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades

1.1.1. Agua

El término agua es la denominación común que se aplica al estado líquido de la molécula compuesta de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno: H₂O. Hasta la última mitad del siglo XVIII se consideraba el agua como un elemento básico. Fue el químico francés Lavoisier quien, basándose en los experimentos del británico Henry Cavendish efectuados en 1781, llegó a la conclusión de que “el agua no era un elemento sino un compuesto de oxígeno y de hidrógeno” (Franquet, 2001).

El agua en estado puro tiene tres propiedades básicas: es incolora, inodora e insípida. Posee un tono azulado que únicamente puede apreciarse en capas de gran profundidad. Recordemos lo que dijo Yuri Gagarín, el astronauta ruso que fue el primer ser humano en ver la tierra desde el espacio: “Es azul, la tierra es azul”. La mayor parte de la superficie del planeta está cubierta de agua y desde el espacio, la tierra posee ese color característico. Otra de las propiedades del agua es su condición de disolvente universal, ya que todas las sustancias son, de alguna forma, solubles en ella. Así también es el compuesto principal de la materia viva. Sin agua la vida tal y como la conocemos, no es posible. Dentro de la masa de los organismos vivos su proporción constituye entre el 50 y el 90% (Franquet, 2001).

1.1.2. Distribución

En el planeta existe una cantidad considerable de agua estimada en 1.4×10^9 km³, sólo el 2.5% es agua dulce y la mayor parte de la misma se encuentra en forma de hielo o en depósitos subterráneos de difícil acceso (Figura 1). De esta manera, el agua disponible en teoría para las actividades humanas sería, en el mejor de los casos, del 0.01%. Además, esta mínima porción de agua frecuentemente se localiza en lugares inaccesibles o está contaminada, lo que dificulta su aprovechamiento (PNUMA, 2002).

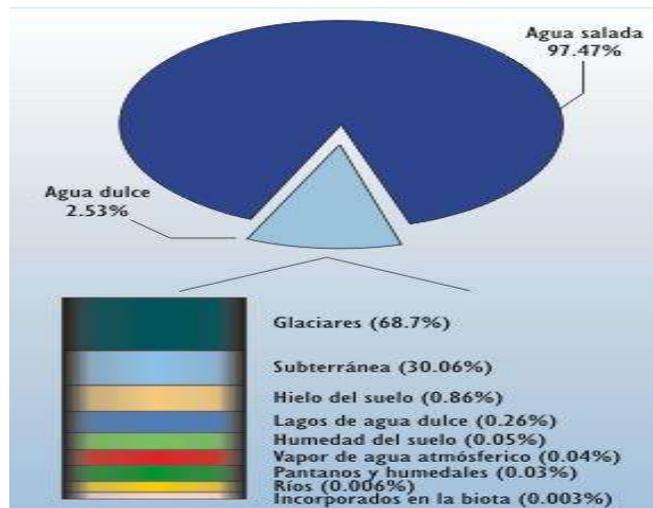


Figura 1.- Principales reservas hídricas en el mundo (PNUMA, 2002).

1.1.3. Ciclo hidrológico

La renovación natural del recurso se realiza a través del ciclo hidrológico (Figura 2). Por precipitación cae 28% del agua en la tierra y 72% en el mar. Del agua que cae en la tierra:

- 7% se percola a los acuíferos
- 8% va al mar por escurrimiento
- 13% restante, regresa a la atmósfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) y evapotranspiración (de la cubierta vegetal)

De tal manera que sólo 7% del agua de lluvia se recupera en los diversos cuerpos de agua para su posible empleo como agua dulce, mientras que 93% se pierde por medios físicos o biológicos (evapotranspiración) (Jiménez, 2001).

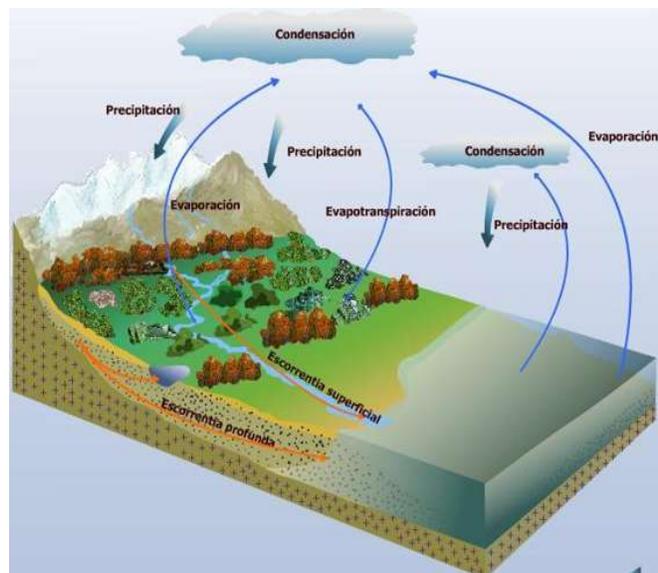


Figura 2.- Ciclo hidrológico (Universidad de Madrid, 2011).

1.1.4. Agua superficial

El agua superficial es la que se almacena o se encuentra fluyendo sobre la superficie de la tierra. El sistema de agua superficial interactúa continuamente con los sistemas de agua atmosférica y subsuperficial (Maidment *et al.*, 1994).

Los hábitats de agua dulce, convencionalmente pueden dividirse en tres grupos:

- Ecosistemas de agua estancada o lénticos (de lenis, “calma”): lagos y estanques.
- Ecosistemas de agua corriente o lóticos (de lotus, “lavado”): arroyos, ríos y manantiales.
- Humedales, donde el nivel del agua fluctúa hacia arriba y hacia abajo, a menudo según la estación y también anualmente: pantanos y marismas (Odum, 2006).

1.1.4.1. Ríos

Los ríos son los que llevan a los mares el exceso de las aguas superficiales, realizando así una función de drenaje. A causa de ello han sido definidos los ríos como líneas de drenaje natural. También puede decirse que un río es una corriente constante de agua (Marrero, 1996).

Todos hemos observado que, mientras llueve, las aguas se mueven libremente pendiente abajo, abriendo, algunas veces, surcos pequeños cuando se escurren sobre rocas no consolidadas. En las zonas altas estos surcos se hacen profundos, y algunos llegan a convertirse en ríos intermitentes, que corren durante las lluvias, y a los cuales se les da los nombres de torrentes y quebradas. Como el proceso de erosión se reproduce durante cada período de lluvias, algunos torrentes profundizan su cauce hasta alcanzar la zona de saturación permanente de las aguas subterráneas; al ser alimentados por éstas, los torrentes se convierten en constantes o ríos. Los ríos pequeños llevan sus aguas casi siempre a los ríos mayores, de los cuales son tributarios o afluentes; muchos ríos, que reciben el aporte de varios tributarios, son, a su vez, afluentes de otro río mayor, y así sucesivamente, hasta que las aguas de numerosos ríos grandes y pequeños llegan, por último, al mar (Marrero, 1996).

El conjunto de ríos que llevan sus aguas a un río mayor, que las transporta, finalmente, al mar, constituye una red fluvial o hidrológica, cuyo eje lo constituye el río principal. Su curso se prolonga desde su nacimiento hasta su desembocadura. El nacimiento del río es el punto más alto de su curso, mientras la desembocadura, que es el punto más bajo, puede corresponder al nivel del mar, a otro río del cual sea tributario el primero, o al de un lago (Marrero, 1996).

Los ríos son agentes activos del modelado de la superficie terrestre. No solo afectan el relieve de las regiones que atraviesan, sino que, al mismo tiempo, modifican sus propias características. Las etapas de este proceso corresponden a la juventud, la madurez y la vejez del río, coincidiendo con las transformaciones generales que abarca el ciclo geográfico. La juventud del río es una etapa de intensa erosión, la madurez es una etapa en la cual predomina el transporte y la vejez es una etapa de deposición (Marrero, 1996).

1.2. Contaminación del agua

1.2.1. Generalidades

El agua - a diferencia del aire - tiene una composición precisa (H_2O) y, por lo tanto, es fácil identificar los compuestos ajenos a ella. Sin embargo, la definición de cuáles son contaminantes es difícil. Es un hecho que el agua rara vez se encuentra en forma pura y, afortunadamente, para fines prácticos no se le requiere así o no importa el que contenga otros compuestos; todo depende del uso que se le dé (Jiménez, 2001).

En general, se considera como "contaminante" al exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del

agua. De esta forma, no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes. A pesar de la dificultad para definir la contaminación, es claro que ésta provoca el abatimiento o muerte de la flora y fauna, impide el uso del agua en industrias o ciudades y deteriora el medio ambiente e incluso, el paisaje (Jiménez, 2001).

Las fuentes de contaminación del agua son dos:

Fuentes naturales.- Dependiendo de los terrenos que atraviesa el agua puede contener componentes de origen natural procedentes del contacto con la atmósfera y el suelo (Ej. sales minerales, Ca, Mg, Fe, etc.). Aunque pueden ser nocivos para la salud, en general son sustancias que se pueden identificar fácilmente y eliminar.

Fuentes antropogénicas.- Producidas como consecuencia de las actividades humanas, como la agricultura, ganadería, la minería y el sector industrial; han provocado la presencia de ciertos componentes que son peligrosos para el medio ambiente y para los organismos y difíciles de eliminar.

El mayor consumo de agua se da en dos sectores específicamente, la agricultura y la industria, los cuales son los mayores contaminantes de aguas después le sigue el uso urbano y el uso doméstico (PNUMA, 2011)

Industria

El sector industrial utiliza cerca del 20% del agua extraída a nivel mundial, incluyendo el agua destinada a la generación de energía hidráulica y nuclear, energía termoeléctrica y procesos industriales. El volumen anual de agua utilizado por la industria se incrementará de los 752 km³ al año en 1995 a los 1 170 km³ al año en 2025, es decir, alrededor de un 24% del total de las extracciones de agua dulce(PNUMA, 2011).

La industria es uno de los mayores contaminantes de los recursos hídricos, anualmente vierte entre 3 x10⁸ y 5x10⁸ton de metales pesados, disolventes, lodos tóxicos y otros residuos. Estos contaminantes convierten el agua en no potable al tiempo que contaminan y matan la vida acuática. También existe el peligro de que el agua contaminada se transfiera a la cadena trófica mediante su uso en agricultura o por captación directa de las plantas o la vida animal (PNUMA, 2011).En los países en vías de desarrollo, el 70% de los residuos industriales se vierten a las aguas sin tratamiento alguno(PNUMA, 2011).

Agricultura

El sector de la agricultura es uno de los que más contaminación del agua produce. Los causantes de la contaminación son los fertilizantes y plaguicidas utilizados para la fertilidad de la tierra y para fumigar los cultivos de las plagas que disminuyen la

producción. Estos productos a través de las lluvias y de los riego contaminan las aguas superficiales y los acuíferos. De acuerdo a la Convención de Estocolmo sobre Contaminantes orgánicos persistentes, 9 de los 12 más peligrosos y persistentes compuestos orgánicos son plaguicidas.

Los fertilizantes fosforados pueden contener Zn, As, Cd y Pb debido a su presencia en la roca fosfórica, ya que ésta es la materia prima para la fabricación de este tipo de fertilizantes. El uso de ciertos plaguicidas ha contribuido a aumentar los niveles de As, Pb, Hg y Cu; algunos poseen concentraciones de Zn que pueden superar el 25%. También son utilizados fungicidas a base de Cu o de Zn, como el CuSO_4 . Los metales pesados también pueden estar presentes en estiércoles de animales (Zn y Cu) debido al uso de ciertos compuestos, que los contienen, en la dieta del animal para evitar ciertas enfermedades (Andrade, 2005).

Unos cien diversos herbicidas, fungicidas e insecticidas se utilizan en agricultura y horticultura moderna. Sin embargo, se ha estimado que menos del 1% de 2.5×10^6 ton aplicadas anualmente es absorbido por los organismos objetivos; el resto para a los organismos del suelo, agua, aire y otros. Los compuestos que no se degradan fácilmente se acumulan en estos medios y constituyen un riesgo para la salud (Andrade, 2005). En lugares donde se ha utilizado agua residual para el riego agrícola, se reporta una tendencia creciente en las concentraciones de metales pesados (Mancilla Villa, 2001).

1.2.2. Principales contaminantes del agua

Hay un gran número de contaminantes del agua que se pueden clasificar en los siguientes grupos (García, 2002):

- a) Microorganismos patógenos. Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, tifus, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. En los países en vías de desarrollo las enfermedades producidas por estos patógenos son uno de los motivos más importantes de muerte prematura, sobre todo de niños. Normalmente estos microbios llegan al agua en las heces y otros restos orgánicos que producen las personas infectadas. Por esto, un buen índice para medir la salubridad de las aguas, en lo que se refiere a estos microorganismos, es el número de bacterias coliformes presentes en el agua. La OMS recomienda que en el agua para beber haya cero colonias de coliformes por 100 mL de agua.
- b) Desechos orgánicos. Son el conjunto de residuos orgánicos producidos por los seres humanos, ganado, etc. Incluyen heces y otros materiales que pueden ser descompuestos por bacterias aeróbicas, es decir en procesos con consumo de oxígeno. Cuando este tipo de desechos se encuentran en exceso, la proliferación de bacterias agota el oxígeno, y ya no pueden vivir en estas aguas peces y otros seres vivos que necesitan oxígeno. Buenos índices para medir la contaminación por desechos orgánicos son la concentración de oxígeno disuelto (OD) en agua, o la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).

- c) Sustancias químicas inorgánicas. En este grupo están incluidos ácidos, sales y metales tóxicos como el Hg y el Pb. Pueden causar graves daños a los seres vivos, disminuir los rendimientos agrícolas y corroer los equipos que se usan para trabajar con el agua.
- d) Nutrientes vegetales inorgánicos. NO_3^- y PO_4^{3-} son sustancias solubles en agua que las plantas necesitan para su desarrollo, pero si se encuentran en cantidad excesiva inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable.
- e) Compuestos orgánicos. Muchas moléculas orgánicas como petróleo, gasolina, plásticos, plaguicidas, disolventes, detergentes, etc. acaban en el agua y permanecen, en algunos casos, largos períodos de tiempo, porque, al ser productos fabricados por el hombre, tienen estructuras moleculares complejas difíciles de degradar por los microorganismos.
- f) Sedimentos y materiales suspendidos. Muchas partículas arrancadas del suelo y arrastradas a las aguas, junto con otros materiales que hay en suspensión en las aguas, son, en términos de masa total, la mayor fuente de contaminación del agua. La turbidez que provocan en el agua dificulta la vida de algunos organismos, y los sedimentos que se van acumulando destruyen sitios de alimentación o desove de los peces, rellenan lagos o pantanos y obstruyen canales, rías y puertos.
- g) Sustancias radiactivas. Isótopos radiactivos solubles pueden estar presentes en el agua y, a veces, se pueden ir acumulando a lo largo de las cadenas tróficas, alcanzando concentraciones considerablemente más altas en algunos tejidos vivos que las que tenían en el agua.
- h) Contaminación térmica. El agua caliente liberada por centrales de energía o procesos industriales eleva, en ocasiones, la temperatura de ríos o embalses con lo que disminuye su capacidad de contener oxígeno y afecta a la vida de los organismos. (García, 2002).

Existen instituciones en México que vigilan el agua limpia federal y el abastecimiento de agua potable, colaboran en el diseño y funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales y participan en los esfuerzos dirigidos a la prevención de la contaminación protegiendo líneas divisorias de las aguas y las fuentes del agua potable (Jiménez, 2001).

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y la NOM-127-SSA1-1994, establece los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

1.3. Contaminación de sedimentos

Los sedimentos son arena, arcilla, limo y otras partículas sueltas del suelo que se depositan en el fondo de una masa de agua. Pueden provenir de la erosión del suelo o de la descomposición de plantas y animales. El viento, el agua y el hielo pueden transportar estas partículas hasta los ríos, lagos y arroyos.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) considera a los sedimentos como los contaminantes más comunes en ríos, arroyos, lagos y embalses.

Aunque la agricultura contribuye en muchas formas a deteriorar la calidad del agua, la sedimentación y erosión antropogénica es un problema mundial que suele estar especialmente asociado a la agricultura. Si bien no hay cifras mundiales, es probable que la agricultura, en sentido amplio, sea la causante de gran parte del aporte mundial de sedimentos a los ríos, lagos, estuarios y, finalmente, a los océanos mundiales.

La contaminación provocada por los sedimentos tiene dos dimensiones principales:

Contaminación física, la cual produce en las aguas receptoras los siguientes efectos principales: altos niveles de turbidez, que limitan la penetración de la luz solar en la columna de agua, lo que limita o impide el crecimiento de las algas y de las plantas acuáticas enraizadas. En los ríos que son zonas de desove, los lechos de grava están cubiertos por sedimentos finos que impiden o dificultan el desove de los peces. En ambos casos, el resultado es la perturbación del ecosistema acuático debido a la destrucción del hábitat. A pesar de estos efectos nocivos, el estado hipertrófico (rico en nutrientes) de muchos lagos de aguas poco profundas, sobre todo en los países en desarrollo, daría lugar a un inmenso crecimiento de las algas y plantas enraizadas si no fuera por el efecto limitador de la extinción de la luz debido a la fuerte turbidez. En este sentido, la turbidez puede ser "beneficiosa" en los lagos eutróficos; no obstante, muchos países reconocen que esta situación es perjudicial por razones estéticas y económicas y están buscando los medios de reducir la turbidez y los niveles de nutrientes.

Los altos niveles de sedimentación en los ríos dan lugar a la perturbación física de las características hidráulicas del cauce. Ello puede tener graves efectos en la navegación, por la reducción de la profundidad, y favorecer las inundaciones, por la reducción de la capacidad del flujo de agua en la cuenca de drenaje. Los sedimentos proceden en gran parte de la rápida erosión de las subcuencas como consecuencia de prácticas agrícolas poco acertadas (FAO, 1994).

Contaminación química, la cual está vinculada al tamaño de las partículas de los sedimentos y al volumen del carbono orgánico en partículas asociado con los sedimentos. Se suele considerar que la fracción químicamente activa de un sedimento es la que mide menos de 63 μm (limo + arcilla). En el caso del fósforo (P) y los metales, el tamaño de las partículas es de importancia decisiva, debido a la gran superficie externa de las partículas muy pequeñas. El P y los metales suelen tener fuerte atracción a los lugares de intercambio de iones, que están asociados con las

partículas de arcilla y con los recubrimientos de Fe y Mn que se dan normalmente en estas partículas pequeñas. Muchos de los contaminantes persistentes, bioacumulados y tóxicos, especialmente los compuestos clorados incluidos en muchos plaguicidas, están fuertemente asociados con los sedimentos y en especial con el carbono orgánico transportado como parte de la carga de sedimentos de los ríos (Peluso, 2011).

En los ambientes acuáticos el material particulado transporta los compuestos químicos desde la columna de agua hacia los sedimentos de fondo (Mackay, 2001), de esta forma las concentraciones de contaminantes en el sedimento superan a las de la fracción disuelta, tanto para el caso de los metales pesados, como para compuestos orgánicos (Horowitz, 1986; Bilos *et al.*, 1998; Verrengia Guerrero *et al.*, 2003; Bartlett *et al.*, 2004). En el caso particular de los metales pesados, las concentraciones en sedimentos pueden ser entre tres a seis órdenes de magnitud a las correspondientes a la columna de agua del sitio (Horowitz, 1986; Bryan & Langston, 1992).

La granulometría del material (tamaño de grano), es un factor importante en la capacidad de retención de los metales. Existe una fuerte correlación positiva entre la disminución del tamaño de grano y la concentración de metales (Horowitz, 1986). Esta correlación se debe tanto a factores físicos como mineralógicos (composicionales). Las partículas de arcillas (< 2 a 4 μm) poseen una elevada área específica, determinando reacciones de superficie que favorecen las interacciones de metales con el sedimento. Como consecuencia los sedimentos de grano fino son importantes sumideros de algunos constituyentes inorgánicos (Peluso, 2011).

Los metales en sedimentos pueden estar complejados como carbonatos o aluminosilicatos, adsorbidos a óxidos de hierro y manganeso, o formando complejos orgánicos. El pH y el potencial "redox" juegan un rol importante en las asociaciones de los metales con los óxidos. Por ejemplo, a valores de pH bajos los metales son desplazados de los óxidos por los iones hidrógeno (Trivedi *et al.*, 2000). Algunos procesos químicos que determinan la biodisponibilidad de los metales en los sedimentos están controlados directa o indirectamente por el nivel de oxígeno de la matriz. En sedimentos de fondo aeróbicos, la presencia de hidróxidos de hierro, manganeso, aluminio y el carbono orgánico tienden a disminuir la biodisponibilidad de metales (Bendell-Young *et al.*, 1994; Simpson *et al.*, 2002, Camilion *et al.*, 2003). Se encontraron correlaciones negativas entre el contenido de carbono orgánico en el sedimento, los efectos tóxicos y la bioacumulación de metales en organismos expuestos. Ello muestra una disminución de la fracción de metal disponible para el ingreso a los organismos (Besser *et al.*, 2003; Gorski *et al.*, 2008).

En sedimentos anóxicos, la biodisponibilidad de algunos metales (Cd, Cr, Ni, Pb y Zn), estaría regulada por la concentración de sulfuros (Di Toro *et al.*, 1992; Chapman *et al.*, 1998), la presencia de cantidades lo suficientemente elevadas promueven la formación de sulfuros metálicos, de muy baja solubilidad. Consecuentemente, los niveles de metales disueltos en el agua intersticial se mantienen bajos, disminuyendo así su disponibilidad (Di Toro *et al.*, 1990; Berry *et al.*, 1996). De esta manera, el

tratamiento de los sedimentos con ácidos débiles permite la formación de sulfuros ácidos volátiles (AVS) y la extracción simultánea de metales (SEM), parámetros utilizados como una medida de biodisponibilidad. Di Toro *et al.* (1992), argumentan que para valores de SEM/AVS menores a uno, los metales precipitan como sulfuros, disminuyendo su potencial tóxico para las especies bentónicas. Sin embargo, este cociente no puede ser utilizado como herramienta general para predecir toxicidad de otros metales, además de los cinco antes mencionados, para los cuales este criterio fue desarrollado (Long *et al.*, 1998).

La mayoría de los autores consideran que no se puede utilizar sólo este enfoque para predecir la toxicidad de metales en sedimentos, sin tener en cuenta a la complejación de metales con otros componentes de la matriz, como por ejemplo carbono orgánico y óxidos de Fe y Mn. A su vez, se deben considerar otras rutas de exposición a los metales además de la fase disuelta (agua intersticial). Por ejemplo, Lee *et al.* (2000), estudiando la biodisponibilidad de metales sobre varias especies observaron que estaría influenciada en mayor medida por la ingesta de la fase particulada.

De acuerdo con estudios realizados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2002), los sedimentos contaminados pueden causar problemas letales o subletales en el bentos y otros organismos asociados a éstos. Por esto la protección de la calidad de los sedimentos es una parte importante en la conservación de la integridad biológica de cuerpos de agua, así como para proteger la vida acuática, silvestre y la salud humana. Los sedimentos son un componente integral de los ecosistemas acuáticos, que provee hábitat, alimentación y áreas de reproducción y cría de muchos organismos acuáticos (Villalobos, 2010).

Algunos contaminantes en los sedimentos son tomados por los organismos bénticos, dando como resultado la bioacumulación. Cuando es grande, en el caso de estos organismos contaminados, las toxinas se acumulan en sus cuerpos, llevando el contaminante a la cadena alimenticia en concentraciones de aumento en un proceso conocido como biomagnificación. Consecuentemente, los peces, los crustáceos, aves acuáticas, y los mamíferos de agua dulce y marina, así como organismos bénticos, son afectados por los sedimentos contaminados (EPA, 2002).

La especie que no puede tolerar los contaminantes tóxicos en algunos sedimentos muere simplemente, reduciendo la biodiversidad. Los animales que sobreviven a la exposición con sedimentos contaminados pueden desarrollar problemas como la putrefacción de aletas, aparición de tumores, y efectos reproductivos. Cuando existe la bioacumulación de los contaminantes en truchas, salmones, patos, y otras fuentes de alimento, se produce una amenaza a la salud humana. Los efectos posibles a largo plazo después de ingerir pescados contaminados incluyen el cáncer y defectos neurológicos (EPA, 2002)

Los sedimentos contaminados no permanecen siempre en el fondo de un cuerpo del agua. La agitación en la superficie del agua, tal como un propulsor de un barco o una tormenta, puede suspender de nuevo algunas partículas. La resuspensión puede ocasionar que todos los organismos en el agua, y no sólo los del fondo, queden expuestos directamente a los contaminantes tóxicos (Adame y Salin, 1993).

En México no existen todavía normas que regulen los contaminantes en los sedimentos, pero en otros países como Canadá y Holanda ya cuentan con estas.

1.4. Parámetros a evaluar

1.4.1. Parámetros fisicoquímicos

Color: Son lo que se denomina propiedades organolépticas o determinables por los sentidos. No suelen ser una medida precisa del nivel de contaminación, aunque su presencia es un indicio de que la depuración de un efluente no está siendo correcta. Tiene gran importancia en aguas potables, por el rechazo que puede darse en el consumidor al detectar colores, olores o sabores que no asocie con “agua pura”.

Temperatura.-Las temperaturas elevadas en el agua son indicadores de actividad biológica, química y física en el agua, lo anterior tiene influencia en los tratamientos y abastecimientos para el agua, así como en la evaluación limnológica de un cuerpo de agua, por lo que es necesario medir la temperatura como un indicador de la presencia de compuestos y contaminantes en el agua (NMX-AA-007-SCFI-2000).

El valor de temperatura es un criterio de calidad del agua para la protección de la vida acuática y para las fuentes de abastecimiento de agua potable, es también un parámetro establecido como límite máximo permitido en las descargas de aguas residuales y una especificación de importancia en los cálculos de balance de energía y de calor de los procesos industriales (NMX-AA-007-SCFI-2000).

pH.-El pH depende de las especies químicas presentes y las reacciones que se llevan a cabo entre ellas y con el agua. El pH es una de las variables que más influyen en la solubilización de los metales. Debido a que la actividad fotosintética demanda un consumo grande de CO_2 por las algas, el uso del carbono a partir del HCO_3^- y la producción de OH^- hacen que se obtengan intervalos de pH altos en los cuerpos de agua. El desarrollo de un pH alto hace que la actividad bacteriana disminuya, se reduce la producción de CO_2 y se limita el proceso simbiótico.

El pH influye en la estabilidad de los metales modificando la movilidad química. Por ejemplo, la solubilidad de Cd, Pb, Cu y Zn aumenta al disminuir el pH. El intercambio catiónico y la formación de complejos con materia orgánica se favorecen bajo condiciones ácidas, mientras que un pH básico promueve mecanismos como la adsorción y precipitación (Alfaro, 2010).

Otras reacciones importantes son las que involucran la precipitación con carbonatos. La estabilidad relativa de los minerales de carbonatos es $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Pb, Cu, Ni y Zn son cationes bivalentes, los cuales son solubles bajo condiciones ácidas. Estos

metales forman complejos con CO_3^{2-} , S^{2-} , Cl^- y O^{2-} , tienen una fuerte afinidad por la materia orgánica. En ambientes básicos, el As es soluble bajo condiciones redox debido a la disolución de los óxidos de Fe (Mattiuzzo *et al.*, 2007).

Conductividad eléctrica.-La conductividad eléctrica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en disolución (NMX-AA-093-SCFI-2000). La determinación de conductividad eléctrica es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso (NMX-AA-093-SCFI-2000).

Oxígeno disuelto (OD).-Los niveles de oxígeno disuelto (OD) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas dependen de las actividades químicas, físicas y bioquímicas en los cuerpos de agua (NMX-AA-012-SCFI-2001), como la carga orgánica, la temperatura, la radiación solar, la fotosíntesis, el grado de mezcla y la reaireación superficial. La concentración de OD es un parámetro importante para la calidad del agua. Sirve como indicador del efecto producido por los contaminantes oxidables, de la aptitud del agua para mantener vivos peces u otros organismos aerobios y de la capacidad depuradora de un cuerpo receptor. En el agua, el oxígeno disuelto afecta principalmente las reacciones en las que participan el Fe, Mn, Cu y los compuestos que contienen N y S (Alfaro, 2010).

Demanda química de oxígeno (DQO).- Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO), la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte (NMX-AA-030-SCFI-2001). Aunque este parámetro no está en la NOM-001-SEMARNAT-1996, es importante tomarlo en cuenta, ya que bajo las condiciones de oxidación se abarca un mayor espectro de componentes químicos, especialmente en ciertas muestras con sustancias tóxicas o inhibitorias, en donde la determinación de la DQO puede ser el único método para establecer los niveles de carga orgánica, ya que este parámetro se basa en una reacción que no es influenciada por la variabilidad biológica, por lo que determina tanto compuesto biodegradables como no biodegradables, incluyendo sustancias recalcitrantes o muy lentamente biodegradables; además, no presenta interferencias por amonio u otras sustancias nitrogenadas (Alfaro, 2010).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).-La DBO es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua. Este método se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 293 K (20 °C) (NMX-AA-028-SCFI-2001).

La DBO es el resultado de tres tipos de materiales: materiales orgánicos utilizables como fuente de alimentación por organismos aerobios, nitrógeno oxidable derivado de la presencia de compuestos orgánicos nitrogenados que son nutrientes para bacterias específicas y compuestos químicos reductores como Fe_2^{2+} , SO_3^{2-} y S^{2-} que se oxidan en presencia del OD (Barceló, 2000; Alfaro, 2010).

Dureza total.- La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de Ca^{2+} y Mg^{2+} . La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor. El término dureza se aplicó en principio por representar al agua en la que era difícil (duro) de lavar y se refiere al consumo de jabón para lavado, en la mayoría de las aguas alcalinas esta necesidad de consumo de jabón está directamente relacionada con el contenido de calcio y magnesio (NMX-AA-072-SCFI-2001). El contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} en el agua subterránea se debe al contacto de ésta con depósitos de dolomitas, yesos, calizas, etc. El grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales metálicas presentes en el agua (Manahan, 2001; Alfaro, 2010).

Alcalinidad.- La alcalinidad se refiere a la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis generan el ion hidroxilo (OH^-), como son las bases fuertes, y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos; contribuyen también en forma importante a la alcalinidad los CO_3^{2-} y PO_4^{3-} . La presencia de BO_3^{3-} y SiO_4^{4-} en concentraciones altas también contribuyen a la alcalinidad del medio (NMX-AA-036-SCFI-2001). Se le conoce también como una medida de la capacidad de un agua para neutralizar un ácido fuerte. En el agua natural esta capacidad se puede atribuir a bases como el HCO_3^- , el CO_3 y el OH^- (Manahan, 2001; Alfaro, 2010).

1.4.2. Parámetros bacteriológicos

La presencia y extensión de contaminación fecal es un factor importante en la determinación de la calidad de un cuerpo de agua. Las heces contienen una variedad de microorganismos y formas de resistencia de los mismos, involucrando organismos patógenos, los cuales son un riesgo para la salud pública al estar en contacto con el ser humano. El examen de muestras de agua para determinar la presencia de microorganismos del grupo coliforme que habitan normalmente en el intestino humano y de otros animales de sangre caliente, da una indicación. Dada la limitada capacidad de algunos miembros del grupo de organismos coliformes para sobrevivir en agua; sus números también pueden emplearse para estimar el grado de contaminación fecal reciente y constante (NMX -AA-42-SCFI-1987).

1.4.3. Constituyentes mayores

En los sistemas acuáticos se disuelven numerosas sales y sustancias de acuerdo a sus solubilidades. La presencia en el terreno de diferentes materiales y estructuras geológicas son fuente de una gran variedad de iones disueltos en aguas superficiales, los que nos permitirían saber, qué tipo de suelo atraviesa un cauce de agua. Algunos de estos iones se encuentran en forma mayoritaria, respecto a los demás elementos en todas las aguas continentales: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , mientras que otros se hallan a niveles de trazas, como es el caso de los metales pesados, siendo algunos de ellos necesarios para el correcto desarrollo de los microorganismos, plantas y animales.

Cloruros (Cl).-El cloro es un elemento electronegativo, es uno de los aniones inorgánicos presentes en las aguas naturales, siendo uno de los iones que se encuentran en mayor concentración en el agua de mar. Está ampliamente distribuido en la naturaleza, principalmente formando el NaCl. También pueden encontrarse depósitos en la superficie originados por la evaporación del agua de antiguos océanos (Sierra *et al*, 2007).

Sulfatos (SO_4^{2-}).- Corresponden a sales de moderadamente solubles a muy solubles. Las aguas dulces contienen de 2 a 150mg L⁻¹ y el agua de mar cerca de 3000mg L⁻¹. Aunque en agua pura se satura a unos 1500mg L⁻¹, como SO_4Ca , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad (Rigola, 1990).

Proceden de rocas sedimentarias, sobretodo yeso y anhidrita, y en menor proporción de la oxidación de los sulfuros de la pirita. En función del contenido de Ca^{2+} , podrían impartirle un carácter ácido al agua. Los $CaSO_4$ y $MgSO_4$ contribuyen a la dureza del agua y constituyen la dureza permanente. El $MgSO_4$ confiere al agua un sabor amargo. Cuando el sulfato se encuentra en concentraciones excesivas en el agua ácida, le confiere propiedades corrosivas.

Nitrógeno como nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) y amonio (NH_4^+).- Forma sales solubles y bastante estables, aunque en medio reductor pueden predominar NO_2^- , N, o NH_3 . Las aguas normales contienen menos de 10mg L⁻¹, y el agua de mar hasta 1mg L⁻¹, pero las aguas contaminadas, principalmente por fertilizantes, pueden llegar a varios centenares de mg L⁻¹. Concentraciones altas si se ingieren puede ser la causa de cianosis infantil. Se elimina por intercambio iónico, pero no es un método económico en los procesos de potabilización en grandes volúmenes. Su presencia en las aguas superficiales, conjuntamente con PO_4^{3-} , determinan la eutrofización, que se caracteriza por un excesivo crecimiento de algas (Rigola, 1990).

Bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}).- Existe una estrecha relación entre los iones bicarbonato y carbonato con el CO_2 gas y el CO_2 disuelto. A su vez el equilibrio está afectado por el pH. Estos iones contribuyen fundamentalmente a la alcalinidad del agua. Los carbonatos precipitan fácilmente en presencia de Ca^{2+} . Las aguas dulces suelen contener entre 50 y 350 mg L⁻¹ de HCO_3^- y si el pH es inferior a 8.3 no hay prácticamente HCO_3^- (Rigola, 1990).

Calcio (Ca^{2+}).- Suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de CO_3^{2-} (calcita, aragonita y dolomita) o SO_4^{2-} (yeso y anhidrita).

Generalmente está presente en el agua como una sal ya sea como CO_3^{2-} o SO_4^{2-} , que originan la dureza del agua. Una de las manifestaciones más comunes de la dureza del agua son los "grumos" insolubles que se forman por la reacción del jabón con Ca^{2+} y Mg^{2+} (Manahan, 2007).

La concentración de Ca varía ampliamente en las aguas subterráneas. Concentraciones entre 10 y 250 mg L⁻¹ son frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg L⁻¹, y en salmueras hasta 50000 mg L⁻¹.

Magnesio (Mg²⁺).-Menos abundante que el Ca en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomitas y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. La solubilidad de la magnesita (MgCO₃) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la del CaCO₃ por lo que, en condiciones normales, el MgCO₃ no precipita directamente de la disolución de modo que, para un periodo dilatado de tiempo, puede producirse cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos.

Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de Mg en aguas subterráneas. En ellas, el Mg es retenido con preferencia al Ca en suelos y rocas. En aguas naturales el contenido de Mg no suele sobrepasar los 40 mg L⁻¹. En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg L⁻¹ y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg L⁻¹ (Cuéllar *et al.*, 2012).

Sodio (Na⁺).- El sodio es liberado por la meteorización de SiO₄⁴⁻ tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante de Na la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar (Cuéllar *et al.*, 2012).

Las sales de Na son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del Ca. Sin embargo, el Na puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de intercambio catiónico y puede ser intercambiado con Ca provocando una disminución de la dureza de las aguas. La presencia de Na en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120 000 mg L⁻¹ en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 ó 150 mg L⁻¹ en aguas dulces normales.

1.4.4. Metales

Los metales son componentes naturales de la tierra y se encuentran con mayor frecuencia en distintos minerales en combinación con otros elementos. En consecuencia, son parte inherente a nuestro ambiente. Existen en los ecosistemas de la geosfera o litosfera; la atmósfera y la biosfera (Alfaro, 2010).

Un metal es un elemento que es buen conductor de la electricidad, es flexible y posee brillo. Algunos metales son necesarios para los seres vivos, pero pueden llegar a ser tóxicos si rebasan ciertas concentraciones, a éstos últimos se les llama con frecuencia "metales pesados" (Jiménez, 2001). En química, se considera metal pesado, aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5 g cm⁻³ cuando esté en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (Pérez, 2005), pero en ciencias ambientales se consideran metales pesados todos aquellos que son tóxicos.

Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

Oligoelementos o micronutrientes que son los requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital; algunos forman parte de sistemas enzimáticos, como el Co, Zn, Mo, o como el Fe que forma parte de la hemoglobina. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones. Dentro de este grupo están: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn. Estos elementos minoritarios se encuentran en bajas concentraciones en el suelo y agua, pero al llegar a ciertas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos para los organismos (Pérez, 2005).

Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el metabolismo de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb y U. Estos son los metales tóxicos cuya presencia en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas.

La toxicidad de estos metales se debe a su capacidad de combinarse con una gran variedad de moléculas orgánicas, pero la reactividad de cada metal es diferente y consecuentemente lo es su acción tóxica esto se observa en el Cuadro 1 (Pérez, 2005).

Cuadro 1.- Efectos positivos y negativos de los metales (Carazo *et al.*, 2005)

Efectos negativos	Efectos positivos
Toxicidad en dosis elevadas: Inhiben los sistemas enzimáticos provocando daños en el funcionamiento del organismo (Pb); en muy pequeñas concentraciones ejercen efectos letales (As, Hg).	Son necesarios en dosis pequeñas para un correcto funcionamiento de los organismos (Co, Cu, Fe, Zn).
Se acumulan a lo largo de las cadenas tróficas (Pb, Cu, Zn, Cd, Co, Hg, Fe).	Son beneficiosos para el tratamiento de aguas (por el efecto letal que causan en las bacterias)
La mayoría son cancerígenos.	Son útiles para la preparación de artículos antisépticos.
Algunos son teratógenos: (Cr, Cd, Pb, Hg).	Tiene muy diversos usos como por ejemplo: Cr: metalurgia, materiales refractarios, pinturas, conservación de madera. Pb: baterías, gasolinas, soldadura pintura Zn: aleaciones, cosméticos, productos agrícolas.

Existen metales de mayor importancia en el agua, en la que se encuentran en forma iónica, y los clasifican en prioritarios y no prioritarios, según la EPA:

En 1997, la ATDSR publicó la lista de las sustancias más peligrosas existentes en el mundo (275 sustancias orgánicas e inorgánicas), cinco metales pesados fueron publicados dentro de los 20 primeros elementos en cuanto a toxicidad y peligrosidad los cuales fueron: As, Pb, Hg, Cd y Cr, los cuales ocupan respectivamente los puestos 1°, 2°, 3°, 7° y 18° (ASTDR y EPA, 2005).

Arsénico (As)

El arsénico está ampliamente distribuido por toda la corteza terrestre y se utiliza comercialmente en agentes aleadores. Se presenta en el agua procedente de la disolución de minerales y menas, efluentes industriales y el lavado de la atmósfera. En algunas zonas, como resultado de la composición geológica, las concentraciones que existen naturalmente en el agua subterránea son elevadas. Como ejemplo, en México el As se encuentra en forma natural en los acuíferos de la comarca lagunera (estados de Coahuila y Durango) en concentraciones que exceden 15 veces los valores recomendados por la OMS afectando a una población de 400 000 campesinos. En el agua potable rara vez se encuentran más de 10 mg L⁻¹ de As, aunque se han reportado valores de hasta 100 mg L⁻¹. El valor guía recomienda por la OMS (1995) es de 0.01 mg L⁻¹ (Jiménez, 2011)

El As es un metaloide de color gris y aspecto metálico. Los compuestos de mayor importancia son: el trióxido de As (As₂O₃ o As banco), el NaAsO₂, el verde París (mezcla de compuesto de As y Cu), el ácido cacodílico y el ácido metarsenico. A bajas concentraciones, el As es acumulado por el organismo y los efectos que produce no permiten identificar fácilmente el origen del problema. De acuerdo con la OMS, 50 µg As L⁻¹ no tiene efecto en la salud y el riesgo de cáncer es incierto. En poblaciones que consumen agua con altas concentraciones de arsénico se ha observado una incidencia relativamente elevada de cáncer que aumenta con la dosis y edad.

Exposiciones crónicas provocan daños cardíacos, por ingestión, causa dolor abdominal, vómito, disminución del apetito, debilidad, diarrea y estreñimiento alternados, neuritis, dermatitis y caída del pelo. Una dosis de 5 a 50mg de trióxido de As es tóxica y 120mg causan la muerte. Las formas solubles del As son el ion arsenito (AsO₂³⁻) y el arsenato (AsO₄³⁻). En presencia de oxígeno disuelto, el arsénico es oxidado a arsenato, que es removido por precipitación con ferrisulfuro o mediante la complejación con metales pesados polivalentes, (Jiménez, 2001). La EPA estableció el nivel permisible de arsénico en el agua de bebida a 10 µg L⁻¹ (nivel máximo contaminante) (EPA, 2006).

Cadmio (Cd)

El cadmio es un metal que se encuentra en depósitos naturales como ciertos minerales (EPA, 2001). Se emplea en aleaciones con Al, Cu, Ni, Au, Ag, Bi y Zn para facilitar su fundición, las fábricas de electrodos en baterías alcalinas, en los reactores para atrapar neutrones, en amalgamas dentales, en la manufactura de lámparas fluorescentes, semiconductores, plásticos, fotoceldas y joyerías, así como en la industria automovilística. El Cd se introduce en los cultivos por el riego con agua contaminada y por el empleo de tubería y tanques de almacenamiento galvanizado con Zn. Hay una presencia difusa del elemento debido a los fertilizantes y a la contaminación local del aire. Los alimentos son la principal fuente de exposición cotidiana al cadmio (Jiménez, 2001). Se ha establecido un valor guía para el agua de consumo humano de 0.003 mg L^{-1} (OMS, 1995).

El Cd es un elemento sumamente tóxico que ataca principalmente a los riñones, destruye el tejido testicular y los glóbulos rojos. La absorción de los compuestos del cadmio depende de su solubilidad. Este elemento se acumula principalmente en los riñones y tiene una vida media biológicamente prolongada de 10 a 35 años en los seres humanos (Jiménez, 2001).

Cobre (Cu)

El Cu es un metal que se encuentra naturalmente en rocas, suelo, agua y aire. Es un elemento esencial para plantas y animales (incluso seres humanos). Se utiliza para fabricar alambres, cañerías, láminas, monedas, fertilizantes fosfatados, para tratar enfermedades de las plantas, como el moho, para tratar agua, y como preservativos para alimentos, cueros y telas (Lenntech, 2005).

El Cu es liberado al ambiente a través de la industria minera, actividades agrícolas y de manufactura y por la liberación de aguas residuales a ríos y lagos. También es emitido desde fuentes naturales como por ejemplo volcanes, vegetación en descomposición e incendios forestales. Dicho elemento se adhiere a partículas de materia orgánica, arcilla, tierra o arena (ATSDR, 2005).

La concentración de Cu en el agua para beber es por lo general baja (de sólo algunos $\mu\text{g L}^{-1}$, pero la existencia de tuberías de este elemento pueden aumentarla hasta varios miligramos por litro tras un periodo de retención. Dado que aún persiste la incertidumbre sobre la toxicidad del Cu para los seres humanos, el valor guía se considera provisional e igual a 2 mg L^{-1} (OMS, 1995).

Cromo (Cr)

El Cr está ampliamente distribuido en la corteza terrestre con valencias de 2+, 3+ y 6+. Las concentraciones totales en el agua para beber son habitualmente inferiores a $2 \mu\text{g L}^{-1}$, aunque se han notificado concentraciones de hasta $120 \mu\text{g L}^{-1}$. En general, los alimentos parecen ser la principal fuente de la ingesta de este elemento. Las principales fuentes de Cr en el agua son la industria de cromado (CrO_3), el empleo de

conexiones cromadas en circuitos de enfriamiento de agua y de acondicionamiento de aire, el agua de torres de enfriamiento a las que se añade cromo para evitar la corrosión y los catalizadores de síntesis orgánica y en fotografía. Aunque cuando se sabe que el cromo inhalado provoca cáncer, el efecto por su consumo es aún desconocido.

La toxicidad del Cr es función de su estado de oxidación: el Cr (III) no es tóxico, el hexavalente sí lo es. El Cr (III) rara vez se presenta en agua potable; desafortunadamente, en el agua clorada o aireada es el Cr(VI) la forma predominante. La absorción de cromo tras la exposición por vía oral es relativamente baja y depende del estado de oxidación. El Cr (VI) se absorbe más fácilmente a través del tracto gastrointestinal que el Cr (III) y puede atravesar las membranas celulares.

Al principio se consideró que debían determinarse valores guía distintos para el Cr (III) y Cr (VI). Sin embargo, los actuales métodos de análisis favorecen el establecimiento de un solo valor guía como Cr total. De acuerdo con la OMS (1995), son escasos los datos relacionados con los efectos sobre la salud a bajas concentraciones, por lo que el valor guía de $50 \mu\text{g L}^{-1}$ fijado en 1970 en Europa, sigue siendo utilizado.

Hierro (Fe)

El Fe es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Se encuentra en corrientes naturales de agua en concentraciones que varían de 0.5 a 50 mg L^{-1} .

El Fe en el agua no presenta problemas graves de toxicidad. Pero en concentraciones superiores a 0.3 mg L^{-1} le imparte un color amarillento y a partir de 1 mg L^{-1} genera un sabor amargo y astringente. El Fe tiñe de color café a los textiles, la plomería y las paredes. La precipitación del exceso de Fe produce lo que se conoce como herrumbre, que es de color pardo rojizo. Cuando hay más de 0.1 mg L^{-1} , se deposita y para concentraciones de más de 0.3 mg L^{-1} , provoca el aumento de los costos de mantenimiento. La OMS no estableció un valor guía de Fe para agua potable (Jiménez, 2001).

Níquel (Ni)

El Ni es un elemento abundante, es un metal duro, blanco-plateado que se encuentra en todos los suelos y es liberado por emisiones volcánicas. El Ni también se encuentra en meteoritos y en el suelo de los océanos y puede combinarse con otros metales, tales como el Fe, Cu, Cr y Zn para formar aleaciones. Estas aleaciones se usan para fabricar monedas, joyas y artículos tales como válvulas e intercambiadores de calor. La mayor parte del Ni se usa para fabricar acero inoxidable. También puede combinarse con otros elementos, como por ejemplo Cl, S y O. Muchos de estos compuestos son empleados para colorear cerámicas, para fabricar baterías y como catalizadores (ATSDR, 2005).

El Ni entra al medio ambiente cuando es liberado a la atmosfera por plantas que queman petróleo o carbón, y por incineradores de basura. En el aire, se adhiere a pequeñas partículas de polvo que se depositan en el suelo o son removidas del aire en la lluvia o la nieve; esto generalmente toma varios días. El Ni liberado en desagües industriales termina en el suelo o en el sedimento, en donde se adhiere fuertemente a partículas que contienen hierro o manganeso. El Ni no parece acumularse en peces o en otros animales usados como alimentos (ATSDR, 2005).

En cuanto a los seres humanos, estos pueden estar expuestos al ingerir alimentos contaminados con Ni, lo que representa la fuente de exposición más importante para la mayoría de la gente (ATSDR,2005). Pero cabe destacar que el Ni metálico es carcinogénico y que los compuestos de níquel son sustancias reconocidas como carcinogénicas (Costa y Klein, 1999).

Plata (Ag)

La Ag está presente en la naturaleza principalmente en forma de S^{2-} y O^{2-} , insolubles y estables. La Ag se emplea en aleaciones con Cu, Al, Cd, Pb y Sb, para joyería, ornamentos, platos e instrumentos científicos. La Ag se usa en fotografía y como bactericida para esterilizar el agua, jugos, frutas y vinagre, así como en amalgamas dentales y en reacciones químicas (síntesis de aldehídos). Los compuestos de Ag son empleados en la industria del vidrio y porcelana y para la elaboración de espejos. Algunos de sus compuestos se usan en medicina como antisépticos o astringentes y en el tratamiento de ciertas enfermedades, sobre todo en medicina veterinaria (Jiménez, 2001).

La Ag a veces se encuentra en aguas subterráneas y superficiales en concentraciones superiores a $5 \mu\text{g L}^{-1}$. Cuando se utiliza para la desinfección alcanza concentraciones de más de $50 \mu\text{g L}^{-1}$. En esos casos pueden tolerarse concentraciones más altas de hasta 0.1mg L^{-1} , de acuerdo con la OMS (1995). La Ag no es un elemento particularmente tóxico y parece que el organismo absorbe sólo una fracción relativamente pequeña de la ingerida. Sin embargo, la ingestión de 1 g de plata produce una decoloración azul-gris de la piel, los ojos y las membranas mucosas. Se puede consumir una dosis de 10mgL^{-1} durante toda la vida o 50mg L^{-1} durante 27 años sin llegar a acumular 1 g. se han observado efectos tóxicos en peces a partir de 0.17mg L^{-1} . (Jiménez, 2001).

Plomo (Pb)

El Pb es un metal pesado, de baja temperatura de fusión, de color gris azulado que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre. Sin embargo, raramente está en la naturaleza en la forma de metal, generalmente se encuentra combinado con otros dos o más elementos formando compuesto de Pb. Comúnmente se utiliza en la elaboración de cañerías, baterías, proyectiles y municiones, revestimientos de cables y láminas usadas para protegernos de la radiación, así como en baterías para automóviles y otros vehículos. El Pb puede entrar al ambiente a través de liberaciones

desde minas de Pb y otros metales, y desde fábricas que manufacturan o usan plomos, aleaciones de Pb o compuesto de petróleo. Pueden producir malformaciones en animales cuando éstos se han encontrado expuesto a dicho metal por un largo periodo de tiempo (ATSDR, 2005).

Los compuestos de plomo se usan como pigmentos en pinturas, en barnices para cerámicas y en materiales de relleno. La cantidad de Pb que se usa en estos productos se ha reducido en los últimos años para minimizar sus efectos nocivos del Pb sobre los seres humanos y los animales (EPA, 2006). En el agua de lluvia se puede encontrar Pb por arrastre de contaminantes atmosféricos y en el agua para beber por disolución de la tubería con el agua es suave y ácida. Las fuentes comunes de ingestión del Pb son la comida, el aire, el humo de tabaco y el empleo de losa de barro vidriado. En zonas de alta densidad automovilística, el agua de lluvia puede contener hasta 40 mg L⁻¹ y a bruma 300 mg L⁻¹ (Jiménez, 2001).

1.4.5. Mecanismos de reacción

En los cuerpos lóaticos y lénticos, los metales pesados se pueden encontrar disueltos en el agua en tres distintas formas: coloidal, partículas minerales y cationes o iones complejos. Las formas coloidales dan lugar a los hidróxidos; las partículas minerales se refieren a todas aquellas partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el agua y por último se encuentran las fases disueltas (cationes o iones complejos) las cuales son captadas tanto por los organismos como por arcillas, y está última fase es la que ocasiona la fijación del metal en el tejido orgánico, debido a la biodisponibilidad que presenta el metal en forma de catión, provocando que el metal interfiera en funciones básicas del organismo (Botello *et al.*, 1996; Higuera y Oyarzun, 20006).

Las vías de transporte por las que los organismos acuáticos incorporan metales pesados son a través de la columna de agua y el alimento ingerido. Una vez que se encuentran dentro del organismo sustituyen algunas funciones de éste como la inactivación de las enzimas ya que se unen a los grupos sulfhidrilos (-SH), también se enlazan a los grupos carboxilos (-COOH) y aminos (-NH₂) de las proteínas (Botello *et al.*, 1996), razón por la cual no son química o biológicamente degradables. Estos contaminantes no sólo se acumulan sino que además resultan a menudo magnificados biológicamente a medida que circulan por los ciclos biogeoquímicos y a lo largo de las cadenas de alimentos (ODum, 1971; Lockwood, 1976; Albert, 1999).

1.4.6. Disponibilidad

Los metales se encuentran distribuidos en la biota por diferentes afinidades ácido-base, por su cinética y su distribución espacial y temporal. Un aspecto importante en la toxicología de los metales es la combinación química de los metales y los ligandos (ácidos y base de Lewis) en los organismos. Las bases celulares casi siempre están formadas por grupos donadores de azufre, nitrógeno y oxígeno.

El comportamiento químico de cualquier elemento en el ambiente depende de la naturaleza de sus compuestos y especies. Los efectos fisiológicos, ecológicos y toxicológicos de un metal tienen en su mayoría una estructura específica; esto es que

depende de la especie que forma. De esta manera, por ejemplo, el efecto del Cu en el crecimiento de las algas depende de si el Cu(II) está presente como ion libre Cu^{2+} , o como carbonato o como un complejo orgánico. Los organismos unicelulares adquieren un especial interés ya que están en contacto directo con el medio acuático, separados de éste solamente por una membrana (Stumm y Morgan, 1996; Manahan, 2001).

La dependencia de la toxicidad o la disponibilidad de los iones metálicos en solución sobre los organismos acuáticos pueden ser un fenómeno complejo. La existencia de tal dependencia permite predecir los cambios en la respuesta de un organismo a un metal en particular a través del conocimiento de las variaciones en la química del agua del metal. Variables tales como las concentraciones totales del metal en estudio, pH, alcalinidad, concentración de los quelantes naturales, concentración de los metales en competencia y presencia de superficies adsorbentes pueden afectar la concentración de los iones metálicos y así modificar la respuesta del organismo.

La interface agua-sólido, estabilizada en su mayoría por las partículas en el agua natural y suelo, juega un papel determinante en la regulación de las concentraciones de la mayoría de los elementos traza disueltos y en el acoplamiento de varios ciclos hidrogeoquímicos. Generalmente, las concentraciones de la mayoría de los elementos traza son mucho mayores en las fases sólida o superficial que en el agua. Así, la capacidad de las partículas de capturar elementos traza debe considerarse adicionalmente al efecto de la formación de complejos, lo que influye en la especiación de los metales traza.

Las partículas en los sistemas naturales están caracterizadas por una gran diversidad de minerales, incluyendo arcillas y partículas orgánicas, organismos, residuos biológicos, humus, macromoléculas y partículas inorgánicas cubiertas con materia orgánica (Stumm y Morgan, 1996; Manahan, 2001).

La disponibilidad se define como el grado en el cual un elemento o una molécula pueden transportarse en un organismo. La transferencia de una toxina en un organismo puede ocurrir a través de la difusión por la membrana de la célula. El ion libre metálico es tóxico, aunque también las formas fácilmente intercambiables en los sedimentos pueden ser dañinas dependiendo de la especie presente. Con respecto a la disponibilidad, de los metales en las fracciones fácilmente extraídas son los más importantes porque son más disponibles y son potencialmente peligrosos para la biota. Sin embargo, se debe determinar las concentraciones en todas las fases minerales para cualquier predicción a largo plazo del comportamiento de los metales y del As en sedimentos porque los cambios en las condiciones ambientales y/o fisicoquímicas (ej. Recubrimiento de sedimento, la resuspensión de material por las tormentas, etc.) pueden alterar la estabilidad mineral (Price y Pichler, 2005).

1.4.7. Toxicidad

La difusión de metales en el ambiente asegura que una proporción significativa de la población se encuentra expuesta a estos contaminantes (Adriano, 2001). La rápida y continua detección de la toxicidad medio ambiental causada por materiales peligrosos es de gran importancia para la conservación de los ecosistemas y la salud pública.

Los ensayos de biotoxicidad han adoptado una importancia creciente en la evaluación de la toxicidad potencial de muestras medioambientales, puesto que son rápidos y no necesitan la completa caracterización química de las mismas (Boluda *et al.*, 2002). Sin embargo, muchas veces resulta necesario combinar los ensayos ecotoxicológicos y químicos para evaluar dicha toxicidad potencial y establecer su naturaleza.

Estos ensayos aspiran a la predicción realista del comportamiento de sustancias tóxicas e el ambiente. Es razonable investigar si los bioensayos de ecotoxicidad proporcionan una importante información por la cual puede reconocerse el posible riesgo potencial de una muestra medioambiental (Boluda *et al.*, 2002).

Los ensayos de ecotoxicidad se utilizan normalmente para detectar efectos agudos o crónicos de sustancias en organismos representativos, especialmente acuáticos, como bacterias marinas luminiscentes (*Vibrio fischeri*), pulgadas de agua (*Daphnia magna*) o algas (*Zooglea sp.*) (Boluda *et al.*, 2002).

Dichos ensayos, en bacterias y otros microorganismos tienen la ventaja de que presentan rutas bioquímicas similares a las de los organismos superiores, ciclos de vida cortos y además responden rápidamente a los cambios en el medio ambiente.

La toxicidad es una medida usada que permite conocer el grado de tóxico de algunos elementos. La toxicidad en agua se determina mediante un bioensayo utilizando un equipo conocido como Microtox®. Este ensayo es una prueba que emplea una bacteria marina, *Vibrio fischeri* conocida anteriormente como *Photobacterium phosphoreum*, usada para evaluar la toxicidad de agua, suelos, lodos, sedimentos de agua dulce, marina y estuarios (Perri, 1997; Lau y Chu, 2001; Castro *et al.*, 2002). Cuando hay sustancias tóxicas presentes en la muestra, éstas interfieren en el sistema enzimático de la bacteria (enzima luciferasa) y esto disminuye la bioluminiscencia de la bacteria.

Se conoce como bioluminiscencia a la producción de la luz de ciertos organismos vivos. Es un fenómeno extendido en todos los niveles biológicos: bacterias, hongos, protista unicelulares, celentéreos, gusanos, moluscos, cefalópodos, crustáceos, insectos, equinodermos, peces. La producción de bioluminiscencia en los animales es un proceso químico complejo en el que la oxidación de un sustrato de proteína luciferina es catalizada por la enzima luciferasa. La luciferina acompañada de la enzima luciferasa, la molécula energética ATP y el oxígeno genera la luz bioluminiscente. La combinación entre la luciferina y el oxígeno provoca la oxidación de la luciferina dando lugar a la oxiluciferina. Esta reacción necesita del ATP para generar moléculas de oxiluciferina en estado excitado. Posteriormente, los átomos de

oxiluciferina vuelven a su estado fundamental generando luz visible. Esta reacción se produciría en todos los casos sin la necesidad de la presencia de la luciferasa; sin embargo, en el mundo animal la bioluminiscencia debe producirse en cuestión de segundos ya que en la mayoría de casos se usa como sistema de defensa. Por esa razón se requiere la enzima luciferasa que hace que la reacción sea mucho más rápida. Como la cantidad de luz es proporcional a la concentración de sustancias tóxicas presentes, la toxicidad relativa de la muestra puede ser calculada a traves de EC_{50} (concentración efectiva que causa una disminución de la luz en 50%).

El sistema Microtox® es un bioensayo que examina la toxicidad aguda de muestras medioambientales y compuestos puros basándose en la reducción de la bioluminiscencia natural de la bacteria marina *Vibrio fischeri* en presencia de agentes contaminantes. La toxicidad se expresa como la concentración de agente que produce la reducción del 50% de la luminiscencia inicial (EC_{50}).

El ensayo Microtox® es ampliamente utilizado por sus bondades en cuanto a sensibilidad, poder discriminante, reproducibilidad y fácil aplicación para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, resulta más rápido y barato que otros ensayos biológicos (Onorati *et al.*, 2004). Aunque el Microtox® se aplicó inicialmente para determinar la toxicidad aguda del agua natural y residuales también es aplicable tanto a muestras sólidas (sedimentos y suelos) como a sus extractos acuosos.

Los ensayos de toxicidad aguda utilizando bacterias han adquirido gran importancia en los últimos años no sólo por las características mencionadas anteriormente, sino también debido a la correlación existente entre los resultados obtenidos a través de estos ensayos y los bioensayos convencionales de amplia utilización. Así, para muchos compuestos y muestras, los datos de toxicidad obtenidos con el ensayo Microtox® se corresponden bien con las toxicidades agudas obtenidas con los ensayos de toxicidad en *Vibrio fischeri* puede aplicarse para predecir toxicidad para otros organismos acuáticos (Arufe *et al.*, 2004).

El bioensayo bacteriano Microtox®, diseñado por Strategic Diagnostic Inc. (Azur Environmental) se basa en monitorear los cambios en las emisiones de luz natural de una bacteria luminiscente, *Vibrio fischeri* (*Photobacterium phosphoreum*).

Vibrio fischeri es una bacteria gram negativa, anaerobia facultativa, de la familia Vibrionaceae cuya característica más representativa es la bioluminiscencia. Es importante destacar la estabilidad en la emisión de luz así como la gran sensibilidad que presenta a una amplia variedad de sustancias tóxicas. En presencia de agentes contaminantes, la bioluminiscencia natural de *Vibrio fischeri* disminuye y la toxicidad se expresa como concentración efectiva 50 (EC_{50}): concentración del agente contaminante que produce una reducción del 50% en la emisión de luz inicial (Onorati *et al.*, 2004).

La finalidad de la prueba es determinar en 15 minutos la EC_{50} , cuando la concentración del extracto causa una reducción del 50% en la emisión de luz de las bacterias (DOF, 1995; Lau y Chu, 2001).

1.5. El agua en México

Anualmente México recibe del orden de $1.489 \times 10^{12} m^3$ de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73.1 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1 % se escurre por los ríos o arroyos y el 4.8 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Anualmente el país cuenta con $460 \times 10^6 m^3$ de agua renovable (INEGI, 2013).

La precipitación anual del país en el periodo de 1971a 2000 fue de 760 mm. Los valores normales, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en el año 2009 la precipitación alcanzó un valor de 649 mm, lo cual fue 14.6% inferior al periodo antes mencionado. En México, el 68% de la precipitación mensual ocurre entre junio y septiembre.

Al igual que en el resto del mundo, la distribución es irregular y se centra principalmente en el sur en las cuencas de los ríos Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Pánuco y Balsas durante una estación de pocos meses. En el Norte y altiplano central, regiones que representan más de la mitad del territorio nacional, se registra casi el 20% del escurrimiento medio anual y es allí donde se encuentran las dos terceras partes de la población, la mayor parte de la industria y las zonas agrícolas. Así, aun cuando el balance global del país es positivo, los balances regionales en casi la mitad del territorio muestran un déficit considerable. Tal es el caso de las regiones de Baja California, el río Bravo, el río Lerma y el valle de México, lo cual se observa en la Figura 3 (Jiménez, 2001).

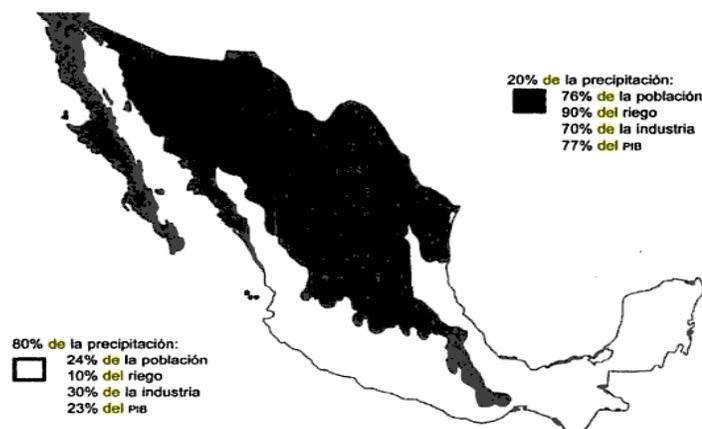


Figura 3.-Distribución del agua Nacional (Jiménez, 2011).

1.5.1. Uso del agua en México

La mayor cantidad de agua que se utiliza en México se va al sector agrícola con un valor de 76.6%, y solo un 14.1% al abastecimiento público, para la industria se destina un 4.1% y al sector de energía eléctrica excluyendo la hidroelectricidad un 5.1%. En lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas que se representan un uso no consuntivo

del recurso, se utilizaron en el país $1.361 \times 10^{11} \text{m}^3$ de agua en el 2009 (Figura 4 y Cuadro 2). Debe aclararse que para este uso la misma agua se turbinada y se contabiliza varias veces, en todas las centrales del país (CNA, 2011).

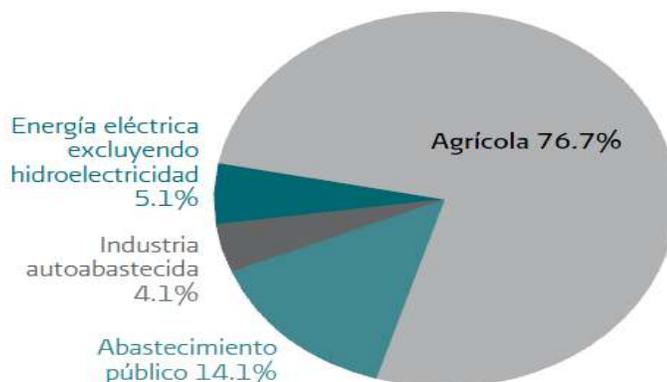


Figura 4.-Distribución del uso del agua en México (CNA, 2011).

Cuadro 2.- Consumo de agua superficial y subterránea de casa uso (CNA,2011).

Uso	Origen		Volumen total (km ³)	Extracción %
	Superficie (km ³)	Subterráneo (km ³)		
Agrícola	40.9	20.9	61.8	76.7
Abastecimiento público	4.3	7.1	11.4	14.1
Industria	1.6	1.7	3.3	4.1
Autoabastecida Energía eléctrica (excluyendo hidroelectricidad)	3.6	0.4	4.1	5.1
Total	50.5	30.1	80.6	100.0

1.5.2. Uso del agua en Michoacán

En el Estado de Michoacán el uso del agua es en orden de importancia con 87.95% agrícola, 5.4% público urbano y 3.7% industrial. El resto que corresponde a un 3% se reparte entre los usos pecuario y múltiple. El 77.64% del volumen total concesionado es de fuentes superficiales y el 22.36% subterráneo. Las cuencas Tepalcatepec, la 12-P Ciénega de Chapala y la 12-R lago de Cuitzeo, son principalmente utilizadas para abasto por aguas subterráneas, en tanto por fuentes superficiales se utilizan las cuencas 18-K río Tepalcatepec, la 18-I río Cupatitzio y la 18-G río Cutzamala ordenadas de mayor a menor volumen (CONAGUA, 2009).

En el Estado de Michoacán, las medidas normativas para preservar los recursos hídricos y el entorno ecológico, se observan en la Constitución Política del Estado de Michoacán de Ocampo, la Ley del Agua y Gestión de cuencas, reglamento de la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental del Estado de Michoacano de Ocampo y la Ley de Desarrollo Forestal del Estado. (Molina,2011)

1.5.3. Hidrología de la zona de Morelia

Morelia se ubica en la Región Hidrográfica No. 12, conocida como Lerma – Santiago, particularmente en el distrito de riego Morelia – Queréndaro. Forma parte de la cuenca del lago de Cuitzeo. Sus principales ríos son el Grande y el Chiquito. Estos dos ríos llegaron a rodear la ciudad hasta mediados del siglo XX. El río Grande fue canalizado a finales del siglo XX debido a los frecuentes desbordamientos. El cual tiene su origen en el municipio de Pátzcuaro y tiene un trayecto de 26 km por el municipio de Morelia y desemboca en el lago de Cuitzeo (el segundo más grande del país). Los principales escurrimientos que alimentan a este río son el arroyo de Lagunillas, los arroyos de Tirio y la barranca de San Pedro.

2. ANTECEDENTES

Mejía (1987), realizó el “Estudio de Calidad del Agua del Río Grande de Morelia”, en la Unidad de calidad del Agua, de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) Delegación Estatal en Michoacán, en los años 1986 y 1987, donde se identifican las principales fuentes de contaminación, los índices de calidad del agua, se determina también la capacidad de asimilación y dilución del cauce.

Ferreira (1995), realizó el “Estudio de la Calidad el Agua en base a bacterias coliformes en la presa la Mintzita y el Río Grande de Morelia”, en el cual tomó siete puntos a lo largo del río en los cuales utilizó criterios bacteriológicos y los fisicoquímicos del agua, se obtuvo que el lugar de mejor calidad es el manantial de la Mintzita y los demás puntos presentaron un calidad no muy buena ya que se recomienda solo para uso de riego condicionando a ciertos cultivos, como frutales.

Solórzano (1998), evaluó la calidad del agua en el Estado de Michoacán en el periodo 1986-1995. Analizó los diferentes cuerpos de agua en el Estado realizando estudio de los parámetros fisicoquímicos, entre ellos el río Grande el cual llega a la conclusión de que es el cuerpo de agua más contaminado de todas las estaciones encontrándose en el rango de inaceptable para el uso destinado actualmente (riego agrícola), donde se establecieron los valores más altos de C.E, SDT, O.D, Cl⁻, coliformes totales y fecales.

Figuroa (2001), realizó el estudio de calidad del agua de la presa la Mintzita Michoacán. Evaluó parámetros fisicoquímicos y obtuvo que el agua de la presa no es apta para el consumo humano ya que presenta un alto contenido de coliformes totales y fecales, menciona que el cuerpo de acuerdo a los resultados va de oligotrófico a eutrófico.

Ábrego (2005), determinó los parámetros de calidad del agua en el escurrimiento del río Grande de Morelia. Evaluó once puntos a lo largo de la mancha urbana determinando parámetros como temperatura, pH, C.E y SDT, los cuales presentaron valores altos demostrando una alta contaminación del río Grande.

Alfaro (2010), realizó el estudio de la movilidad y toxicidad de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del lago de Cuitzeo, Michoacán, en el cual tomó ocho puntos dentro del lago, dos en la desembocadura del río Grande con el lago y dos en la parte final de río. Determinó que las concentraciones más elevadas de Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V y Zn se encontraron en la desembocadura del río Grande.

3. JUSTIFICACIÓN

El río Grande de Morelia en los años 80's y principio de los 90's presentaba una calidadbuena de agua, la cual hacía que preservara la vida acuática, entre la fauna que se encontraban era la *hubbsina turneri*, *skiffia bilineata*, *skiffia multipunctata* y *menidia charari* (De la Vega, 2005), con respecto a la flora abundaba el lirio acuático, pastos sumergidos, nenúfar, cola de zorra, tule, carrizo, entre otros (Chávez y Guevara, 2003), pero a principios de los 90's tanto la población como la industria comenzaron a tener un gran crecimiento, con lo cual inició el aumento de la contaminación en el río provocando la desaparición de la flora y fauna de este, teniendo los últimos registros en el año de 1940, debido a esto su calidad fue disminuyendo al crecer las descargas residuales domésticas, agrícolas e industriales y se convirtió en el principal receptor de éstas.

Este problema no solo se basa en que el río Grande presenta un gran deterioro de su calidad sino que sus aguas son utilizadas para riego de los cultivosagrícolas que se ubican en la planicie fluviolacustre al sur del lago de Cuitzeo y así como su desembocadura en éste, donde su principal actividad económica es la pesca, además los productos agropecuarios de esta zona son consumidos y no se tiene alguna restricción o sugerencias sobre la utilización de esta agua.

Los estudios que se le han realizado al agua del río Grande en años anteriores no son completos, ya que solo se basan en ciertos parámetros fisicoquímicos los cuales dan indicios para determinar el grado de contaminación,pero hasta ahora no se han buscado sustancias tóxicas como los metales pesados, por lo que en el presente estudio se realizan análisis delos parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, metales pesados, toxicidad y especiación química, para así establecer un diagnóstico actualizado de la calidad del agua y sedimentos en el río Grande.

4. HIPÓTESIS

El río Grande de Morelia presenta una alta contaminación en agua y sedimentos debido principalmente a la presencia de metales pesados disponibles para ingresar a la cadena trófica.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Determinar la calidad de agua y sedimento en el río Grande de Morelia.

5.2. Objetivos específicos

1. Realizar la caracterización fisicoquímica, bacteriológica y de metales pesados en agua y sedimentos.
2. Modelar la especiación y disponibilidad química de los metales pesados predominantes en agua y sedimentos.
3. Determinar los niveles de toxicidad del agua.

6. ZONA DE ESTUDIO

Localización

Se encuentra entre los paralelos 19° 52' y 19° 26' N; los meridianos 101° 02' y 101° 31' W; a una altitud entre 1500 y 1800 m. Colinda al norte con los municipios de Huaniqueo, Chucándiro, Copándaro y Tarímbaro; al este con los municipios de Tarímbaro, Charo, Tzitzio y Madero; al sur municipios de Huiramba, Lagunillas, Tsintzuntzan, Quiroga, Coeneo y Huanique. Ocupa el 2.04% de la superficie del estado. Cuenta con 207 localidades y una población total de 684 145 habitantes (INEGI, 2009).

Fisiografía

La superficie es muy accidentada, ya que se encuentra sobre el Eje Neovolcánico Transversal, que atraviesa el centro del país, de este a oeste. Se encuentran tres sistemas montañosos: por el este diversas montañas que forman la sierra de Oztumatlán y las cuales se extienden desde el norte hacia el suroeste, destacando el cerro de "El Zacatón" (2960 m), el cerro "Zurumutal" (2840 m), el cerro "Peña Blanca" (2760 msnm) y el "Punhuato" (2320 m), que marca el límite oriental de la ciudad de Morelia, así como el cerro "Azul" (2625 m) y el cerro "Verde" (2600 m) un poco más hacia el sureste.

Clima

Rango de temperatura: 12 a 22°C. Rango de precipitación: 600 a 1500 mm. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (74.67%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (23.98%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.65%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.395) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (0.31%) (INEGI, 2009).

Hidrografía

Se ubica en la región hidrográfica número 12, conocida como Lerma-Santiago, particularmente en el Distrito de Riego Morelia-Queréndaro. Forma parte de la cuenca del lago de Cuitzeo. Sus principales ríos son el Grande y el Chiquito. El río Grande tiene su origen en el municipio de Pátzcuaro y tiene un trayecto de 26 km por el municipio de Morelia (atraviesa la cabecera municipal), y desemboca en el lago de Cuitzeo (el segundo más grande del país). Los principales escurrimientos que alimentan a este río son el arroyo de Lagunillas, los arroyos de Tirio y la barranca de San Pedro. El río Chiquito, con 25 km de longitud, es el principal afluente del Grande y se origina en los montes de la Lobera y la Lechuguilla, y se une posteriormente con los arroyos la Cuadrilla, Agua Escondida, el Salitre, el Peral, Bello y el Carindapaz.

Con relación a los cuerpos de agua se tienen la presa de Umécuaro y de la Loma Caliente, así como la presa de Cointzio, las más importante del municipio, con una capacidad de $7.92 \times 10^{10} \text{m}^3$. Otro recurso importante de abastecimiento de agua son los manantiales, destacando por su aprovechamiento el manantial de la Mintzita, utilizado para el abastecimiento de agua potable para importante parte de la población de la ciudad de Morelia, así como para usos industriales. También son importantes los manantiales de aguas termales que son aprovechados como balnearios, figurando Cointzio, El Ejido, El Edén y Las Garzas.

Uso del suelo y vegetación

Cuenta con diez tipos de vegetación o agrupaciones vegetales primarias, además se tienen extensiones de uso agrícola y pastizales, que se desarrollan sobre áreas alteradas por el hombre y los animales domésticos, generalmente a partir del bosque de encino o del matorral subtropical que fueron expuestos a un pastoreo intenso, las cuales son:

- Mezquital (mezquite, huisache, maguey). Se ubica en la zona norte del municipio.
- Matorral subtropical (nogalillo, colorín, casahuate, parotilla, yuca, zapote prieto, puchote).
- Selva media caducifolia (aguacatillo, laurel, ajunco, atuto, escobetilla, saiba).
- Selva baja caducifolia (copal, papelillo, tepehuaje, anona, sacalosúchitl). En la zona sur del municipio.
- Bosque de encino (encino, acacia, madroño). Este tipo de vegetación se localiza en la falda de los cerros, entre los 2000 y 2400 m de altitud alrededor del valle de Morelia.
- Bosque de pino (pino pseudostrobus, pino michoacano, pino moctezuma, pino teocote). Ubicado en las zonas frías y montañosas del municipio, entre 2200 y 3000 m.
- Bosque de pino-encino. Localizado en la zona sur, suroeste y noreste.
- Bosque de galería (ahuehuete, fresno, aile, sauce). Esta agrupación vegetal se encuentra en estado de extinción.
- Bosque mesófilo de montaña (moralillo, alie, jaboncillo, fresno, garrapato, pinabete). Bosque de oyamel (oyamel o pinabete).

Los principales usos que se le da al suelo son:

- Agrícola
- Pastizal
- Superficie municipal
- Industrial
- Otros

Uso potencial de la tierra

Agrícola: Agricultura mecanizada continua (16.38%), Agricultura de tracción animal continua (26.94%), agricultura de tracción animal estacional (14.75%), Agricultura manual continua (20.19%), Agricultura manual estacional (4.95%), No aptas para la agricultura (16.79%).

En el ciclo de primavera se manejan generalmente los cultivos de ajonjolí, algodón, arroz, avena forrajera, cártamo, cebada, frijol, garbanzo, maíz, sorgo, soya y trigo; en el ciclo otoño invierno los cultivos más importantes son el maíz, trigo y sorgo. Otros cultivos que se dan, chile, jitomate, pera, durazno, zanahoria y aguacate (García, 2000).

Pecuario: Desarrollo de praderas cultivadas (16.38%), para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (66.73%), para el aprovechamiento de la vegetación natural únicamente por el ganado caprino (7.07%) y no aptas para uso pecuario (9.82%) (INEGI, 2009).

7. METODOLOGÍA

7.1 Selección de los puntos de muestreo

Se seleccionaron 12 sitios de muestreo, los cuales se ubicaron con apoyo de un geoposicionador GPS 72 (GARMIN). La ubicación de la zona de estudio y la de los puntos de muestreo se aprecian en la Figura 5 y en el Cuadro 3. Estos sitios se seleccionaron tratando de cubrir todo el río incluyendo las zonas donde se tienen mayor impacto de descargas residuales, considerando la mayor cantidad de muestras que se puedan tomar en un día, tomando en cuenta que el traslado de éstas a los laboratorios fuera de la ciudad de Morelia debe realizarse en un tiempo no mayor de 48 h.

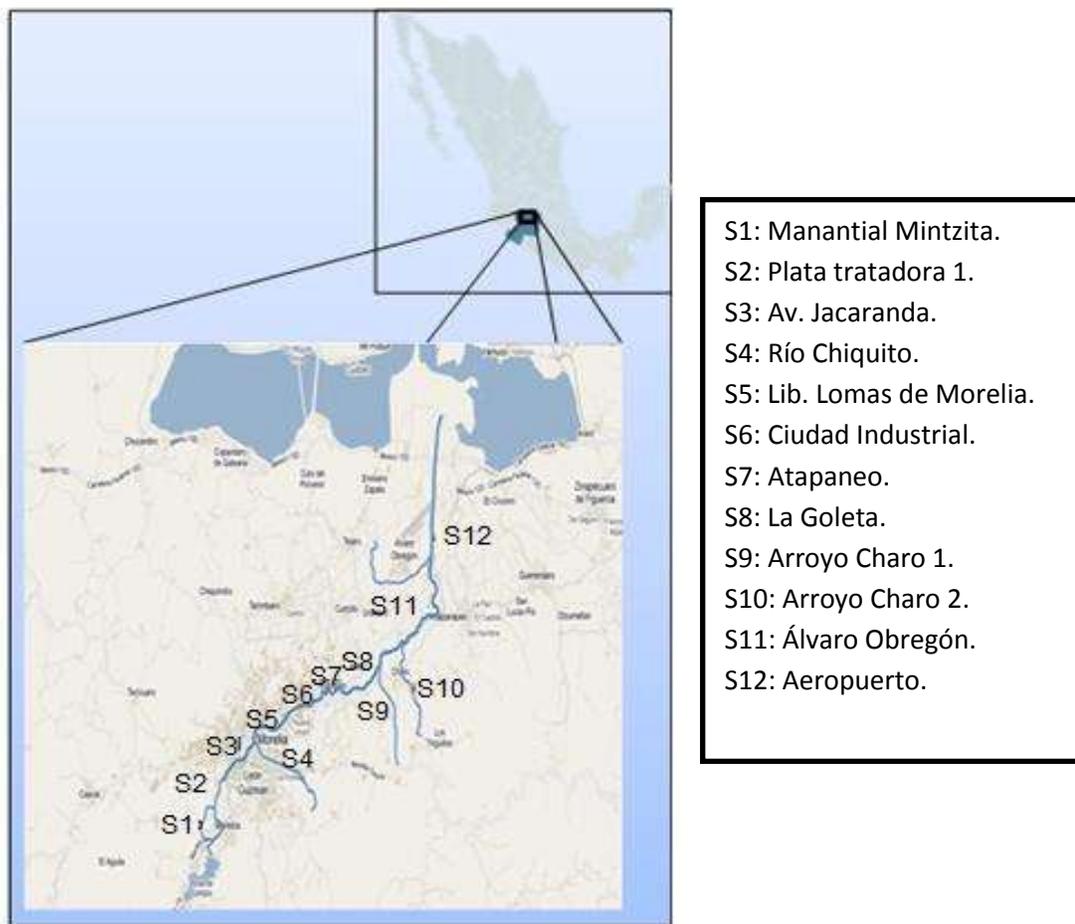


Figura 5. Localización de los sitios de muestreo en la zona de estudio.

Cuadro 3.- Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.

Sitio	Coordenadas geográficas	
	N	O
ST1	19°39'07.2''	101°16'08.3''
ST2	19°40'03.9''	101°15'16.4''
ST3	19°42'50.5''	101°12'06.4''
ST4	19°42'04.6''	101°12'23.1''
ST5	19°43'08.4''	101°10'42.0''
ST6	19°43'39.9''	101°09'48.5''
ST7	19°44'35.0''	101°07'10.9''
ST8	19°44'31.0''	101°05'04.7''
ST9	19°44'38.5''	101°04'00.4''
ST10	19°45'17.2''	101°02'34.0''
ST11	19°49'05.6''	101°00'40.2''
ST12	19°51'37.2''	101°00'27.2''

7.2. Parámetros a evaluar

La selección de parámetros físicos, químicos, biológicos y la prueba de toxicidad que se realizaron para cada muestra de agua, se basó en el propósito del estudio y los recursos disponibles. Los componentes mayores y secundarios que se determinaron en el agua son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} , N-NO_3^- y N-NH_3 , además de la concentración de metales pesados (Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, Ag, Cr, Hg, As), tanto por espectrofotometría de absorción atómica (AAS) como mediante pruebas convencionales de laboratorio. Mediante análisis químicos convencionales se determinaron en agua acidez total, alcalinidad total, dureza total, DBO_5 y DQO. El pH, temperatura, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto se midieron *in situ*. En los sedimentos se midió el pH y se determinó la concentración de metales pesados.

7.3. Toma de muestras

Tomar una muestra es coleccionar una porción del material que se desea conocer, de manera que pueda ser fácilmente transportada y manejada en el laboratorio para sus análisis, sin perder la representatividad de dicho material. Ello implica que la muestra debe mantener las mismas concentraciones de cada uno de los componentes en todas las fases y no sufrir alteraciones durante el transporte. Para tomar una muestra de agua se debe considerar la compatibilidad del envase empleado con la que se desea analizar.

Es necesario destacar la importancia de anotar cuidadosamente el lugar y condiciones de muestreo e identificar, en forma clara y segura, cada botella. Para mantener las características de la muestra se deben seguir las recomendaciones de la Cuadro 4.

7.4. Toma de muestras de agua

La toma, transporte y conservación de cada muestra de agua se realizó considerando los criterios establecidos para cada parámetro tanto de la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1980a) como del manual APHA-AWWA-WPCF (1995) y métodos de la EPA (2001). Las muestras se tomaron a una profundidad media con ayuda de un muestreador horizontal de Van Dorn (EPA, 2001). Se realizaron cuatro colectas de muestras en los meses de enero, mayo, noviembre del 2012 y febrero del 2013 para determinar los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados.

Cuadro 4.- Recomendaciones para el almacenamiento y transporte de la muestra (Jiménez, 2011)

Parámetro	Envase	Tamaño mínimo de la muestra (mL)	Preservación	Tiempo máximo de almacenamiento			
				Mes	día	h	min
Acidez	P,V(B)	100	R			24	
Alcalinidad	P,V	200	R			24	30
Cloro residual	P,V	500	I				30
Color	P,V	500	R			48	
Conductividad	P,V	500	R		28		
COT	V	100	I o R con HCl a pH<2		7		
DBO	P,V	1000	R			6	
DQO	P,V	100	I o R con H ₂ SO ₄ a pH<2		7		
Dureza	P,V	100	HNO ₃ a pH<2	6			
Fenoles	P,V	500	R y H ₂ SO ₄ a pH<2	-	-	-	-
Grasas y aceites	V, frasco de boca ancha calibrado	-	Para los disueltos, filtre y añada HNO ₃ a pH<2		28		
Metales	P(A), V(A)	-	Para los disueltos, filtre y añada HNO ₃ a pH<2	6			
Microbiológicos	P o V esterilizado	100 o 1000 dejar 2.5 cm para aeración	Na ₂ SO ₃ para muestras con Cl. EDTA para muestras con metales.			<4	
Nitratos	P,V	100	I o R			48	
Nitritos	P,V	200	I o R	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacal	P,V	500	I o R y H ₂ SO ₄ a pH<2		7		
NTK	P,V	500	R y H ₂ SO ₄ a pH <2		7		
Olor	V	500	I, R			6	
Oxígeno disuelto	V, Botella de DBO	300	I por electrode				30
Pesticidas	V(s), TFE con tapon	-	R, 1000 mg ácido ascórbico si hay cloro residual		7		
pH	P,V	-	I			2	
Sólidos	P,V	-	R		7		
Temperatura	P,V	-	I			0	
Turbiedad	P,V	-	R en oscuridad			24	

P: plástico de polietileno o equivalente, V (B): vidrio de borosilicato, V: vidrio, R: refrigeración, P(A) o V(A): enjuagado con HNO₃ al 1:1, I: análisis inmediato. Adaptado de: ASCE, AWWA y APHA, 1989.

7.4.1. Parámetros fisicoquímicos

Las muestras se almacenaron en botellas de polietileno (HDPE) de 1L, llenándose para reducir la presencia de aire y evitar cambios químicos. La temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto y sólidos totales se determinaron *in situ* (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

7.4.2. Metales pesados

Se utilizaron recipientes de polietileno (HDPE) de 125 mL previamente descontaminados con HNO₃. Cada frasco con su tapa y contratapa fueron introducidos en una solución de HNO₃ al 10% durante una semana. Posteriormente se cambiaron a una solución de HNO₃ al 1% por una semana y después se enjuagaron tres veces y se llenaron con agua desionizada. En el lugar de muestreo se vació una botella y se volvió a llenar con agua desionizada. Ésta se utilizó como control para eliminar posibles interferencias por contaminación ambiental. Otra botella se vació y se llenó con la muestra. Las muestras y los controles se preservaron con HNO₃ ultrapuro para evitar interferencias (APHA-AWWA-WPCF, 1995; Alfaro, *et al.*, 2002; Páez, 2008).

7.4.3. Coliformes fecales

Las muestras se tomaron en bolsas de plástico estériles desechables. Se le quitó el sello a la bolsa y una vez que el agua ocupó el volumen correspondiente a tres cuartas partes, se selló ésta amarrando los extremos. Se determinaron los coliformes fecales de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, por el método de tubos múltiples (DOF, 1994).

7.4.4. Toxicidad en agua

Las muestras para las pruebas de toxicidad se tomaron llenando de agua un vial de vidrio ámbar de 60 mL sin uso previo. Se realizó la evaluación de la toxicidad aguda con la bacteria marina *Vibrio fischeri* (*Photobacterium phosphoreum*) en un Microtox®. La toxicidad en agua se determinó de acuerdo con la Norma Mexicana (DOF, 1995). Este método se basa en la evaluación del efecto que sustancias puras, combinadas, cuerpos receptores, efluentes, lixiviados o sedimentos pueden tener sobre la intensidad de la luz emitida por la bacteria *Vibrio fischeri* en condiciones controladas de exposición.

7.4.5. Modelación de la especiación química de metales pesados y As en agua

La especiación química se realizó mediante el programa visual Minteq 3.0, el cual permite determinar especies químicas al equilibrio en sistemas acuosos, tiene un enfoque en química del agua y suelos, es el más utilizado, debido a su fácil manejo.

La modelación de la especiación química se realizó a los metales con concentraciones más altas.

Nota: Todas las muestras se mantuvieron a 4°C a partir de la toma, durante su traslado al laboratorio y hasta el momento de llevar a cabo los análisis correspondientes (DOF, 1980a).

7.5. Toma de muestras de sedimentos

Se realizaron cuatro tomas de muestras simultáneas a las tomas de agua en los meses de enero, mayo, noviembre del 2012 y febrero 2013. La colecta se efectuó con un muestreador de tubo o nucleador. Se colectaron los primeros 8 cm de profundidad para obtener parámetros o propiedades de interés por depósito de material reciente (Mudroch *et al.* 1995; Lau y Chu 2001; EPA 2001).

7.5.1. Transporte y almacenamiento

El transporte y almacenamiento adecuados son necesarios para mantener la calidad estructural y química de los sedimentos. Las muestras se mantuvieron a 4°C en un contenedor en el campo y en el laboratorio se siguió el protocolo para los diferentes análisis, se transfirieron a recipientes para almacenarlos temporalmente (EPA, 2001).

7.5.2. Homogenización

Al llegar al laboratorio después de la toma de muestras de sedimentos, se eliminaron inmediatamente los restos de material no deseado (material pedregoso fino y grueso, hojas, basura, etc.), después se homogenizaron completamente para obtener de manera consistente las propiedades fisicoquímicas de la muestra. Posteriormente, el material se dividió en submuestras para cada uno de los análisis correspondientes (EPA, 2001).

7.5.3. Secado

Los sedimentos, particularmente los 10 cm de la parte superior, generalmente contienen más 95% de agua. En este estudio, se secaron los sedimentos y los análisis se realizaron con material seco.

Comúnmente se utilizan tres tipos de secado para preparar muestras sólidas antes del análisis: secado al aire, en horno y congelación (Mudroch *et al.*, 1995). Para este estudio se realizó el secado de los sedimentos en horno a 60°C hasta obtener un peso constante. Este tipo de secado se recomienda para muestras en las que desea determinar componentes inorgánicos, en especial elementos traza (Ackay *et al.*, 2003). Los resultados de los análisis se presentaron basándose en el peso seco.

7.6. Procedimiento general para análisis de agua

Los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos, de toxicidad y metales se determinaron siguiendo la metodología indicada por la Norma Mexicana para cada parámetro, así como por el Manual de Métodos Estándar (APHA-AWWA-WPCF, 1995).

7.6.1. Parámetros físicos

7.6.1.1. Color

La determinación del color se realizó de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-017-1980 (DOF, 1980b), se empleó la escala estandarizada de Pt-Co.

7.6.1.2. Turbidez

La turbidez se determinó de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001 (DOF, 2001b). Las lecturas se realizaron con un turbidímetro calibrado con una suspensión de referencia de formacina.

7.6.1.3. Profundidad

Se determinó en campo mediante una cuerda con marcas de medición. La muestra de agua se tomó a una profundidad media.

7.6.2. Parámetros fisicoquímicos *in situ*

7.6.2.1. Temperatura, conductividad eléctrica, pH y oxígeno disuelto

La conductividad eléctrica, el pH y el oxígeno disuelto se midieron con un potenciómetro portátil (Corning Checkmate II). El potenciómetro se calibró con soluciones buffer para pH 4, 7 y 10. La de oxígeno disuelto se hizo con solución buffer a 0.0 mg L^{-1} y para la conductividad eléctrica se calibró el electrodo al aire ($0.0 \mu\text{S/cm}$) (APHA-AWWA-WPCF, 1995). La temperatura se midió por inmersión con un termómetro de mercurio.

7.6.3. Parámetros fisicoquímicos en laboratorio

7.6.3.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

Esta determinación se realizó de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001c). Se calcula la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

7.6.3.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)

Esta prueba se llevó a cabo de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 (DOF, 2001d). El método se basa en medir la concentración de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en agua naturales y residuales, se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C .

7.6.3.3. Dureza total

Se determinó de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-072- SCFI-2001 (DOF, 2001g). El método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) con Ca^{2+} y Mg^{2+} .

7.6.3.4. Alcalinidad y acidez totales

Se determinaron de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 (DOF, 2001f) Este método está basado en la medición de la acidez o alcalinidad en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante un álcali o un ácido según sea el caso de concentración conocida.

7.6.3.5. Sólidos

Para esta determinación se utilizaron los métodos descritos en la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 y en el manual de métodos estándar (DOF 2001h, APHA-AWWA-WPCF, 1995) para la determinación de sólidos disueltos y sedimentables.

7.6.4. Componentes mayores

La determinación de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ se realizó por espectrometría de absorción atómica (APHA-AWWA-WPCF 1995). Los SO_4^{2-} y Cl^- se evaluaron por métodos tritrimétricos (DOF 1981, DOF 2001i) y finalmente, los CO_3^{2-} y HCO_3^- se calcularon mediante las Ecuaciones 1 y 2, con base en los valores de alcalinidad total y pH obtenidos (Deutsch, 1997):

$$\text{CO}_3^{2-} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\left[\text{Alcalinidad total} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{CaCO}_3 \right) \right] 60}{(2 + 10^{-\text{pH}}/10^{-10.3}) 50}$$

Ecuación 1. Cálculo de la concentración de CO_3^{2-} en agua.

$$\text{HCO}_3^- \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{\left[\text{Alcalinidad total} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{CaCO}_3 \right) \right] 60}{(1 + 2 * 10^{-\text{pH}}/10^{-10.3}) 50}$$

Ecuación 2. Cálculo de la concentración de HCO_3^- en agua.

La determinación de N-NO_3^- y N-NH_3 se llevó a cabo de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001 (DOF, 2001j) y al Manual de Métodos Estándar (APHA-AWWA-WPCF, 1995). Los NO_3^- reaccionan con el complejo brucina bajo condiciones ácidas y temperatura elevada para producir otro complejo de color amarillo.

7.6.5. Metales pesados y arsénico

Los metales pesados en agua se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001) con un espectrofotómetro Analyst 200 PerkinElmer. Los elementos que se determinaron son Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, Cr y Pb. El As se determinó por espectrometría de absorción atómica (AAS) mediante generación de hidruros (DOF, 2001k).

7.6.6. Coliformes fecales

Para complementar este estudio, se determinaron los coliformes fecales por el método de tubos múltiples de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-112-SSA1-1994. El método permite determinar el número de microorganismos coliformes presentes en una muestra utilizando un medio selectivo en el que se desarrollan bacterias a 35°C en aproximadamente 24 h, dando como resultado la producción de gas y ácidos orgánicos a partir de la fermentación de la lactosa, los cuales viran el indicador de pH y precipitan las sales biliares.

7.6.7. Toxicidad en agua

La determinación de la toxicidad se realizó de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-112-SCFI-1995, mediante un bioensayo por Microtox®, el cual emplea la bacteria marina *Vibrio fischeri* para evaluar la toxicidad de agua. En este caso, la toxicidad de una muestra aumenta al disminuir el porcentaje de EC₅₀; es decir, a menor valor de EC₅₀, mayor toxicidad. El bioensayo indica la concentración efectiva que redujo la bioluminiscencia de la bacteria en un 50%, con una exposición de 15 min (DOF, 1995; Lau y Chu, 2001).

7.6.8. Modelación de la especiación química en agua

Con base a los resultados obtenidos de las concentraciones de los metales y As en agua, se realizó la modelación de la especiación química a las concentraciones más altas de metales que se encontraron.

La modelación se llevó a cabo mediante el programa Visual Minteq, el cual tiene almacenado un banco de datos de las constantes de estabilidad a 25 °C para definir las especies formadas a diferentes valores de pH y a partir de éstos, se construyeron los diagramas de equilibrio para definir el rango en el que predominan las especies químicas (Alfaro, 2010; Torres *et al.* 2010).

7.6.9. Análisis estadístico para agua

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el análisis multivariado de componentes principales, así como el análisis de varianza(ANOVA) y una prueba de medias (prueba de Tuckey), en los cuales se analizara el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos, metales pesados con respecto a los muestreos.

7.6.9.1. Componentes principales

El análisis multivariado de componentes principales se realizara para los parámetros fisicoquímicos, metales pesados y sitios, para comprobar y/o determinar la relación que existe entre ellos. El análisis de componentes principales se basa en que muchas de las variables que se recogen entre los individuos de la población están correlacionadas, con lo cual la información es redundante. Interesa, por lo tanto, reducir el número de variables para resumir adecuadamente la información. En este sentido, la técnica consiste en crear “artificialmente” unas pocas variables “nuevas” que retengan una parte significativa de la información proporcionada por los datos. El procedimiento para crear dichas variables es matemático y no hay seguridad de que las nuevas variables tengan un sentido claro; sin embargo, en muchos casos esas variables pueden interpretarse, es decir, se les puede dotar de sentido.

Fases del análisis de componentes principales:

Análisis de la matriz de correlaciones.- un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y, por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

Selección de los factores.- La elección de los factores se debe realizar de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; según el factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se le denominará componentes principales.

Análisis de la matriz factorial.- Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables (las correlaciones entre las variables y los componentes principales). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables (Walpole y Myers 1992).

El análisis multivariante mediante técnicas de proyección sobre variables latentes tiene muchas ventajas sobre los métodos de regresión tradicional: 1) se puede utilizar la información de múltiples variables de entrada, aunque éstas no sean linealmente independientes, 2) puede trabajar con matrices que contengan más variables que observaciones, 3) puede trabajar con matrices incompletas, siempre que los valores faltantes estén aleatoriamente distribuidos y no superen un 10% y 4) puesto que se basan en la extracción secuencial de los factores, que extraen la mayor variabilidad posible de la matriz de las X (variables explícitas, tienen que ser dependientes) pueden separar la información del ruido. Se asume que las X se miden con ruido. En este caso las variables explicativas (parámetros fisicoquímicos y metales pesados) se estudiarán en relación a los sitios estudiados. Todas las pruebas en este trabajo se efectuaron con un nivel de significancia $p < 0.05$. Las pruebas se realizaron con el programa Minitab (Alfaro, 2010).

7.6.9.2. ANOVA y Tukey

El análisis de varianza se realizó para las concentraciones medias con el programa JMP 6.0, con la finalidad de comparar las medias aritméticas de todos los parámetros en estudio, para identificar si los niveles de cada una de las variables son diferentes estadísticamente de un muestreo a otro, con una significancia de $p < 0.05$. También se realizó la comparación de medias mediante la prueba de Tukey – Kramer con una significancia de $p < 0.05$ para reconocer diferencias estadísticas entre medias de acuerdo a los muestreos que se llevarán a cabo. El ANOVA simple analiza si dos variables Y (continua, llamada variable de respuesta, en este caso parámetros fisicoquímicos, metales pesados y arsénico) y F (categórica, llamada factor, en este caso muestreo) son independientes o no (es decir, si hay relación entre ellas, si hay diferencias significativas en el valor de la primera según el valor que tome la segunda, si el factor influye en la variable respuesta).

7.7. Procedimiento general para análisis de sedimentos

El análisis de parámetros físicoquímicos, metales pesados y As en los sedimentos se realizaron tomando como referencia los métodos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2001) y la Norma Oficial Mexicana para análisis de suelos (DOF, 2000a) ya que no existen especificaciones para análisis de sedimentos en la Norma Mexicana.

7.7.1. Parámetros físicos

7.7.1.1. Color

La determinación de color en los sedimentos se realizó por comparación con la Carta de Munsell para suelos, donde se observa el color en seco y húmedo, comparando con las celdas de las cartas se obtienen el matiz, el brillo y la intensidad (Método AS-22) (NOM-021-RECNAT-2000).

7.7.1.2. Tamaño de partícula

La determinación del tamaño de partícula se realizó de acuerdo con el método de la pipeta (método AS-28) propuesta por la Norma Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. La prueba se realizó por duplicado para obtener resultados confiables.

7.7.2. Parámetros químicos

7.7.2.1. pH

Para la medición de pH se utilizó el método 9045C para medir pH en suelo y lodo (EPA, 1995), es un procedimiento electrométrico para medir el pH en suelos y muestras de desechos.

7.7.3. Metales pesados y arsénico totales

La determinación de metales pesados y arsénico, se llevó a cabo de acuerdo al método de la EPA 3050B, el cual nos menciona la preparación de las muestras para el análisis por espectrometría de absorción atómica de flama (FLAA).

Este método nos señala la realización de una digestión ácida fuerte que disuelve casi todos los elementos que podrían llegar a ser “ambientalmente disponibles”. La solución resultante de la digestión es la que se analiza en el espectrómetro de masas.

7.7.4. Fases geoquímicas de los sedimentos

Debido a que los sedimentos son parte de cualquier ambiente acuático, se les puede considerar como un medio disponible para evaluar e identificar fuentes de contaminación por metales pesados, los sedimentos no solo nos dan una perspectiva acerca del grado de contaminación por medio de entradas naturales, sino también son capaces de dar información de contaminación antropogénica.

Para conocer con seguridad el grado de contaminación por metales pesados en los sedimentos se requiere de una buena identificación de las fases geoquímicas para así conocer la capacidad de movilización de los metales pesados, así como, su disponibilidad. Para llevar a cabo la determinación de la especiación de los sedimentos

contaminados se utilizan con frecuencia procedimientos de extracción que pueden estar compuestos por una o varias fracciones, siendo las extracciones secuenciales las más usadas, el esquema de extracción propuesto por Tessier *et al.* (1979) es el más utilizado, sin embargo de acuerdo con las metas de cada estudio se pueden efectuar procedimientos modificados del esquema de Tessier. Actualmente la Comisión de la Comunidad Europea, apoyada y coordinada por la Bureau Commun of Reference (BCR), ahora conocida como SM&T, estableció un esquema de extracción secuencial de tres fracciones con el objetivo de mejorar la calidad de los datos.

7.7.4.1. Esquema de extracción secuencial para sedimentos

De acuerdo al esquema de extracción secuencial de la SM&T se llevaron a cabo los siguientes pretratamientos: las muestras se secan en cápsulas de porcelana en una estufa a 105 °C durante 24 h. Una vez secas, se fraccionaron a un tamaño de partícula fina.

El procedimiento utilizado fue el esquema de extracción secuencial propuesto por la SM&T (Cuadro 5), el cual está compuesto por tres etapas y una etapa residual, especificadas como, la fracción 1, la denominada como: ácido soluble (iones intercambiables y carbonatos), la fracción 2; la reducible (hidróxidos de Fe y Mn), la fracción 3: la oxidable (materia orgánica y sulfatos) y fracción 4: residual (Ronquillo *et al.*, 2011; Sutherland, 2011).

Cuadro 5.- Esquema de extracción secuencial para metales pesados en sedimentos.

Etapa	Fracción	Procedimiento para 1g de muestra
1	F1. Unida a iones intercambiables y carbonatos	40 mL de ácido acético 0.11 M, agitar 16 h, centrifugar durante 20 min y decantar.
2	F2. Unida a óxidos de Fe y Mn	Al residuo de la fracción anterior, adicionarle 40 mL de clorhidrato de hidroxilamina 0.5 M, agitar 16 h, centrifugar 20 min y decantar.
3	F3. Unida a la materia orgánica y sulfatos	Al residuo de la fracción anterior se le adicionan 10 mL de peróxido de hidrógeno 8.8 M a temperatura ambiente, se digiere por una hora, después se le agregan 10 mL de peróxido de hidrógeno 8.8 M y se calienta a 85 °C en baño María durante una hora, se le adicionan 50 mL de acetato de amonio 1.0 M, se agita por 16 h y se centrifuga por 20 min.
4	F4. Residual	Al residuo anterior, se le agregan 3 mL de agua desionizada, 7.5 mL HCl 6M y 2.5 mL HNO ₃ 14M, dejar toda la noche a 20 °C, calentar a reflujo por 2 h, enfriar y filtrar.

Fracción 1 (fracción intercambiable y ligada a carbonatos)

Se mezclan en un recipiente de polietileno un gramo de sedimento y 40 mL de disolución de ácido acético 0.11 M, se agitan a 120 rpm por 16 h a temperatura ambiente. Transcurrido este periodo se centrifuga a 3000 rpm durante 20 min. Después se extrae el líquido sobrenadante y se coloca en un tubo de polietileno.

El residuo se lava con 20 mL de agua destilada, se agita por 15 min y se centrifuga por 20 min a 3000 rpm, se decanta y se desecha el líquido sobrenadante, cuidando de no desechar el residuo sólido.

Fracción 2 (ligada a óxido de Fe y Mn)

Al residuo de la primera etapa se le añaden 40 mL de la solución de clorhidrato de hidroxilamina 0.1 M, se agita la mezcla durante 16 h a temperatura ambiente, se centrifuga a 3000 rpm por 20 min, se decanta en un recipiente de polietileno. El residuo se lava con 20 mL de agua desionizada, se agita 15 min y se centrifuga por 20 min a 3000 rpm; se desecha el sobrenadante.

Fracción 3 (ligada a materia orgánica y sulfatos)

Al residuo de la segunda etapa se le agregan 10 mL de peróxido de hidrógeno 8.8 M, en pequeñas alícuotas, se tapa y se digiere a temperatura ambiente durante una hora agitando manualmente de forma ocasional. Se continúa con la digestión durante una hora a 85°C en baño María, se reduce el volumen a 3 mL o menos calentando. Se añaden otros 10 mL peróxido de hidrógeno 8.8 M, se tapa de nuevo el recipiente y se calienta en baño María a 85 °C durante una hora. Al cabo de este tiempo se destapa el recipiente y se aumenta la temperatura hasta reducir el volumen a 1 mL. A continuación se agregan al residuo 50 mL de acetato de amonio 1 M, se agita la mezcla durante 16 h a temperatura ambiente; de forma similar que en las anteriores etapas, se separa el extracto del residuo centrifugado en un tubo de polietileno y se deja el residuo sólido.

Fracción 4 (fracción residual)

Al residuo de la etapa 3, se le agragan 3 mL de agua desionizada, 7.5 mL de HCL 6 M y 2.5 mL de HNO₃ 14 M, se deja toda la noche a 20 °C, se calienta a reflujo por 2 h, se deja enfriar y se filtra.

7.7.5. Análisis estadístico para sedimentos

Al igual que en el agua se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de medias (prueba de Tukey) mediante el programa JMP 6.0, para las concentraciones de metales pesados y arsénico contra los muestreos. Con la finalidad de comparar las medias aritméticas de los metales pesados en estudio, así como la comparación de medias para reconocer las diferencias estadísticas entre medias de acuerdo con los muestreos que se llevaron a cabo, con una significancia de $p < 0.05$.

Para el caso de los sedimentos solo se tomaron las variables de los metales pesados ya que los parámetros fisicoquímicos son variables nominales por lo cual no se pueden ingresar al análisis, por esta razón también no se realizó el análisis de componentes principales.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Agua

8.1.1. Parámetros fisicoquímicos *in situ*

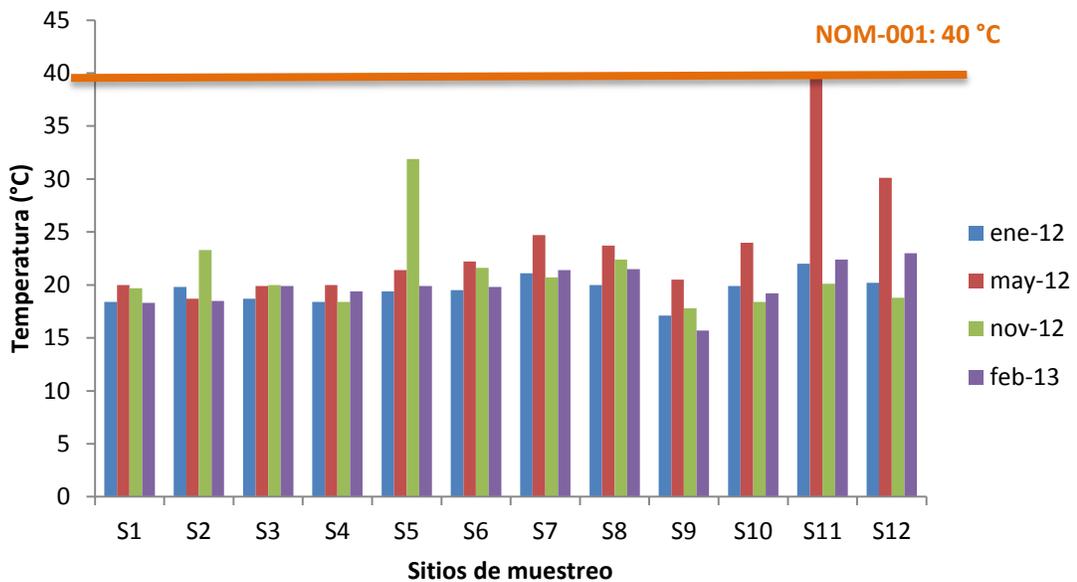
Los valores de los parámetros medidos en agua *in situ* en los doce sitios de estudio del río Grande se muestran en el Cuadro 11 del Anexo A.

8.1.1.1. Temperatura

Los valores de la temperatura en los sitios estudiados en agua son adecuados para uso en riego agrícola y público urbano, así como para actividades pesqueras y de navegación de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, ya que la temperatura oscila entre los 15 y 25 °C, y el límite máximo permisible es de 40 °C (Gráfica 1).

Las temperaturas más elevadas se observaron en el muestreo de mayo lo cual se debe a la época de primavera, lo que resulta importante ya que la temperatura influye sobre la vida del cuerpo de agua y en los organismos que en ella habitan, además de favorecer las reacciones de descomposición de la materia orgánica presente provocando en ocasiones malos olores y disminución del contenido de oxígeno; esto debido a que a estas temperaturas el agua es más inestable y se evapora con mayor rapidez por la reducción de la viscosidad y el aumento de la presión de vapor en la superficie, disminuyendo así la solubilidad de los gases (Ruth, 2010). Al mismo tiempo, se incrementa la velocidad de sedimentación favoreciendo la autodepuración del agua.

Los muestreos de enero, noviembre y febrero, presentan un comportamiento similar, teniendo la mayor variación en el muestreo de mayo. Ningún valor registrado de temperatura sobrepasó la normatividad mexicana.



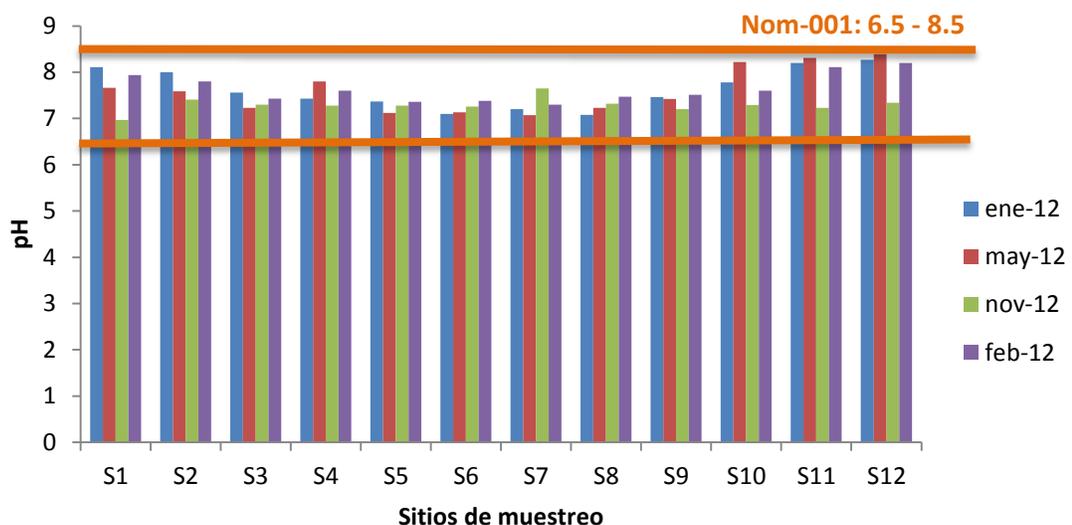
Gráfica 1.- Temperatura en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.1.2.pH

Los valores obtenidos de pH se mantuvieron en un rango de siete a ocho a lo largo de todo el río Grande, dándonos valores neutros y un poco básicos, lo cual favorece a los mecanismos de adsorción y precipitación, esto se comprueba en la especiación química y las concentraciones de metales pesados encontrados en agua y sedimentos del estudio, ya que las especies que predominaron fueron las unidas a OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , y las concentraciones más elevadas de metales pesados se encontraron en sedimentos, pero también estos valores pH permiten una gran interacción entre el metal y el agua, ya que es muy fácil de ser liberado el metal de la especie química que lo tenga retenido, por lo que, esto provoca una gran movilidad de los metales a lo largo del río Grande.

Se observa en la Gráfica 2 que los valores alcalinos se encuentran en el inicio y el final de los sitios de muestreos, esto se debe al tipo de suelo en el que se encuentran lo cual les dan características básicas favoreciendo a una alta alcalinidad en estas partes del río, el pH disminuye cuando pasa por la zona de Morelia dejándolo en neutro, esto indica que existen sustancias ácidas que hacen que el pH baje lo cual provoca que algunos de los parámetros fisicoquímicos se vean afectados tal es el caso de la alcalinidad la cual disminuye en esta zona, así como también, el HCO_3^- y el CO_3^{2-} , debido a que estos están muy relacionados con los valores de pH que al disminuir también disminuye la concentración de CO_3^{2-} y aumenta el HCO_3^- , y al momento de que estos dos cambian también modifican otros parámetros como la alcalinidad total y las concentraciones de las sales disueltas como los Cl^- , SO_4^{2-} , entre otras.

El pH encontrado en todos los sitios de muestreos se encuentra dentro de la NOM-127-SSA1-1994, la cual establece un límite máximo permisible entre 6.5 y 8.5 para el uso y consumo humano, y la OMS establece el mismo rango para la preservación de vida acuática.



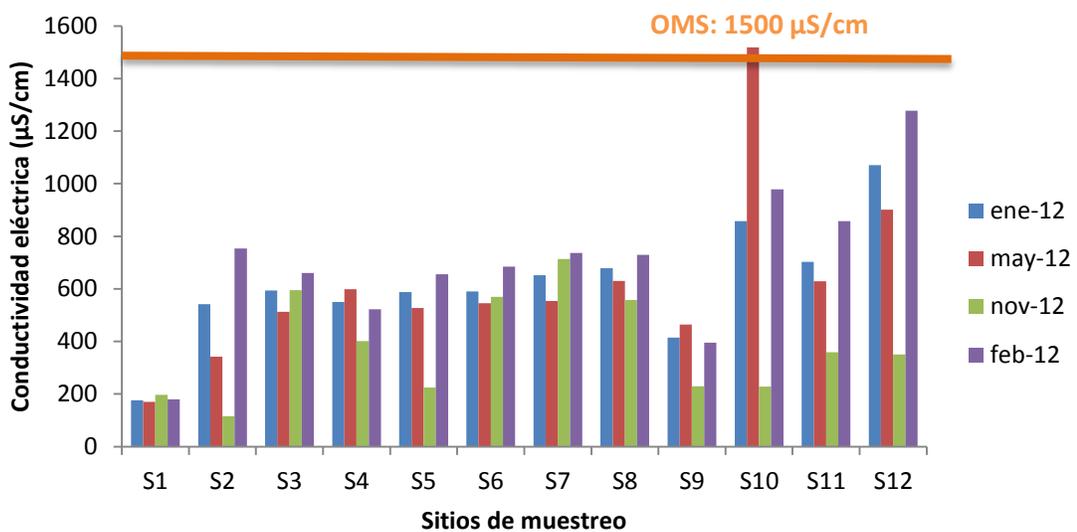
Gráfica 2.- pH en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.1.3. Conductividad eléctrica (C.E.)

La conductividad eléctrica en los muestreos de enero, mayo del 2012 y febrero del 2013, incrementa conforme el río avanzaba en su cauce hasta llegar a su desembocadura, en el muestreo de noviembre del 2012 presentó grandes variaciones en todo el río debido a las lluvias que se tuvieron en esa etapa, y que influyeron para la disolución y el arrastre de las sales que provocan la conducción eléctrica (Gráfica 3).

A través del comportamiento de la C.E. se puede suponer que existe un arrastre de componentes disueltos, ya que esta aumenta conforme se acerca a la desembocadura del río Grande, esto se comprueba con las concentraciones que presentan los SDT y la alcalinidad total que también aumentan a lo largo del río, estos dos parámetros están ampliamente relacionados con las partículas disueltas, entre ellas las sales, con esto se confirma el arrastre de sales a lo largo del río Grande, siendo esto de gran importancia, ya que debido al pH antes mencionado, las sales pueden estar interactuando con los metales pesados e ingresar al lago de Cuitzeo donde existe vida acuática y se agrava la problemática.

Es importante mencionar que el agua con una C.E. superior a $1500 \mu\text{S cm}^{-1}$, debe limitarse su uso para riego y para usos industriales, debido al alto contenido de SDT entre ellos las sales inorgánicas que afectan a los suelos de los cultivos ya que no solo compiten por el agua sino que también aumentan el pH y carbonatos, ocasionando problemas con deficiencias de Fe y Zn en los cultivos, para los sistemas industriales un alto contenido de sales provoca incrustaciones en los equipos limitando su eficiencia. No existe normatividad mexicana que contemple un límite máximo permisible para este parámetro en el agua, pero la OMS establece un valor máximo permisible para vida acuática de $1500 \mu\text{S cm}^{-1}$, donde en el presente estudio solo el S10 en el muestreo de mayo supera este límite.



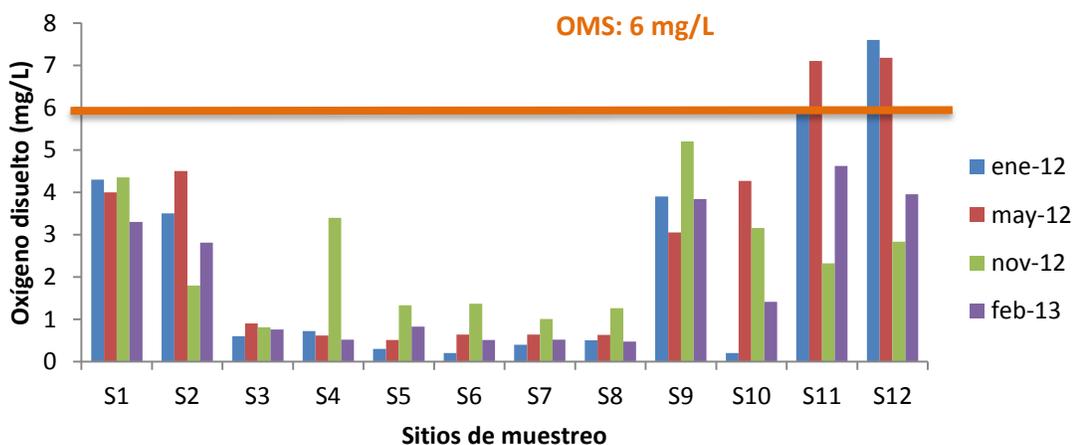
Gráfica 3.- C.E en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.1.4. Oxígeno disuelto (O.D.)

Las fluctuaciones de O.D. fueron variadas en el estudio, ya que se presentaron ciertos cambios, encontrando concentraciones desde 7.6 mg L⁻¹ en el sitio S12, hasta concentraciones inferiores como 0.2 mg L⁻¹ en el S6, ambos en el muestreo de enero (Gráfica 4).

El O.D. está ampliamente relacionado con la temperatura como ya se mencionó anteriormente, a temperaturas bajas se tiene una mayor cantidad de O.D., por lo que de acuerdo a los resultados obtenidos de temperatura, el río Grande tendría que tener una buena cantidad de O.D. pero esto no se cumple ya que en la zona donde el río Grande ingresa a la ciudad de Morelia la cantidad de O.D. disminuye, esto se puede deber a dos causas principales, la primera es que en esta zona es donde recibe la mayor cantidad de materia orgánica por lo que se consume una gran cantidad de oxígeno al tratar de degradarla esto se comprueba con el comportamiento de la DBO₅ y DQO encontradas, y la segunda se debe a las características físicas del río, debido a que en esta parte presenta poca movilidad, limitando la entrada de oxígeno, dando lugar a zonas con baja disponibilidad de este recurso, producción de malos olores y hasta zonas anóxicas.

Se observa también que en los sitios S9, S10, S11 y S12, los cuales se encuentran en la parte final del río, se tiene una mayor entrada de O.D., esto se debe a que aquí es donde el río tiene mayor velocidad existiendo un mayor ingreso de oxígeno, favoreciendo a la degradación de la materia orgánica, ya que aunque existe la planta de tratamiento de Atapaneo, ésta toma una cantidad de agua del río Grande, después la trata y la regresa a éste, no se observa gran mejoría en los parámetros fisicoquímicos en los sitios de muestreo que se encuentran cercanos a la descarga del agua tratada. De acuerdo con la OMS el límite mínimo permisible en agua de O.D. es de 6 mg L⁻¹ para la preservación de la flora y fauna, por lo que la mayoría de los sitios muestreados se encuentran por debajo del límite a excepción de los sitios S11 y S12 en los muestreos de enero y mayo.



Gráfica 4.- Concentraciones de O.D. en el agua del río Grande de Morelia.

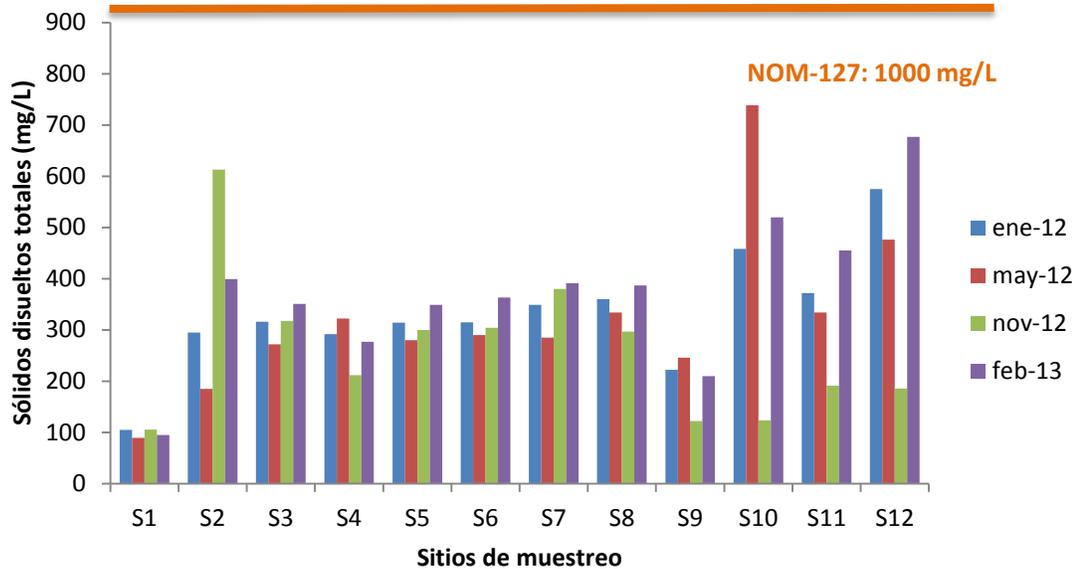
8.1.1.5. Sólidos disueltos totales

El comportamiento de los SDT es similar al comportamiento de la C.E. donde el valor más bajo se encontró en el primer punto de muestreo y aumentan conforme llega a la desembocadura del río, con lo cual se reafirma el arrastre de sólidos a lo largo de éste, también se puede considerar que existe aporte de SDT por la agricultura ya que los sitios que presentan las concentraciones más altas es donde se encuentra la mayor presencia de esta actividad.

Como se observa en la Gráfica 5, el valor más bajo y el más alto se obtuvieron al igual que los parámetros anteriores en el muestreo de mayo, también en el muestreo de noviembre fue donde se obtuvo un comportamiento diferente en comparación con los otros tres muestreos. Esto se debe a que estos dos meses se consideran como el inicio de secas y el fin de lluvias, los cuales influyen mucho en los parámetros fisicoquímicos, ya que en mayo la cantidad de agua disminuye y en noviembre la cantidad de agua es la más alta.

La cantidad de SDT en el río Grande es considerable ya que aunque presenta valores por debajo de los 800 mg L^{-1} , le da al río una turbiedad alta que impide la penetración de la luz y por lo tanto limita la vida acuática (Martínez, 2003); también favorece la reacción de las sales y los compuestos orgánicos con los metales pesados, los cuales debido a que el río Grande presenta zonas con velocidades bajas se favorece el fenómeno de la precipitación esto se da en los sitios de la zona de Morelia, aunque también, se presenta el arrastre de estas partículas a lo largo del río ya que al salir de la ciudad de Morelia el río incrementa su velocidad, lo cual le da una alta movilidad y disponibilidad de los metales pesados en todo el cuerpo de agua hasta su ingreso al lago de Cuitzeo.

La Normatividad Mexicana recomienda un máximo de SDT de 1000 mg L^{-1} en agua de uso y consumo humano, con respecto al riego agrícola no se cuenta con algún límite máximo permisible.



Gráfica 5.- Concentraciones de los SDT en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.2. Parámetros físicos

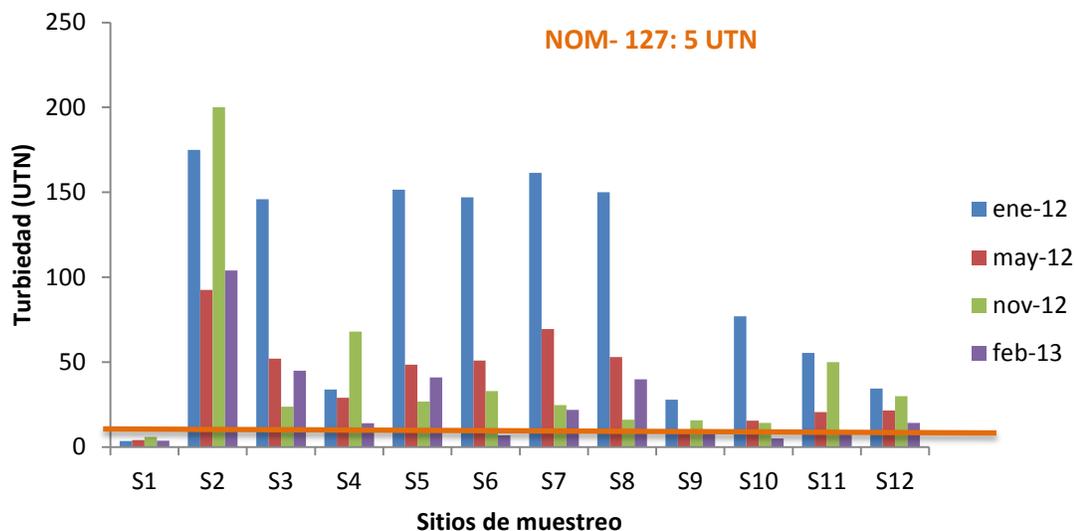
Las concentraciones de los parámetros físicos en los cuatro muestreos realizados se muestran en el Cuadro 12 del Anexo A.

8.1.2.1. Turbiedad

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994, el límite máximo permisible para turbiedad en agua para uso humano es de 5 UTN, por lo que la mayoría de los sitios estudiados rebasan esta Normatividad a excepción del sitio S1 que es donde presentó las concentraciones más bajas.

Como se puede apreciar a simple vista el río Grande presenta una elevada turbiedad ya que se observa un color café claro a lo largo del río, presentando sus mayores concentraciones en el S2 donde se encuentra la desembocadura de la industria papelera, la cual ingresa una alta concentración de partículas suspendidas, que hacen que la penetración de la luz sea menor, provocando también una disminución de oxígeno y debido a que son altamente reactivas se combinan con los metales pesados, que en muchos casos los llegan a retener y mantenerlos en suspensión a lo largo del río hasta llevarlos a su desembocadura.

Se observa en la Gráfica 6, que la turbiedad comienza a disminuir a partir del sitio S3 llegando a su valor más bajo en la desembocadura del río grande, esto se debe a los pequeños afluentes que desembocan en el río con menor turbiedad provocando que disminuya este parámetro; las concentraciones más elevadas se obtuvieron en el muestreo enero-12, en los otros tres muestreos restante se tienen un comportamiento muy diferente en cada uno, lo cual nos indica que el ingreso de las partículas no es constante y puede variar a lo largo del año sin tener un comportamiento patrón.



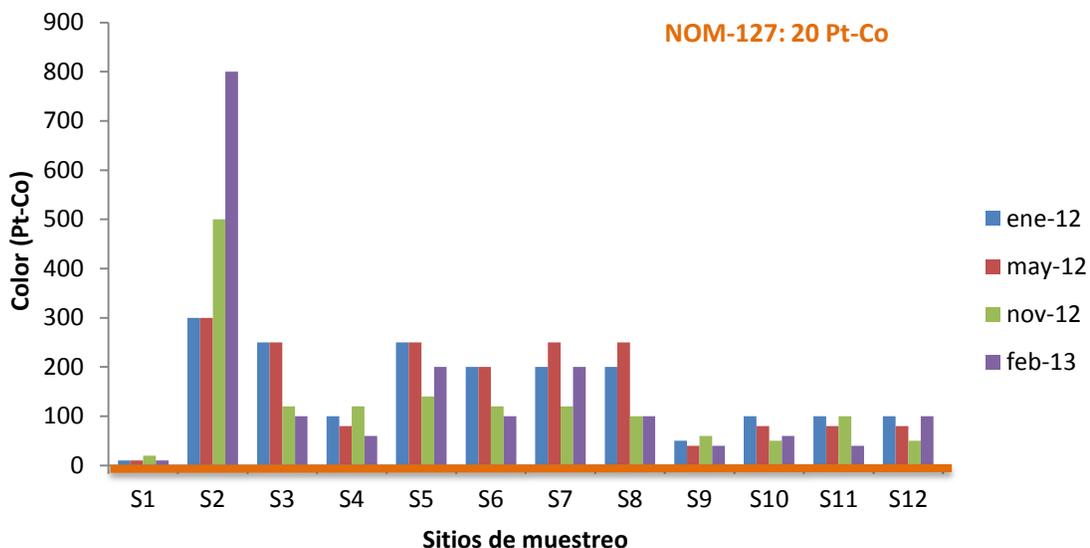
Gráfica 6.- Turbiedad en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.2.2. Color

El comportamiento del color al igual que el de la turbiedad tienen un gran aumento debido a la descarga que se realiza por la papelería en el sitio S2 obteniendo ahí como se muestra en la Gráfica 7 la mayor concentración de este parámetro, el cual va disminuyendo a lo largo del río, esto debido también al ingreso de agua limpia por los diferentes afluentes que ingresan al río.

Como podemos observar el valor más alto de color se dio en el muestreo de feb-13 en el S2 con 800 unidades de Pt-Co, después disminuye en los S3 y S4, y vuelve a incrementar en los sitios correspondientes a la zona de Morelia, Atapaneo y La Goleta (S5, S6, S7 y S8,) esto debido a las descargas de aguas residuales que se reciben en estos sitios, después la concentración vuelve a disminuir en los sitios S9, S10, S11 y S12, esto posiblemente a la forma que tiene el río en estas zonas en el cual se tiene mayores velocidades y un mayor ingreso de oxígeno por lo tanto una mayor degradación de materia orgánica la cual también le proporciona color al agua del río (Villalobos, 2010), otro factor importante es que las poblaciones cercanas a él son pequeñas y el ingreso de contaminantes es menor, lo cual ayuda a que el río Grande tenga un cierto grado de recuperación.

De acuerdo con la NOM-127-SAA1-1994, el límite máximo permisible de color es de 20 unidades de Pt-Co para uso y consumo humano, por lo que solo el sitio S1 cumple con la Normatividad, lo cual es importante ya que el agua de éste sitio es utilizada para estos fines, los demás sitios la sobrepasan, lo cual provoca que se tenga una menor penetración de luz a la columna de agua, teniendo como consecuencia una disminución de oxígeno y limitando la vida acuática.



Gráfica 7.- Color en los sitios de muestreo en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.3. Parámetros químicos

Las concentraciones de los parámetros químicos en los cuatro muestreos realizados se muestran en el Cuadro 12 del Anexo A.

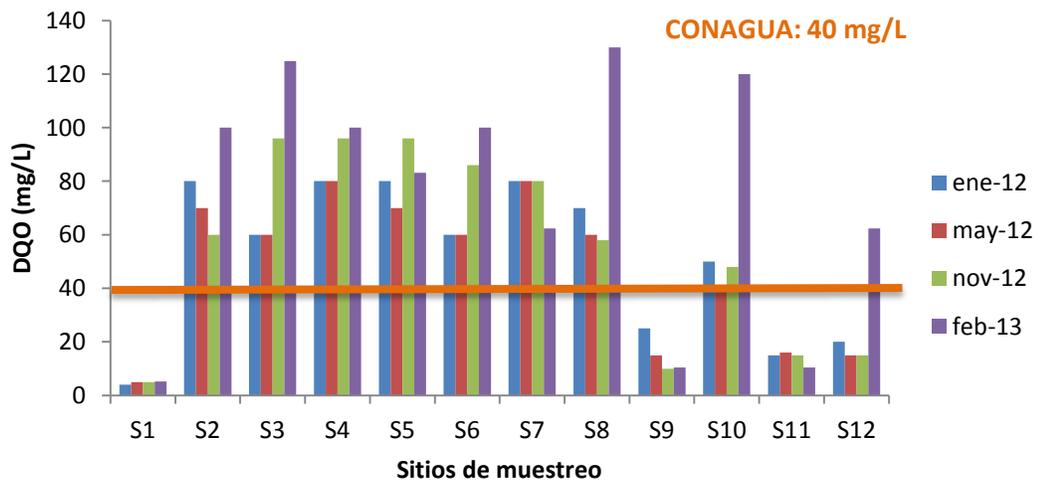
8.1.3.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es uno de los parámetros más importantes para determinar la calidad del agua, aunque no está considerado en la Normatividad Mexicana es importante tomarlo en cuenta, ya que bajo condiciones de oxidación se abarca mayor espectro de compuestos químicos, especialmente en ciertas muestras con sustancias tóxicas o inhibitoras, en donde la determinación de la DQO puede ser el único método para establecer los niveles de carga orgánica, ya que este parámetro se basa en una reacción que no es influenciada por la variabilidad biológica, por lo que determina tanto compuestos orgánicos biodegradables como no biodegradables, incluyendo sustancias recalcitrantes o lentamente biodegradables (Alfaro, 2010).

Se observa en la Gráfica 8 el comportamiento que tiene la DQO a lo largo del río Grande, presentando las concentraciones más altas en los sitios que se encuentran en la zona de Morelia, donde se tiene un mayor ingreso de materia orgánica, esto provocado por las diferentes descargas residuales de la ciudad de Morelia así como de la zona industrial.

Las concentraciones de DQO fueron aumentando en cada muestreo indicándonos un incremento del ingreso de contaminantes al río Grande, a excepción de los sitios S9 y S11 los presentaron concentraciones similares en los cuatro muestreos.

Como ya se mencionó anteriormente en México no existe un límite máximo permisible para este parámetro, pero la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2011), creó un índice de DQO donde las concentraciones que se encuentren en un rango de 40 a 200 mg L⁻¹ nos indican que existe una contaminación por aguas residuales crudas de origen municipal, esto nos indica que los datos obtenidos en este estudio se encuentran en este rango, por lo tanto, se debe tener consideración importante ya que el agua que supera los 200 mg L⁻¹ de DQO es considerada como un agua “altamente contaminada” por materia orgánica y se debe restringir para cultivos de hortalizas, y de acuerdo a la literatura citada en las zonas aledañas del río Grande utilizan el agua para riego de este tipo de cultivos.



Gráfica 8.- Concentraciones de DQO en el agua del río Grande de Morelia.

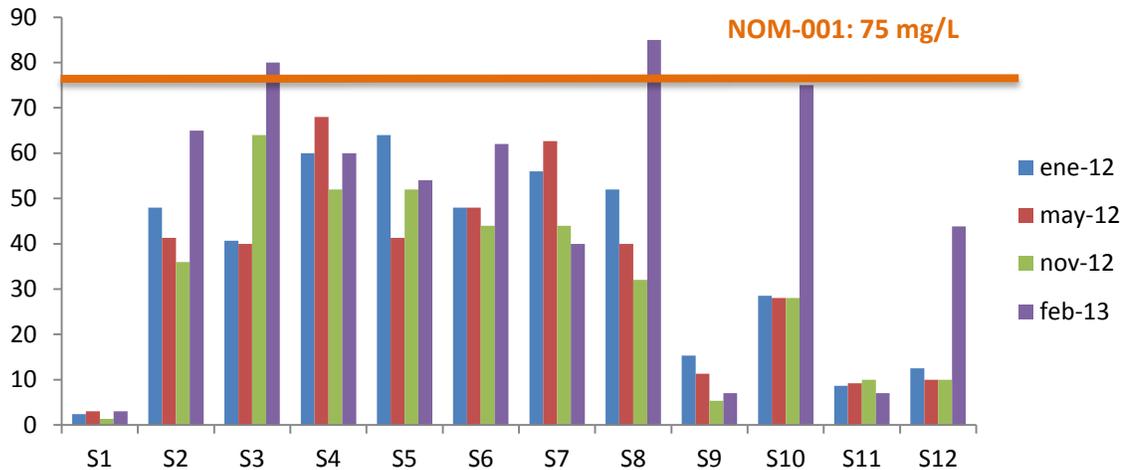
8.1.3.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Las concentraciones de DBO₅ encontradas en el estudio se muestran en la Gráfica 9, donde se observa un comportamiento similar a la DQO, solo que esta tiene una concentración menor debido a que solo considera la materia orgánica biodegradable.

Las concentraciones de DBO₅ más altas se encuentran en la zona de Morelia en los sitios S2, S3, S4, S5, S6, S7 y S8, ya que es aquí donde recibe la mayor cantidad de las descargas domésticas e industriales de la ciudad de Morelia, Atapaneo y La Goleta, las concentraciones más bajas se obtuvieron en el S1, S9, S10, S11 y S12, esto provocado a que en estos sitios se encuentra cercanos a poblados pequeños, donde la cantidad de aguas residuales es menor, pero cabe destacar que en el muestreo de feb-13 aumentó la concentración de DBO₅ en los sitios S10 y S11, esto se puede deber a que existe un incremento de materia orgánica, otro factor importante es que en esa época se tiene poco ingreso de agua al río por lo que la cantidad de agua es menor, y, por lo tanto, se tiene mayor concentración de parámetros.

Es importante mencionar que debido a que las concentraciones de DBO₅ y DQO disminuyen conforme llegan a la desembocadura del río Grande el aporte de carga orgánica al lago de Cuitzeo no es significativo.

De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996, las concentraciones se encuentran por debajo del límite permisible de 150 mg L⁻¹ promedio diario para riego.



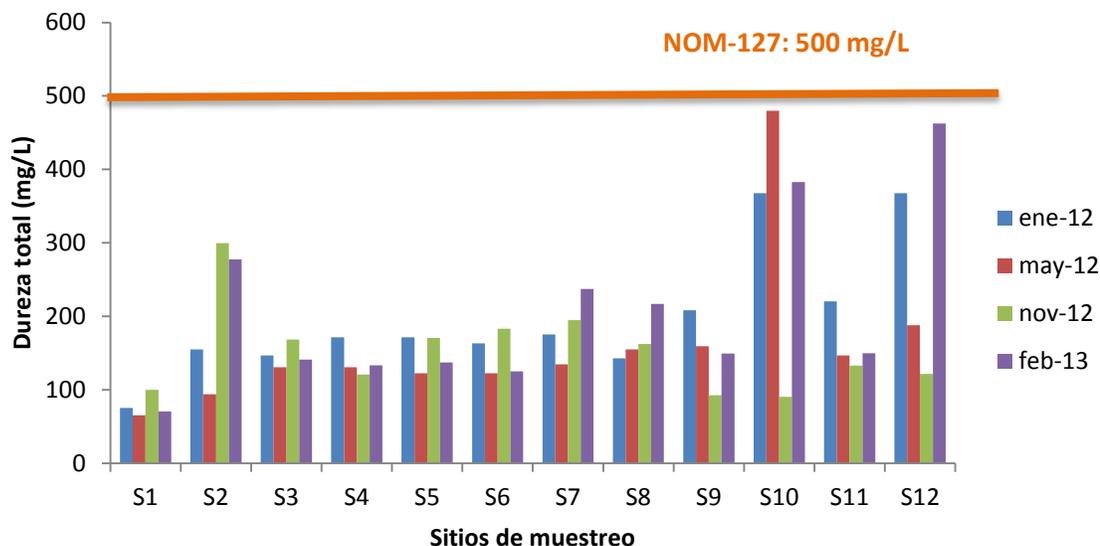
Gráfica 9.- Concentraciones de DBO5 en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.3.3. Dureza total

La dureza total es un parámetro directamente relacionado con la alcalinidad, el cual tiene un carácter natural y corresponde al lavado de terrenos, se encontró que los valores de dureza total obtenidos en este estudio fueron un poco más bajos que la alcalinidad total, indicando que el contenido de Ca²⁺ y Mg²⁺ fue menor a los bicarbonatos que se forman, pero aunque se dé esto sigue siendo aportador de Ca²⁺ y Mg²⁺ a los cultivos agrícola que utilizan el agua del río Grande para riego, provocando problemas en suelo y las plantas, disminuyendo la captación de nutrientes.

La dureza total se observa en la Gráfica 10 en la cual podemos apreciar que las concentraciones más elevadas se encuentran en la desembocadura del río Grande, lo cual nos permite suponer que existe arrastre de partículas como se vio también en los diferentes parámetros que las involucran, como los SDT, ST, SS, SST y la C.E., el comportamiento de estos parámetros nos reafirman que los metales pesados pueden estar en suspensión uniéndose a ciertas partículas las cuales pueden ser arrastradas hacia los cultivos donde el agua es utilizada y hacia el lago de Cuitzeo donde existe vida acuática, aunque también por las características del pH se favorece a la precipitación de partículas llevándose así la mayor cantidad de metales pesados al fondo del río Grande.

De acuerdo a la NOM-127-SAA1-1994, el límite máximo permisible es 500 mg L⁻¹ para el uso humano, por lo que las concentraciones de dureza encontradas se encuentran dentro de la Norma Mexicana.



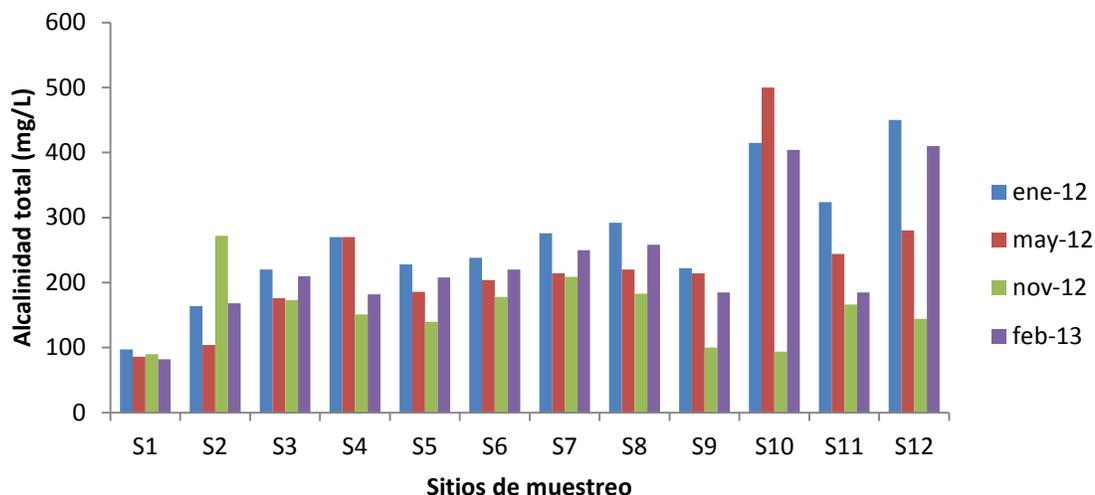
Gráfica 10.- Concentraciones de la dureza total en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.3.4. Alcalinidad total

La alcalinidad encontrada se debe mayormente a los HCO_3^- esto debido al pH que presenta el agua el cual favorece a la formación de esta especie química. Este parámetro ayuda a la estabilidad del cuerpo de agua, ya que las concentraciones no se encuentran muy altas, actuando como amortiguadora para los cambios de pH, por esta razón el pH se encuentra en valores neutros y un poco básicos como se vio anteriormente.

El comportamiento de la alcalinidad se observa en la Gráfica 11, en los diferentes muestreos estudiados se presentaron concentraciones similares, esto debido a que el pH a lo largo del año no presenta grandes variaciones; en los sitios S10, S11 y S12 se observa que las concentraciones fueron muy diferentes esto se debe a que el tipo de suelo hace que el pH varíe un poco hacia lo alcalino.

Las concentraciones de este parámetro fueron incrementando conforme esté llega a su desembocadura reafirmando el arrastre de sales y partículas a lo largo del río, así mismo también la movilidad de los HCO_3^- los cuales predominan el río y estos son como ya se menciona los principales aportadores de alcalinidad.

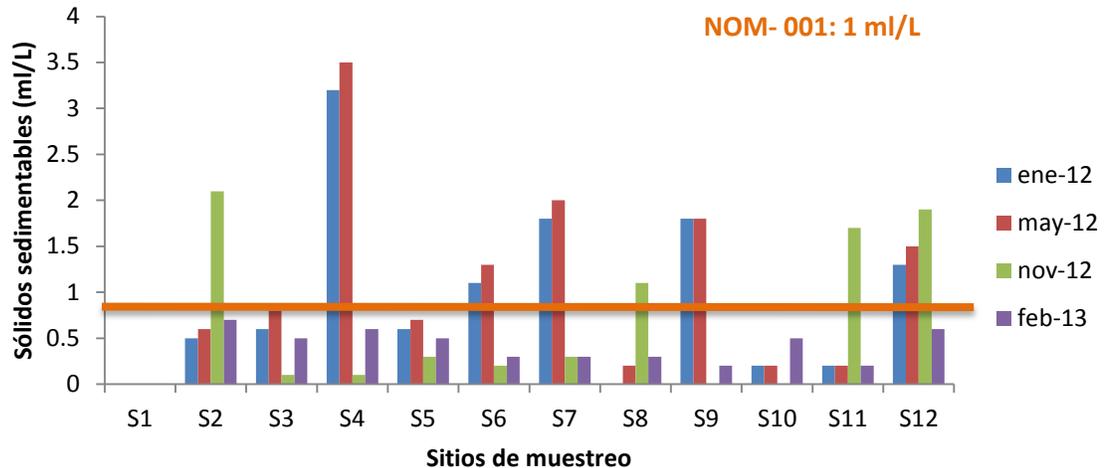


Gráfica 11.- Concentraciones de la alcalinidad total en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.3.5. Sólidos sedimentables

El comportamiento de las concentraciones de sólidos sedimentables en el río Grande se muestra en la Gráfica 12, en la cual se observa que el S1 no presenta concentraciones de este tipo de sólidos, en los sitios S3, S4, S5, S6 y S7 las concentraciones más bajas se obtuvieron en el muestreo de noviembre, en el S4 se obtuvieron las concentraciones más elevadas de todo el estudio en los muestreo de enero y mayo, los sitios S2, S11 y S12 presentaron las concentraciones más altas en noviembre; como se observa el comportamiento es muy irregular en todos los muestreos realizados, indicándonos así que existe una alta variación en el ingreso y salida de sólidos sedimentables.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece para uso de riego agrícola el límite máximo permisible promedio diario de 1 ml L^{-1} , por lo que los sitio de S4, S6, S7, S9 y S12 de los muestreo ener-12 y may-12, y los sitio de S2, S8, S11 y S12 del muestreo nov-12, superaron la Normatividad mencionada, esto se debe, a que las características del río Grande permite la unión de partículas coloidales formando así coágulos de mayores diámetros que llegan a sedimentar. Como se menciona anteriormente las partículas coloidales tienen una alta retención de metales pesados, por lo que se espera que los sólidos sedimentables los lleven al fondo del cuerpo de agua, encontrándolos en mayores proporciones en sedimentos que en agua, esto se puede observaren los sitios S4, S6, S7, S8, S11, S12 y S2 ya que es donde se tienen las mayores concentraciones de sólidos sedimentables.



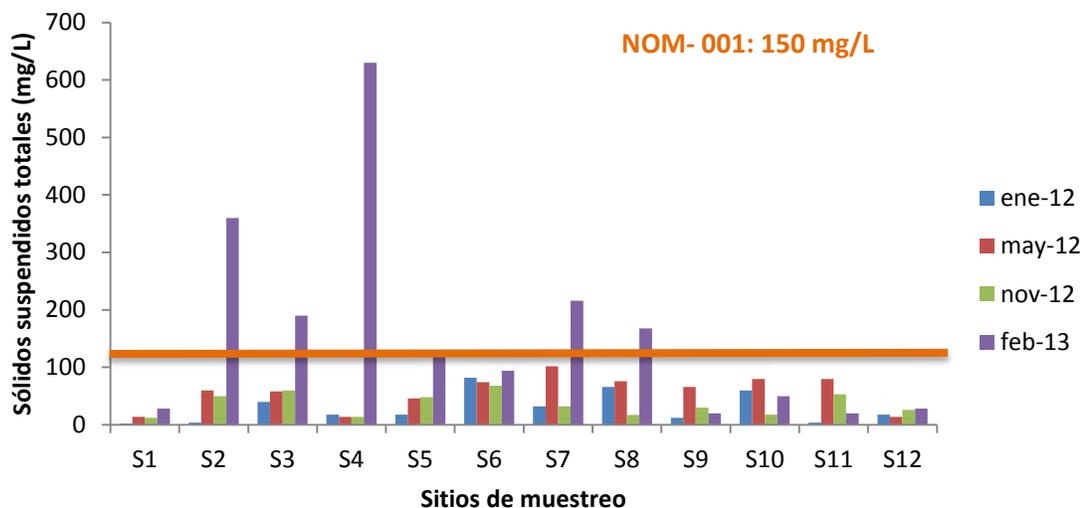
Gráfica 12.- Concentraciones de los sólidos sedimentables en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.3.6. Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales se presentan en la Gráfica 12, teniendo en las primeras tres campañas de muestreo un comportamiento similar a lo largo del río Grande, en la cuarta campaña se tuvo un incremento de la concentración los sitios de S2, S3, S4, S5, S7 y S8, después las concentraciones disminuyeron conforme llegaban a la desembocadura del río. El incremento de concentraciones de este parámetro nos indica que existe el ingreso de sólidos suspendidos totales en el río Grande de descargas residuales ya que en el sitio S2 se encuentra la descarga de la papelería, en el sitio S4 desemboca el río Chico, en los sitio S5 está en el libramiento Lomas de Morelia donde existe varias descargas domésticas, los sitios S7 y S8 se encuentran las descargas de los poblados de Atapaneo y La Goleta.

Considerando las cantidades encontradas de sólidos suspendidos totales nos indican también que para el caso de metales pesados estos pueden estar en suspensión en el agua dándoles una disponibilidad para que ingresen a los cultivos agrícolas y también para ser transportados a lago de Cuitzeo.

De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 el límite máximo permisible para el uso de agua en riego agrícola es de 150 mg L^{-1} , por lo que el muestreo de feb-13 supero esta Norma, teniendo la concentración más alta con 630 mg L^{-1} en el sitio de S4 la cual corresponde al río Chiquito, mostrándonos así que es un gran aportador de contaminación para el río Grande ya que varios parámetros en este sitio presentan concentraciones elevadas.



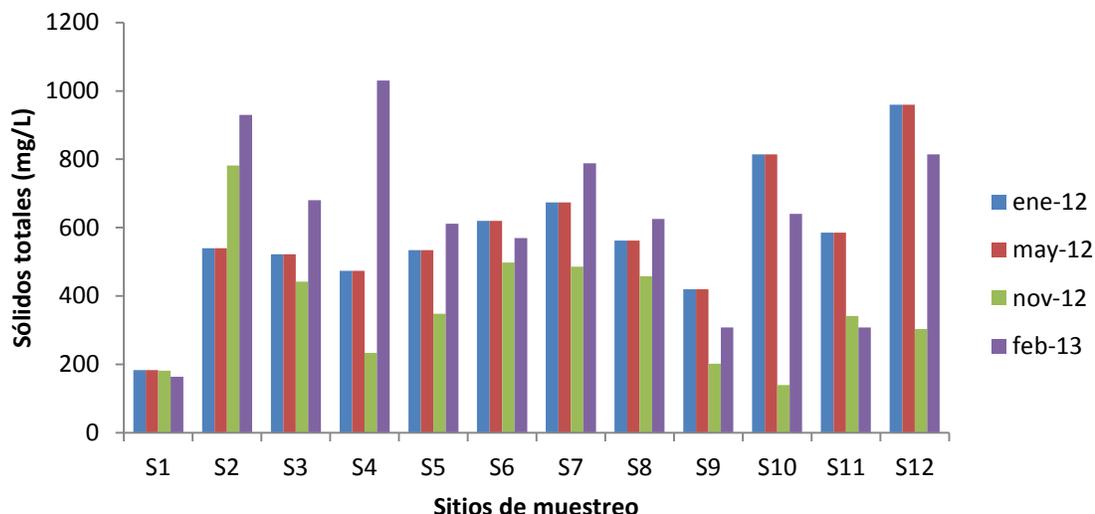
Gráfica 13.- Concentraciones de los sólidos suspendidos en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.3.7. Sólidos totales

Las concentraciones de los sólidos totales se encuentran oscilando entre los 200 y 1000 mg L⁻¹ en el río Grande, lo cual lo podemos observar en la Gráfica 12.

Los muestreos de ene-12 y may-12 presentan un comportamiento similar en todos los sitios estudiados, en cuanto al muestreo de feb-13 aquí se tuvo un aumento de concentración, y finalmente para el muestreo de nov-12 tuvo un comportamiento muy diferente ya que sus concentraciones disminuyeron con respecto a los otros muestreos, esto debido a que se presentaron lluvias en esta temporada, promoviendo la disolución de los sólidos en el agua y una mayor fluidez de estos hacia la desembocadura del río Grande.

Como observamos las concentraciones de los sólidos totales van aumentando a lo largo del río, esto implica grandes consecuencias en la calidad del agua del río Grande una de las más importantes es que debido a esto se incrementa la turbiedad al cuerpo de agua impidiendo la penetración de la luz, la cual limita a las diferentes reacciones química que se llevan a cabo en el agua, también es un factor importante como ya se venía mencionado para la retención de metales pesados donde estos pueden precipitar a los sedimentos o pueden ser transportados a lo largo del río, ingresando a los cultivos agrícolas y al lago de Cuitzeo donde ahí existe vida acuática agravando el problema ya que parte de la población de Cuitzeo se alimenta de este lago.



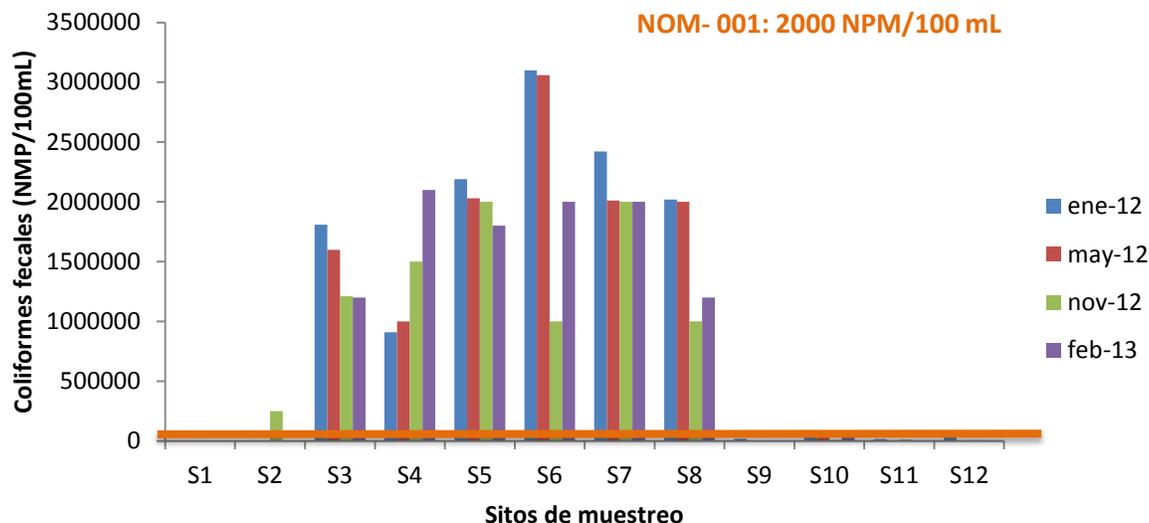
Gráfica 14.- Concentraciones de los sólidos totales en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.4. Coliformes fecales

Las concentraciones de coliformes fecales se muestran en la Gráfica 12, en la cual podemos observar que las cuatro campañas de muestreo se comportan de manera similar, teniendo las mayores concentraciones en la zona de Morelia, esto debido posiblemente a las diferentes descargas municipales que se realizan ahí. El río Grande presenta un grado de recuperación después del sitio S8 donde las concentraciones de coliformes fecales comienzan a disminuir, esto se debe a que el ingreso de aguas residuales es menor y a que el río tiene una mayor movilidad beneficiando así a diferentes parámetros como el O.D que hacen que la materia orgánica se degrade más rápido, la concentración más baja se obtuvo en el sitio S1 con $20 \text{ NPM } 100\text{mL}^{-1}$ y la mayor en el sitio de S6 con $3 \times 10^6 \text{ NPM } 100\text{mL}^{-1}$.

Este parámetro es muy importante ya que puede ocasionar varias enfermedades que pueden causar la muerte de los seres vivos, para el riego agrícola se debe tener mucho cuidado primordialmente en el caso de las hortalizas ya que estas son más susceptibles al ataque de microorganismos patógenos debido a que están directamente en contacto con el agua y se necesitan sustancias fuertes para su desinfección, ya que existen microorganismos que resisten ciertas sustancias químicas al momento de su lavado. En cuanto al contacto con especies acuática como peces estos al momento de ingerir el agua ingresan a ellos estos microorganismos los cuales atacan al animal y permanecen en él, que al momento de que los seres vivos ingerimos este alimento también ingerimos todos los microorganismos patógenos.

De acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 el límite máximo permisible para uso humano debe de ser ausente, por lo que todos los sitios estudiados rebasan esta Normatividad Mexicana, la NOM.001-SEMARNAT-1996 estable para riego un valor de $1,000$ y $2,000 \text{ NPM } 100\text{mL}^{-1}$ por lo que los S1, S2, S3 y S4 se encuentran dentro de la Norma pero los demás sitios rebasan este límite por cantidades muy altas.



Gráfica 15.- Concentraciones de los coliformes fecales en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.5. Componentes mayoritarios

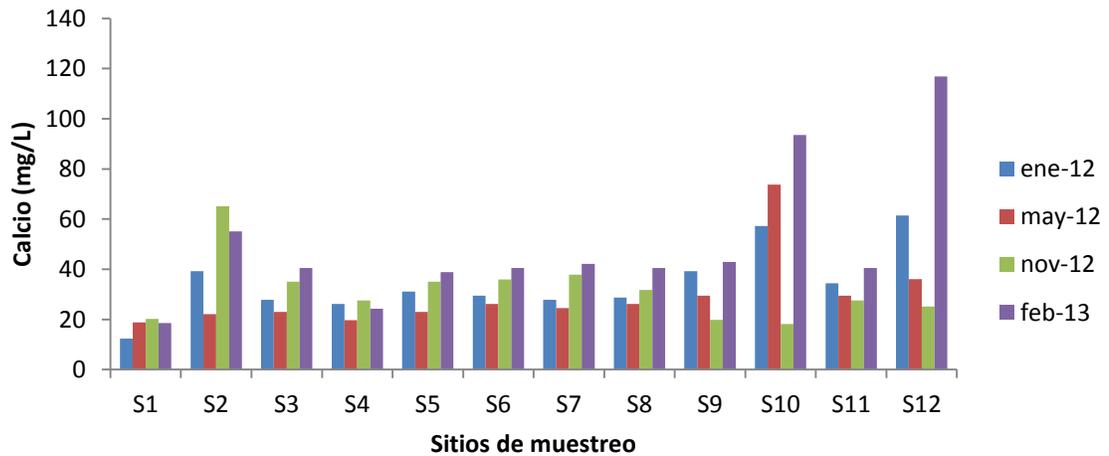
Las concentraciones de los componentes mayoritarios se encuentran en el Cuadro 13 del Anexo A.

8.1.5.1. Calcio, magnesio y sodio (Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+)

Las sales de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ son las que le dan la dureza al agua, si estas son utilizada para riego como es el caso de este estuio pueden llegar a ocasionar problemas para las tierras de cultivo, ya que por su alta concentración pueden inhibir la adsorción de nutrientes del suelo causando deficiencias en los cultivos. El Ca^{2+} suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos o sulfatos. En aguas dulces las concentraciones se encuentran entre 10 y 250 mgL^{-1} (OMS, 2011), por lo tanto las concentraciones de calcio en el río Grande se encuentra en este rango, que se podría decir que en su totalidad de origen natural.

Cabe destacar que el Ca^{2+} se encuentra en forma de ión y puede reaccionar con diferentes especies químicas como los carbonatos y bicarbonatos así como los sulfatos los cuales en nuestro caso se encuentran en concentraciones elevadas debido a el pH que tiene el río el cual favorece a la formación de estas especies químicas, también reacciona con los metales pesados, dándoles así una alta movilidad a lo largo del río (Alfaro, 2010).

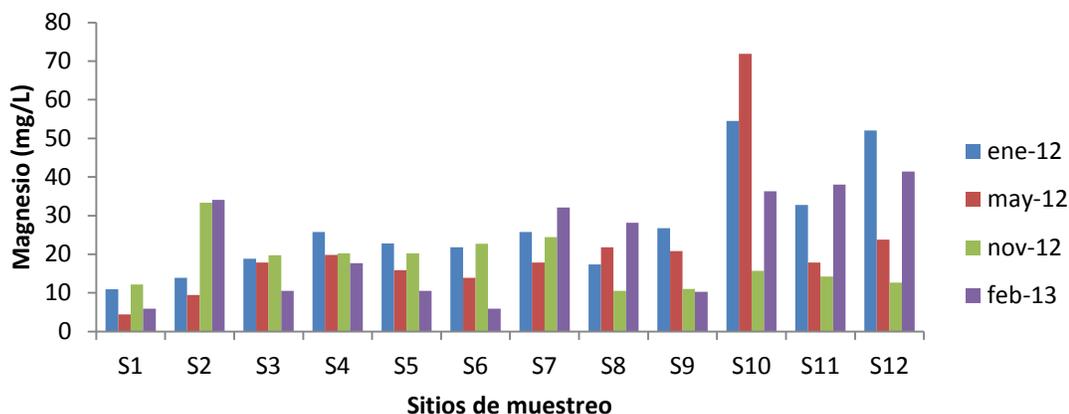
Las concentraciones de Ca^{2+} se observan en la Gráfica 16, la cual nos muestra que el comportamiento de las cuatro campañas de muestreo esperecido, se observa también que los sitios que presentan mayores concentraciones de Ca^{2+} son S2, S10 y S12, en la zona de Morelia la concentración permanece estable entre 20 y 40 mg L^{-1} de Ca^{2+} .



Gráfica 16.- Concentraciones de calcio en el agua del río Grande de Morelia.

Las concentraciones de Mg^{2+} son menos abundantes que el Ca^{2+} en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas, evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos. En aguas naturales el contenido del ion magnesio no suele sobrepasar los 40 mg L^{-1} . En la Gráfica 17 observamos que en las aguas del río Grande contienen mayor concentración de Mg^{2+} que de Ca^{2+} , pero cabe señalar que la diferencia de concentraciones no es muy alta. El Mg^{2+} presenta un comportamiento de aumento de concentración conforme llega la desembocadura del río Grande, ya que el valor más bajo se obtiene en el sitio S1 y el mayor en los sitios de S11 y S12, esto indicándonos un arrastre de Mg^{2+} a lo largo del río.

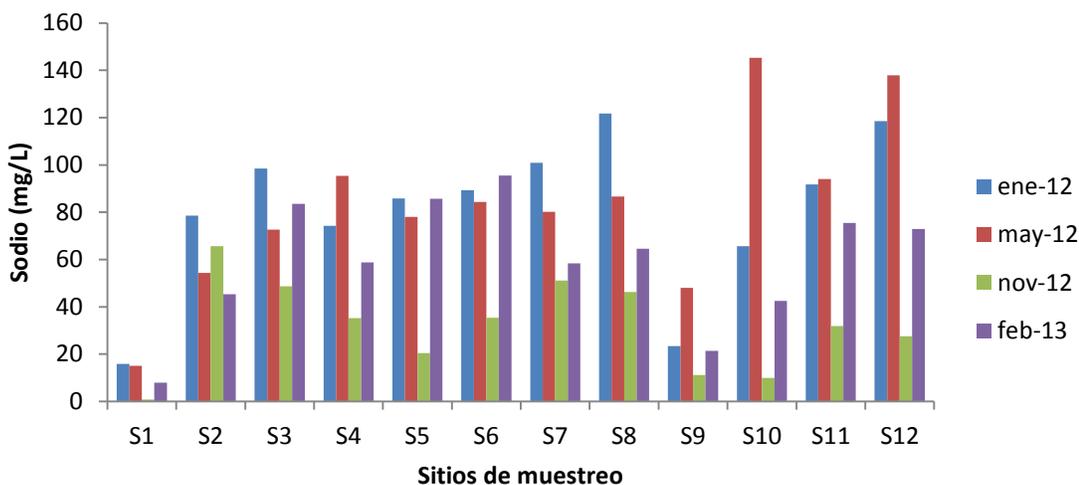
Las bajas concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} encontradas son indicativos de que el contenido de estos metales alcalinotérreos se debe a que está llevando a cabo el proceso de precipitación de especies carbonatadas por los valores de pH encontrados y alcalinidad, así como la baja solubilidad de estos compuestos, lo cual favorece a una mayor capacidad amortiguadora, permitiendo que disminuyan las variaciones del valor de pH como resultados del efecto regulador del sistema de carbonatos.



Gráfica 17.- Concentraciones de magnesio en el agua del río Grande de Morelia.

Las sales de Na^+ son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso de las sales de Ca^{2+} . Sin embargo, el Na^+ puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de intercambio catiónico y puede ser intercambiado con Ca^{2+} provocando una disminución de la dureza de las aguas, esto es importante ya que los sedimentos del río Grande presentan en algunos sitios arcillas (Jiménez, 2001).

La concentración de Na^+ fue más alta que el Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo cual lo podemos ver en la Gráfica 18. La concentración más elevada se obtuvo en el sitio S10 en el muestreo de mayo con 145.31 mg L^{-1} , al igual que el Mg^{2+} el Na^+ incrementa conforme llega a su desembocadura.

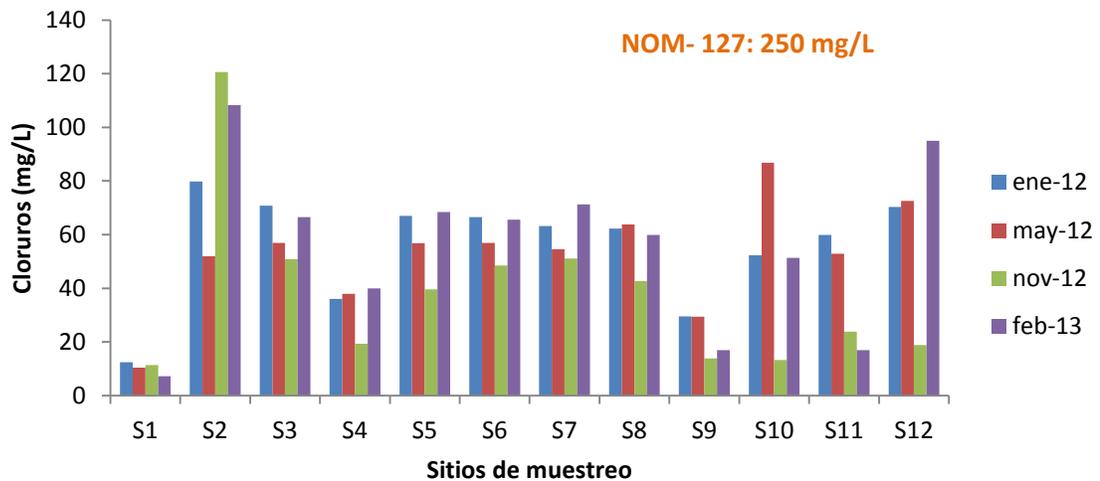


Gráfica 18.- Concentraciones de sodio en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.5.2. Cloruros (Cl^-)

La concentración del Cl^- se muestra en la Gráfica 19, en la cual se observa que la concentración más elevada se obtuvo en el sitio S2 con 120 mg L^{-1} en el muestreo de nov-12, los cuatro muestreos presentaron un comportamiento muy similar a lo largo

del río Grande. Los Cl⁻ en aguas naturales presentan concentraciones inferiores a 50 mg L⁻¹ por lo que todos los sitios a excepción de S1, S4 y S9 superan esta concentración, indicándonos una alta salinidad, al igual que el Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺ afectan los suelos agrícolas, limitándola captación de nutrientes. La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 250 mg L⁻¹, por lo que nuestros sitios se encuentran dentro de Norma, pero cabe mencionar que los Cl⁻ generalmente se vuelven tóxicos a medida que el valor de pH disminuye, la temperatura se incrementa o en algunas ocasiones por la presencia de sustancias como fenoles o amonio con las que se pueden combinar.

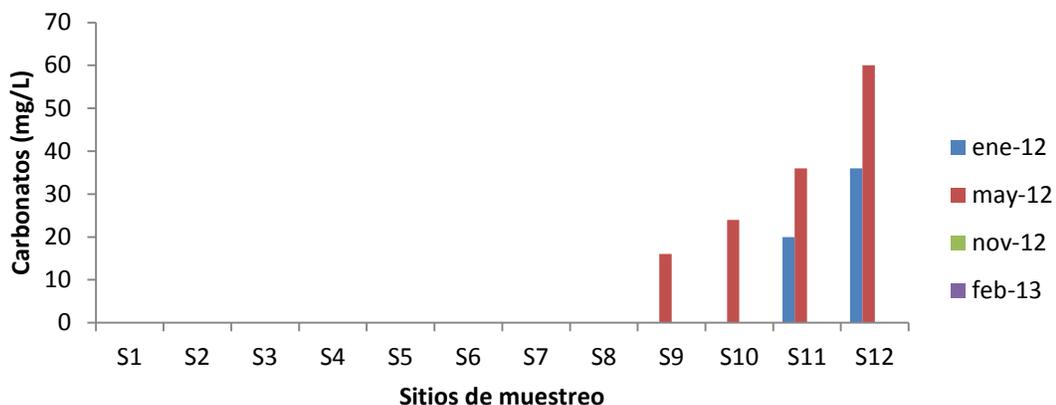


Gráfica 19.- Concentraciones de los cloruros en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.5.3. Carbonatos (CO₃²⁻) y bicarbonatos (HCO₃⁻)

Los carbonatos y bicarbonatos se encuentran de manera natural en los sistemas acuáticos, su proporción depende del valor de pH que se tenga. De acuerdo al sistema de los carbonatos, el CO₃²⁻ empieza a formarse a partir de un valor de pH 8.5, mientras que los HCO₃⁻ se encuentran presentes a partir de valores ligeramente ácidos, por lo que de acuerdo al pH encontrado en nuestro estudio favorece en gran medida a la formación de esta última especie.

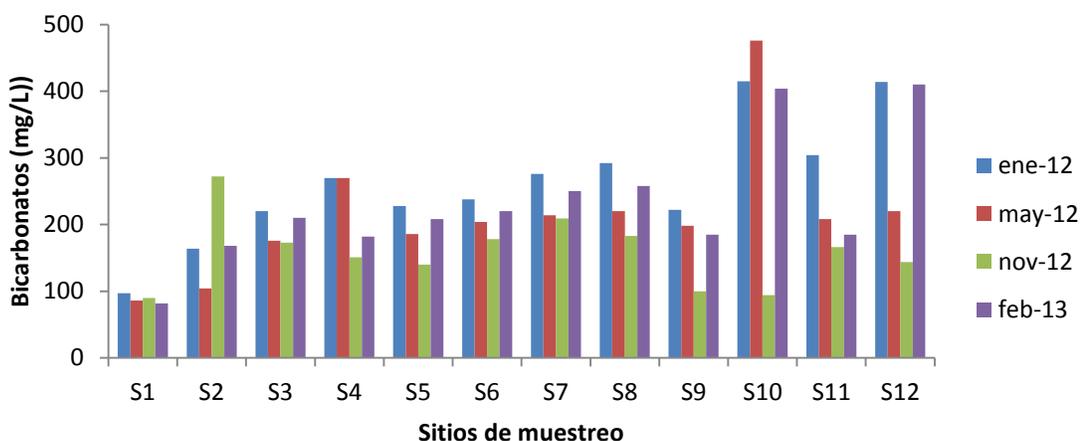
Como era de esperarse de acuerdo al pH obtenido y a la alcalinidad, los CO₃²⁻ casi no se presentaron en los cuatro muestreos, en el muestreo de ener-12 solo dos sitios presentaron valores de 20 y 36 mg L⁻¹, en los sitios de S11 y S12, respectivamente, en cuanto al mes de mayo se presentaron en 4 sitios, iniciando en S9 con un valor de 16 mg L⁻¹ y terminando en el sitio S12 con un valor de 60 mg L⁻¹, que fueron los sitios que presentaron los valores de pH más alcalinos ya que estos sitios se encuentran en la desembocadura del río donde se tiene mayor contacto con el Lago de Cuitzeo el cual tiene un pH básico, lo cual lo podemos observar en la Gráfica 20.



Gráfica 20.- Concentraciones de carbonatos en el agua del río Grande de Morelia.

Los bicarbonatos se encontraron en mayores concentraciones como ya se esperaba, esto se muestra en la Gráfica 21, debido al pH neutro con ligera tendencia ácida que se obtuvo. Los valores más bajos se encontraron en el sitio S1 el cual se encuentra en el manantial La Mintzita, en los cuatro muestreos, en el primer, segundo y cuarto muestreo el valor más alto se obtuvo en el sitio de S9 con 415, 476 y 404 mg L⁻¹ respectivamente, en el tercer muestreo se obtuvo en el sitio S2 con el valor de 272 mg L⁻¹. La concentración de HCO₃⁻ se incrementa conforme el río Grande llega a su desembocadura, teniendo un arrastre de esta sal a lo largo del río.

Estas especies tienen una alta afinidad por unirse a metales pesados, los cuales pueden hacer que precipiten o mantenerlos en suspensión en el cuerpo de agua y así darles una mayor disponibilidad para que las especies acuáticas los ingresen.



Gráfica 21.- Concentraciones de bicarbonatos en el agua del río Grande de Morelia.

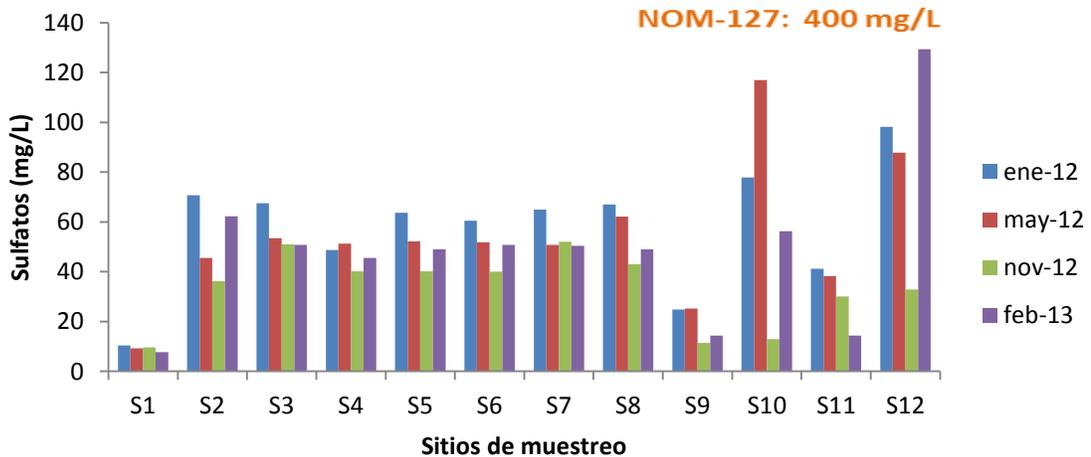
8.1.5.4. Sulfatos (SO₄²⁻)

Las concentraciones de SO₄²⁻ se muestran en la Gráfica 22, aumentando a lo largo del río probablemente al arrastre de partículas sólidas. El comportamiento de los

muestreos es muy similar a excepción del mes de noviembre en el cual su concentración es menor en comparación con los otros muestreos.

Los SO_4^{2-} al igual que todas las sales antes mencionadas presentan una gran interacción entre ellas y los metales pesados, provocando su retención, manteniéndolos en suspensión en el río Grande. Aunque las concentraciones son mayores los sulfatos y bicarbonatos, las demás sales siguen siendo también importantes ya que no dejan de estar en el sistema.

El valor más elevado se obtuvo en el muestreo feb-13 en el sitio de S12 con 129.35 mg L^{-1} y a su vez el valor más bajo se obtuvo en S1, indicándonos de nuevo que existe el arrastre de partículas hacia el Lago de Cuitzeo. La NOM-127-SSA1-1994 establece el límite máximo permisible de 400 mg L^{-1} por lo que las concentraciones de este estudio se encuentran dentro de la Norma.



Gráfica 22.- Concentraciones de los sulfatos en el agua del río Grande de Morelia.

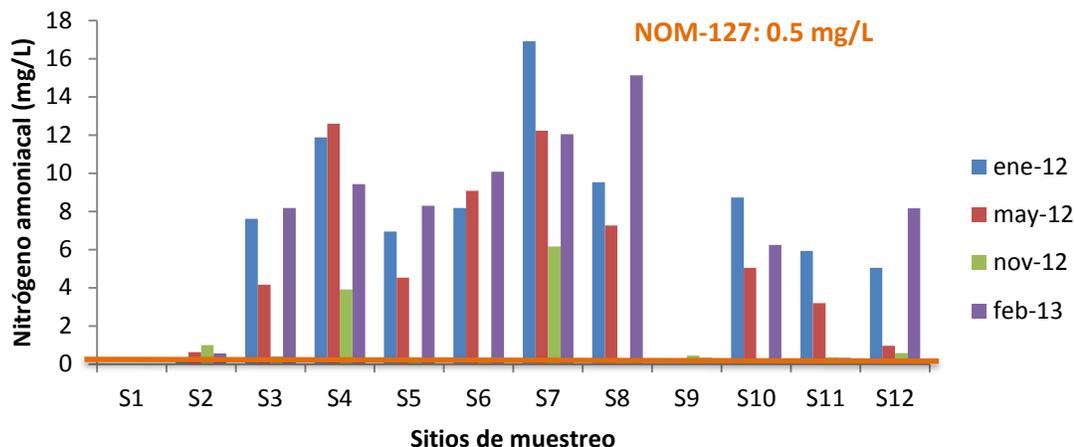
8.1.5.5. Nitrógeno amoniacal (N-NH_3)

El comportamiento del N-NH_3 en los muestreos de ene-12, may-12 y feb-13 fue similar presentando la mayor concentración en los sitios de S3, S4, S5, S6, S7, y S8 los cuales se encuentran en la zona de Morelia, Atapaneo y La Goleta, en el muestreo de nov-12 la concentración disminuyó considerablemente ya que en los otros muestreos se alcanzaron concentraciones por arriba de 6 mg L^{-1} y en este muestreo la concentración más alta fue ésta. Los sitios de S10, S11 y S12, presentaron concentraciones que oscilan entre 2 y 9 mg L^{-1} , lo cual se observa en la Gráfica 23. Las concentraciones encontradas en los cuatro muestreos rebasan el límite permisible de 0.5 mg L^{-1} de N-NH_3 propuesto por la Normatividad Mexicana.

Este parámetro es un indicador de la presencia de materia orgánica mineralizada en el agua tanto antigua como reciente, también nos indica si existen zonas anaeróbicas, tiene un comportamiento similar a la DBO_5 , esto debido a que ambos son indicativos de contaminación por materia orgánica, el nitrógeno amoniacal nos aporta la información de si el río Grande está recibiendo aportes de aguas residuales

agrícolas, y por lo obtenido se observa que se tiene un gran aporte de nutrientes de los sitios cercanos a la ciudad de Morelia, Atapaneo, La Goleta y Álvaro Obregón.

Observando la Gráfica 24 apreciamos que los sitios que presentan las mayores concentraciones N-NH₃ son los que atraviesan la zona de Morelia, Atapaneo y La Goleta, que es donde se tienen las mayores descargas residuales.



Gráfica 23.- Concentraciones de nitrógeno amoniacal en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.6. Metales pesados y As

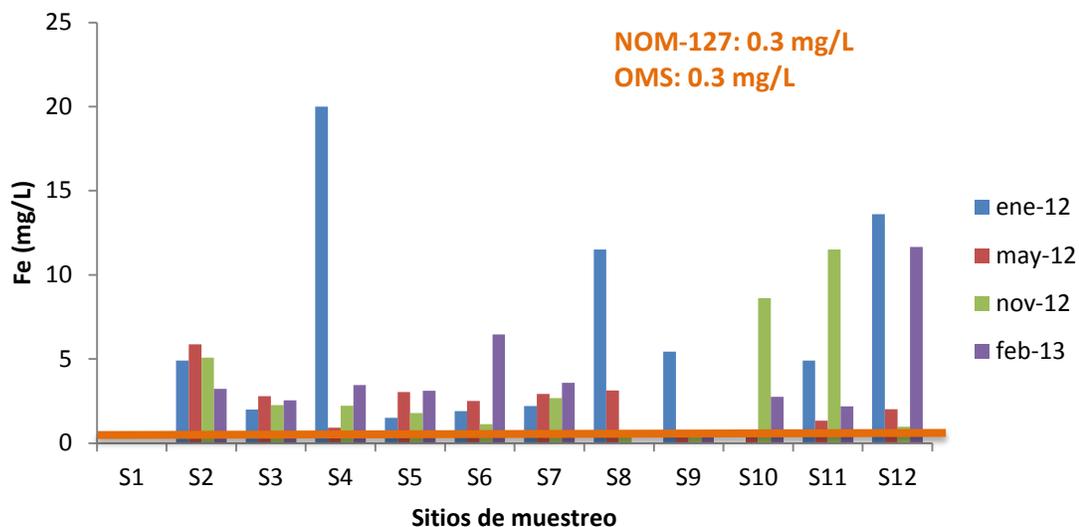
Las concentraciones de Fe, Zn, Ni, Cu, Pb, Cd, Cr, Ag y As en agua se muestran en el Cuadro 14 (Anexo B), en el cual podemos observar que las concentraciones más altas que se detectaron fueron las de Fe, Zn, Cu y As.

8.1.6.1. Hierro (Fe)

Los resultados obtenidos de las concentraciones de Fe en las cuatro campañas de muestreo se observan en la Gráfica 24, en la cual podemos observar que las concentraciones de Fe se encuentran en todos los sitios a excepción del S1, las concentraciones más elevadas se obtienen en los sitios S4, S8, S9, S10, S11, S12 en los muestreo de enero y noviembre, la concentración más alta de los cuatro muestreos se presentó en mayo en el sitio de S4 con 20 mg L⁻¹.

Debido al pH encontrado el Fe tiende a ser más soluble y por lo tanto a oxidarse, precipitándose y llegando a los sedimentos del río Grande, por lo que la presencia del Fe en sedimento es mucho mayor que en el agua. Aunque el Fe no se considera peligroso, en su forma Fe³⁺ en concentraciones muy elevadas llega a causar efectos nocivos para la salud humana.

Las concentraciones de Fe obtenidos en las cuatro campañas de muestreo superan el límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-1994 y la OMS, las cuales nos indica un límite de 0.30 mg L⁻¹ para uso humano.



Gráfica 24.- Concentraciones de hierro en el agua del río Grande de Morelia.

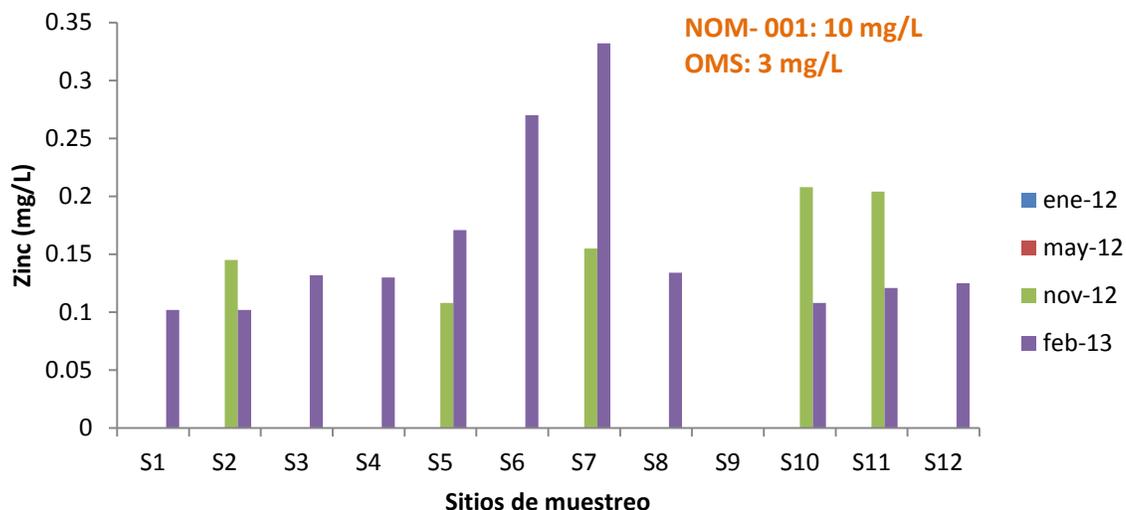
8.1.6.2. Zinc (Zn)

Las concentraciones de Zn obtenidas en los cuatro muestreos realizados se observan en la Gráfica 25. Como se puede apreciar la presencia de Zn solo se observó en dos muestreos: nov-12 y feb-13, en este último presentando la concentración más alta con 0.332 mg L^{-1} en el sitio de S7.

El Zn que se presentó en la campaña de nov-12 de acuerdo a su comportamiento que es puntual se podría considerar que proviene de la agricultura ya que los sitios donde se presenta tenían sembradíos cercanos, así también para el Zn del muestreo de feb-13 se observa que éste se va acumulando a lo largo del río hasta llegar el sitio de S9 donde la concentración disminuye y luego vuelve a incrementa hasta llegar a su desembocadura. Esto nos indica que existe ingreso de Zn por las descargas residuales y agrícolas de la zona.

De acuerdo al pH y a la dureza encontrada el Zn se vuelve insoluble en agua por lo que se asocia con OH^- y H^+ , formando sales la cuales aportan en gran medida turbidez, también debido a esta insolubilidad el Zn tiende a precipitarse y permanecer en los sedimentos, por lo que las concentraciones son más altas en ellos que en agua.

El Zn elemental no es peligroso pero en cantidades excesivas puede ser toxico para la salud humana y animal, cuando se une a compuesto de arsénico o cianuro pueden formar compuesto altamente tóxicos y que en pequeñas concentraciones pueden llegar hacer letales. Las concentraciones de Zn detectadas se encuentran por debajo de los límites permisibles de la Normatividad Mexicana ya que la NOM-001-SEMARNAT estable un valor de 10 mg L^{-1} para uso de riego agrícola y la NOM-127-SSA1 que establece de 5 mg L^{-1} para uso humano.



Gráfica 25.- Concentraciones de zinc en el agua del río Grande de Morelia.

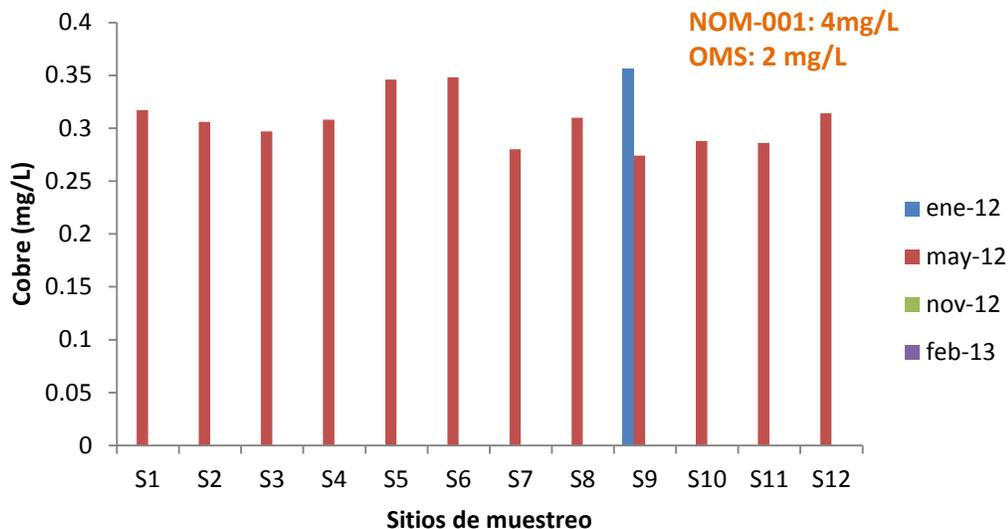
8.1.6.3. Cobre (Cu)

La presencia de cobre solamente se observó en el muestreo de mayo-12 con concentraciones entre 0.25 y 0.35 mg L⁻¹ y en el S9 en ene-12 con una concentración de 0.356 mgL⁻¹ (Gráfica 26).

El pH encontrado en el estudio favorece a tanto al Cu²⁺ como a su oxidación, por lo cual el Cu puede permanecer en disolución en el agua o precipitar en los sedimentos, pero debido a las altas concentraciones de turbiedad y de sólidos encontrados se incrementa el fenómeno de precipitación, por lo que las concentraciones más altas se encuentran en los sedimentos el río Grande.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece el límite máximo permisible de 4 mg L⁻¹ para uso de riego agrícola, por lo que el Cu se encuentra dentro de norma. Cabe mencionar que el cobre es esencial para los seres vivos en concentraciones bajas, pero al igual que muchos metales en concentraciones elevadas pueden llegar a ocasionar la muerte. Aunque el cobre encontrado solo se presentó como ya se mencionó en los muestreos de enero y mayo del 2012, por lo que existe una alta movilidad de este metal tanto en su entrada como en la salida del río, llegando así a los diferentes cultivos agrícolas y a los animales que toman de esta agua.

Como se sabe los metales son persistentes ya que son bioacumulables, por lo que si se está consumiendo en cantidades mayores de 10 mg diarios, podría comenzar a provocar problemas en la salud (OMS, 2011).



Gráfica 26.- Concentraciones de cobre en el agua del río Grande de Morelia.

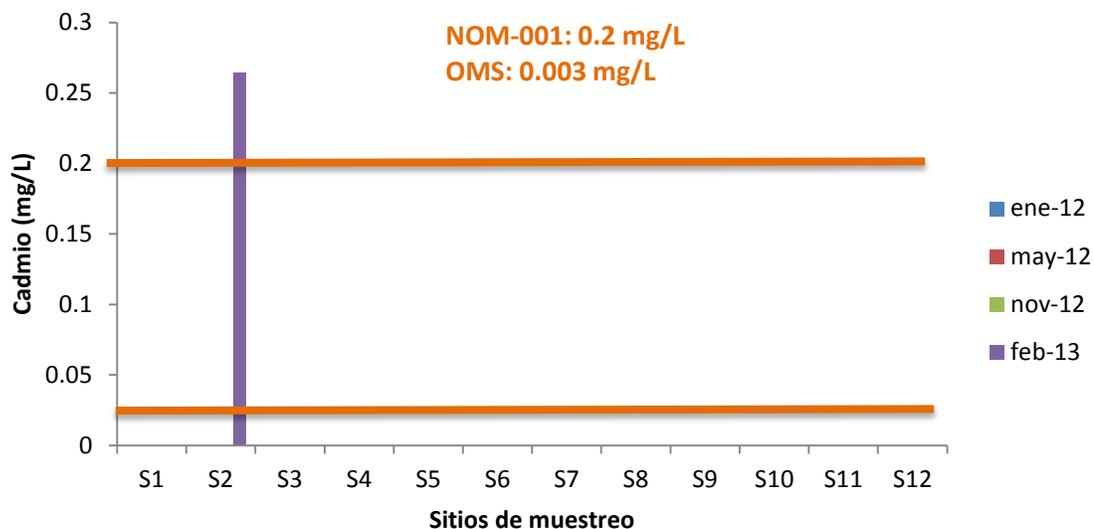
8.1.6.4. Cadmio (Cd)

El Cd se obtuvo solo en una campaña de muestreo y en un solo sitio, lo cual se observa en la Gráfica 27, que fue el sitio S2 en el estudio de feb-13 con una concentración de 0.264 mg L^{-1} , cabe mencionar que la concentración encontrada en este sitio supera el límite máximo permisible de 0.2 mg L^{-1} de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso agrícola así como también supera el límite máximo permisible para uso humano de 0.003 mg L^{-1} de la OMS.

El sitio donde se encontró la única concentración de cadmio es cerca de la desembocadura de las aguas residuales de la planta la papelera, indicándonos así que esta es aportadora de este metal a las aguas del río Grande de Morelia.

De acuerdo a las características del río Grande como el pH, la temperatura y la dureza que presenta el agua del río Grande, provocan que el cadmio se disuelva en el agua, también a estas condiciones se puede oxidar y unirse con sulfatos y con el Zn, pero se favorece más a estar como Cd^{2+} que es su forma más peligrosa y esta aumenta conforme disminuye el oxígeno disuelto y la dureza, por lo que la zona de Morelia incrementa su peligrosidad.

Debido al comportamiento de los SO_4^{2-} y del Zn, el Cd es transportado a lo largo del río Grande, pudiendo ingresar a los cultivos agrícolas donde se tiene que tener mucho cuidado ya que el Cd es muy fácil de ser acumulado en productos agrícolas principalmente en el maíz, arroz, trigo y soja, que son los cultivos que mayormente se siembran en los poblados cercanos a la ribera del río Grande, también puede ingresar al lago de Cuitzeo pero debido a su característica de salinidad hace que las especies acuáticas que habitan ahí tengan mayor resistencia a ser envenenadas por el Cd.



Gráfica 27.- Concentraciones de cadmio en el agua del río Grande de Morelia.

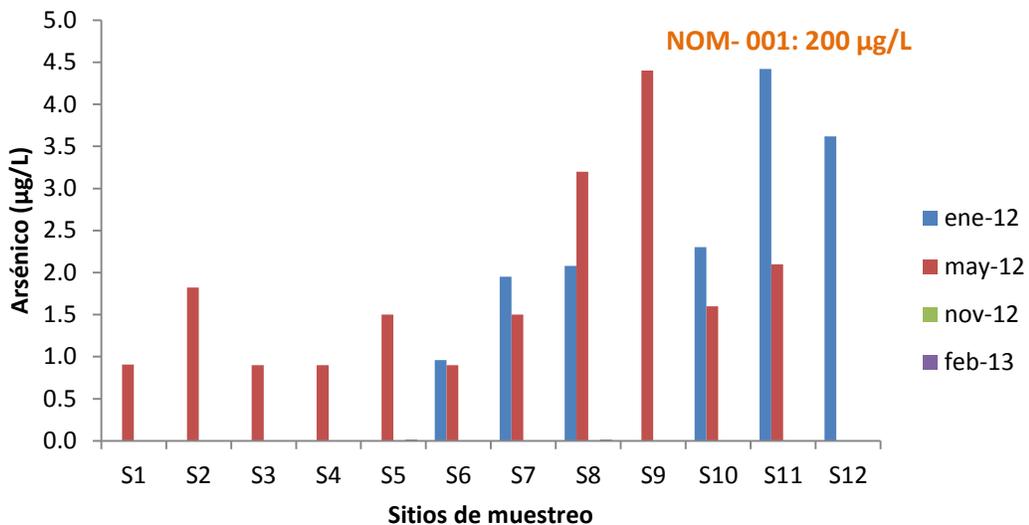
8.1.6.5. Arsénico (As)

Las concentraciones de As en los cuatro muestreos se presentan en la Gráfica28, en la cual podemos observar que las mayores concentraciones se presentaron en la desembocadura del río Grande debido la interacción que existe entre el lago de Cuitzeo el río Grande.El valor más alto se obtuvo en el muestreo de may-12 en el sitio S9 Con $4.5 \mu\text{g L}^{-1}$.En los muestreos de nov-12 y feb-13 no se observó la presencia de este metaloide. Las concentraciones encontradas de As a lo largo del río Grande no superan la Normatividad Mexicana.

El As tiende a oxidarse muy fácilmente a estas condiciones, formando compuestos altamente peligrosos como As_2O_3 y As_2O_5 , el cual a pequeñas dosis llega a ser letal para la salud humana.

Como podemos ver las concentraciones de As encontradas en el estudio son muy bajas, pero de cualquier manera el metaloide se encuentra en el agua y es transportado a los cultivos los cuales tienden a adsorberlo y causarle daño a las plantas, con respecto a la aportación que le da al lago de Cuitzeo realmente no es muy significativa ya que en el lago se encuentran concentraciones mucho más elevadas.

Las concentraciones presentadas del estudio de As no llegan a ser peligroso para la salud de los seres vivos, ya que en proporciones pequeñas llega a ser de beneficio tanto para las plantas como para los animales y los seres humanos.



Gráfica 28.- Concentraciones de arsénico en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.7. Toxicidad

La toxicidad de una muestra aumenta cuando la EC50 disminuye; es decir, a menor valor de EC50, mayor toxicidad. El bioensayo indica la concentración efectiva que redujo la bioluminiscencia de la bacteria en 50%, con una exposición de 15 min.

Se puede observar en la Gráfica 29 y en el Cuadro 6, que en los sitios tanto al inicio como al final del cauce del río no se detectó toxicidad del agua, mientras que pudo apreciarse cierta toxicidad al paso del río por la ciudad de Morelia, la zona industrial, Atapaneo y La Goleta. El lugar que presentó mayor toxicidad del estudio fueron los sitios S7 y S8 ya que presentaron los valores más bajos de EC₅₀.

Los sitios donde se presentó la toxicidad son los que reciben las mayores cantidades de aguas residuales, analizando las concentraciones de metales pesados encontrados se observa que estos si se presentan en los sitios con toxicidad pero no son las concentraciones más elevadas, solo el Zn en el S7 es donde presenta su mayor concentración del estudio. Por lo que se puede creer que la toxicidad no solo se debe a los metales pesados sino también a otro tipo de contaminantes, que podrían ser las altas concentraciones de materia orgánica, también cabe destacar que aunque las concentraciones son bajas de los metales pesados estos son persistentes y acumulativos por lo que es importante recalcar la presencia de Fe, Zn y As.

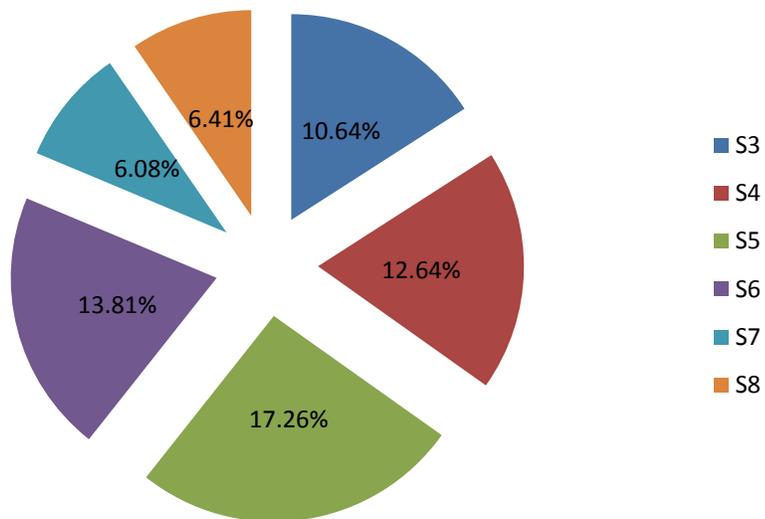
Es importante mencionar que en Atapaneo existe la planta tratadora de aguas que toma una parte de las aguas negras del río Grande y regresa el agua tratada antes del sitio de La Goleta, por lo tanto se observa que no existe un gran efecto benéfico de esta planta ya que los sitios que presentan la mayor toxicidad son Atapaneo y La goleta.

Aunque también en los sitios S1, S2, S10, S11 y S12 presentan concentraciones de metales pesados, debido a las condiciones particulares que se presentan en cada sitio provocan que estos se unan a otros iones donde se llegan a formar compuestos que no son tóxicos, también se da el fenómeno de precipitación el cual disminuye la toxicidad del agua, así como la toma de agua para riego agrícola, la cual comienza desde los primeros sitios llevándose entre el agua diferentes compuestos tóxicos y por último en sitios finales cerca de la desembocadura del río Grande se presentan velocidades más altas que provocan una mayor movilidad arrastrando los metales pesados hacia el lago de Cuitzeo.

Cuadro 6.- Porcentaje de toxicidad del agua en el río Grande de Morelia.

Muestra	EC ₅₀
	%
S1	n.d
S2	n.d
S3	10.64
S4	12.64
S5	17.26
S6	13.81
S7	6.08
S8	6.41
S9	n.d
S10	n.d
S11	n.d
S12	n.d

*nd: no detectado



Gráfica 29.- Toxicidad de EC₅₀ en el agua del río Grande de Morelia.

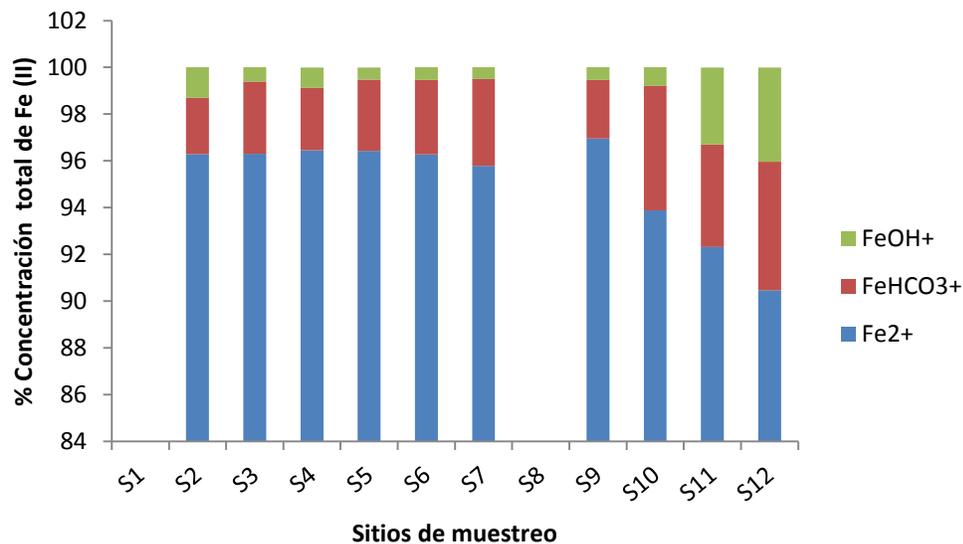
8.1.8. Modelación de la especiación química de los metales pesados

La modelación de la especiación química se muestra en los Cuadros 24, 25 y 26 (Anexo C), la cual se realizó mediante el programa Visual Minteq 3.0, a partir de los valores de temperatura, pH, alcalinidad total y los aniones mayoritarios registrados en el estudio del río Grande. Ésta se aplicó a Fe y Zn, que fueron los metales pesados predominantes.

8.1.8.1. Modelación de la especiación química del Fe

Conocer la especiación del hierro es relevante porque controla la especiación de los metales pesados cuando se encuentra en la forma de oxihidróxido. Las especies químicas del Fe encontrados en los sitios del río Grande se muestran en la Gráfica30.

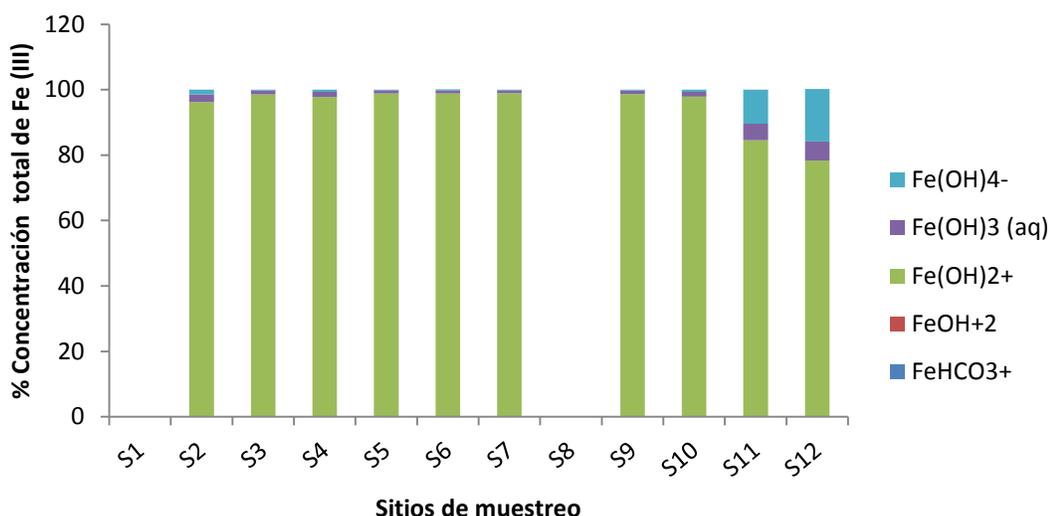
Con respecto al Fe (II) se encontraron tres especies en las cuales predominó el ion Fe^{2+} con un porcentaje arriba del 90% en todos los sitios, esto nos indica que existen descargas recientes de Fe en la columna de agua y también que las condiciones del río Grande favorece a la presencia de Fe como ion libre esto nos sirve como indicativo de que algunos metales pesados puedan estar en esta forma lo cual los hace más peligrosos ya que es más fácil que cuando ingresen a los cultivos agrícolas o a las especies acuáticas ataquen a los diferentes sistemas o tejidos que los conforman y permanezcan en ellos, las otras dos especies encontradas fueron $FeHCO_3^+$ y $FeOH^+$, con un porcentaje menor al 3%, por lo que también nos está indicando que las condiciones del río Grande favorece a las reacciones con OH^- , HCO_3^- , esto era de esperarse por el pH encontrado así como la dureza que favorecen a la formación de estos iones.



Gráfica 30.- Porcentaje de concentración de las especies predominantes de Fe (II) en el agua del río Gran de Morelia.

En cuanto al Fe (III) se encontraron cinco especies, las cuales se muestran en la Gráfica 31, la especie que se encontró con porcentajes por arriba de 96% fue $\text{Fe}(\text{OH})_2$ y después le siguió el $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ con un porcentaje entre el 0.2 y 16%, las demás especies se encontraron por debajo del 2%, por lo que el Fe en esta valencia tiene mucho más afinidad que el Fe (II) por los OH^- y HCO_3^- , es importante mencionar que aunque el Fe no representa una alta peligrosidad para la salud de los seres vivos en su forma Fe^{3+} llega a ser peligroso en altas dosis.

De acuerdo al comportamiento del Fe se aprecia una alta interacción con las sales y los iones libres que se encuentran disueltos en el río Grande formando así las especies predominantes.



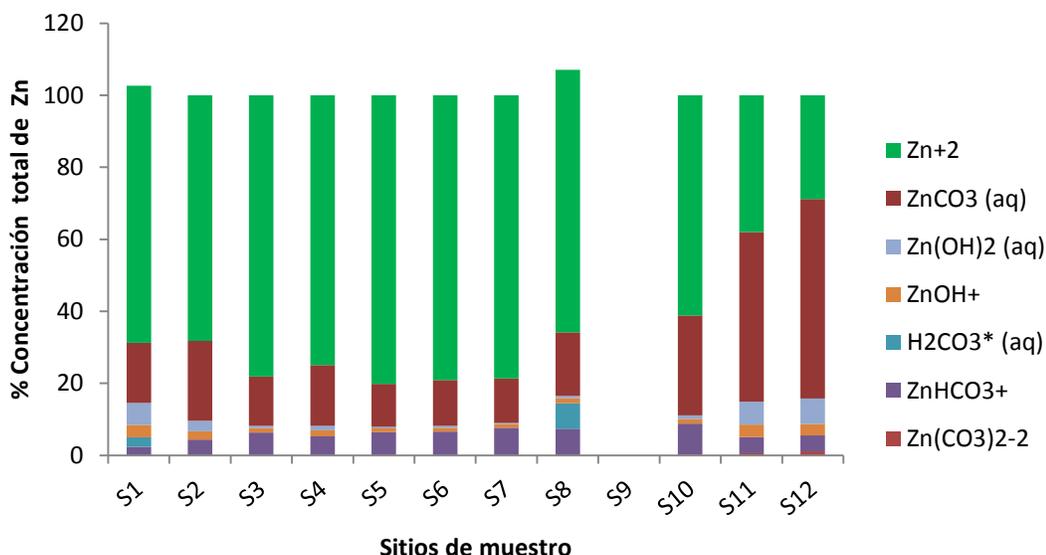
Gráfica 31.- Porcentajes de concentración de las especies predominantes de Fe (III) en el agua del río Grande de Morelia.

8.1.8.2. Modelación de la especiación química del Zn

La especiación química de Zn se muestra en la Gráfica 32, en la cual el mayor porcentaje se dio en la especie Zn^{2+} , entre el 20 y 90%, la especie que le siguió fue $\text{ZnCO}_3(\text{aq})$ con porcentajes el 11 al 50%, las demás especies presentaron porcentajes menores al 11%.

Indicándonos que el Zn se presenta en mayor forma en su ion libre, señalándonos que existen descargas resientes de este metal, esto se comprueba con la fracciones de sedimentos donde este metal se encuentra en las fracciones disponibles, y también se reafirma que los otros metales pesados encontrados en el estudio puedan estar en esta forma, ya que las condiciones del río Grande lo favorecen así mismo también se encontró en forma coloidal ya que este interactúa con los carbonatos que se encuentran en el agua.

El Zinc no representa peligrosidad para la salud de los seres vivos, en consumos excesivos puede llegar a causar problemas para los seres vivos, así también se debe tener cuidado ya que las plantas o las especies acuáticas pueden estarlo ingresando y acumulando haciéndolo más peligroso.



Gráfica 32.- Porcentaje de concentración de las especies predominantes de Zn en el agua del río Grande.

8.1.9. Análisis estadístico

La estadística para este estudio se llevó a cabo mediante un análisis multivariado, ANOVA y la prueba de Tukey, en el cual se utilizaron los parámetros fisicoquímicos y los metales pesados encontrados en el estudio. El análisis de componentes principales se realizó con el programa “Minitab” y el análisis de comparación de medias se llevó a cabo en el programa JMP, los cuales se efectuaron con un nivel de significancia $p < 0.05$.

8.1.9.1. Análisis de componentes principales

El programa analizó todas las variables y las conjuntó en nuevas variables a las cuales les da el nombre de componentes principales(PC), las primeras tres variables creadas representan casi 64% de explicación de todo nuestro sistema (Cuadro 7).

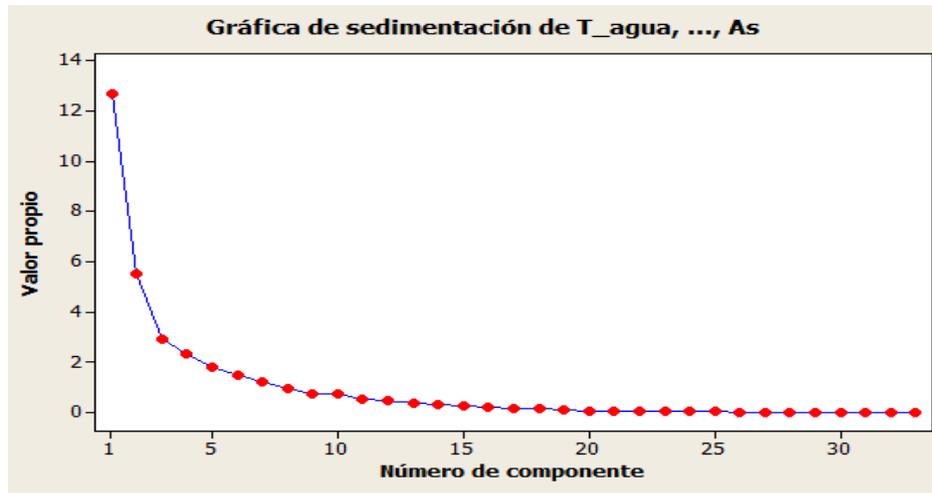
Las variables con mayor peso en el primer componente son: **SDT, Alc. Total, HCO_3^-** , para el segundo componente son: **pH, OD, DQO, DBO_5 , Col. Fec.**, para el tercer componente son: **Na^+ , Cu y As.**

Los valores obtenidos del análisis de componentes principales realizado en el programa Minitab se muestran en el Cuadro 28 (Anexo D), donde se observa el valor porcentual de cada variable creada por el programa, así como el valor que le da a cada uno de los parámetros.

Cuadro 7.- Valor acumulado de las variables creadas por Minitab.

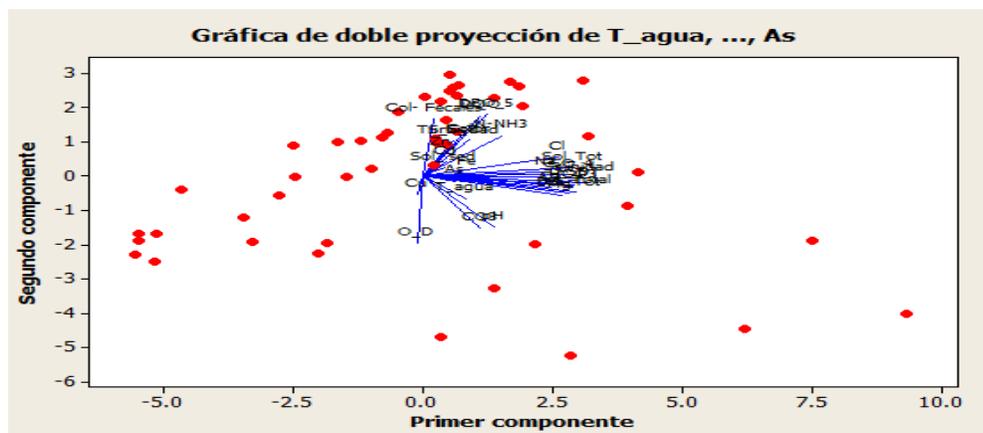
Valor propio	12.707	5.494	2.919	2.317	1.79	1.463	1.223	0.962	0.743
Proporción	0.385	0.167	0.088	0.07	0.054	0.044	0.037	0.029	0.023
Acumulada	0.385	0.552	0.64	0.71	0.764	0.809	0.846	0.875	0.898

Como se observa en la Gráfica 33, las primeras dos variables explican casi un 60% de los datos, y las demás variables conjuntas explican el 40% restante.



Gráfica 33.- Valor otorgado estadísticamente por el Minitab a cada variable creada.

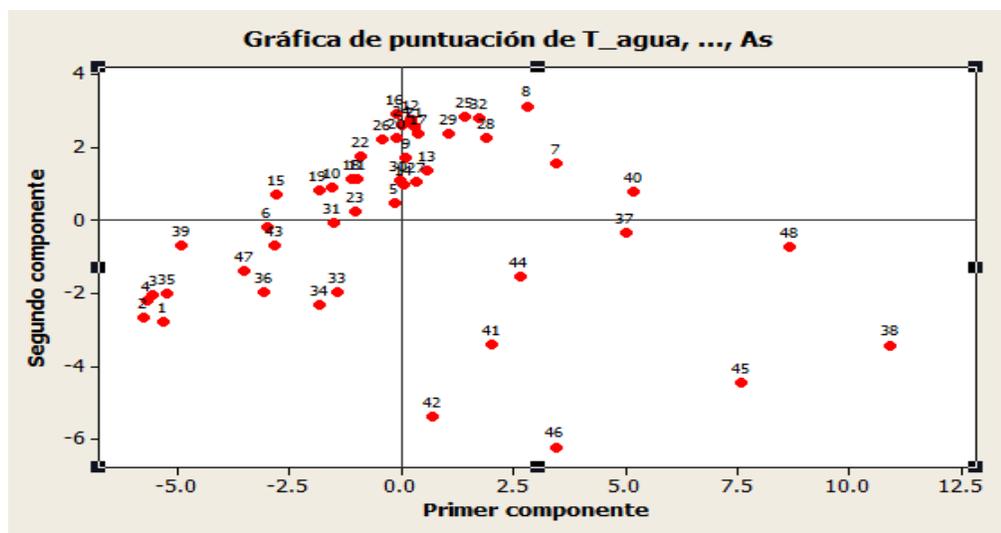
La Gráfica 34 de doble proyección muestra una correlación entre los sitios y todos los parámetros estudiados en el río Grande, se puede observar que las relaciones entre los sitios y los parámetros durante los muestreos realizados no son marcadas por una tendencia clara, la mayor parte de los sitios (S3 al S9) se encuentran cercanos a los vectores: Col. Fec., Color, Turbiedad, Sól. Sed., DQO, DBO₅, Sol. Tot. Y Sól. Susp., lo cual indica que estos sitios tienen las relaciones más altas con estos parámetros en comparaciones con los otros sitios (S1, S2, S10, S11 y S12)



Gráfica 34.-Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos, metales pesados y sitios, con respecto al primer y segundo componente.

La Gráfica 35 nos muestran el comportamiento de los sitios, mientras más cercanos estén un sitio de otro nos indican que existen mayores similitudes entre ellos. Los números que aparecen en la Gráfica representan cada sitio, los nombres que le corresponde a cada número se encuentran el Cuadro 27 (Anexo D).

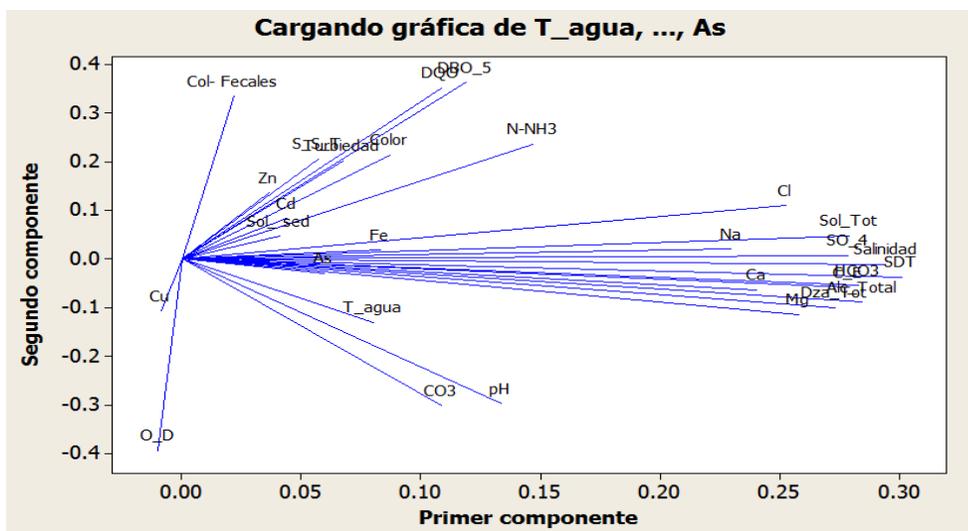
Los puntos que se encuentran más dispersos corresponde a los sitios S9, S10, S11 y S12 que se ubican en la parte final del río, en las cuatro campañas de muestreo, lo cual indica que estos son los que presentan mayores cambios a lo largo de un año de estudio, pero cabe destacar que la influencia de las épocas del año no representa una gran variabilidad en estos sitios, los sitios S1 y S2, presentan una variabilidad pero no tan grande como la de los sitios anteriores, el resto de los sitios se encuentra muy cercanos, lo que nos muestra que tienen un comportamiento muy similar a lo largo del año.



Gráfica 35.- Comportamiento estadístico de los sitios en el análisis de componentes principales.

La Gráfica 36 muestra el comportamiento de los parámetros, en la que se observan las correlaciones que existen entre cada parámetro, tal es el caso de las sales las cuales se encuentran paralelas al primer componente que son las que explican 40% del comportamiento del río Grande, como se ve también la DQO y DBO₅ se encuentran muy cercanas ya que estas son dependientes una de la otra teniendo mayor influencia en el segundo componente.

En caso de los metales el Cu no tiene relación con ningún otro parámetro, pero el Zn y el Cd están ligados a Sól. Sed, turbiedad, color, Sól. Tot., el Fe al igual que el As se encuentra relacionado con las sales como el SO₄, HCO₃, Dza. Tot, salinidad, dureza total, SDT, Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺, lo cual reafirma la interacción que existe en las partículas disueltas en el río y los metales pesados.



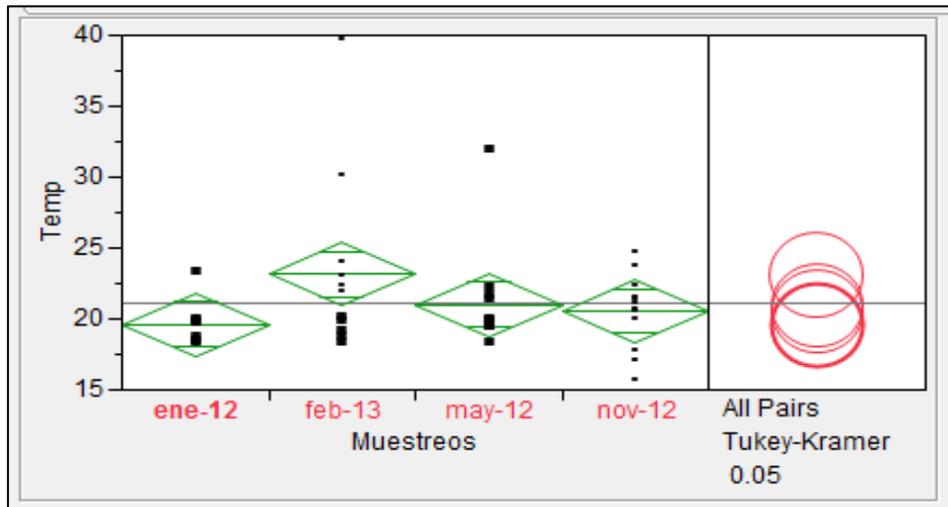
Gráfica 36.- Comportamiento estadístico de los parámetros fisicoquímicos y metales pesados en el análisis de componente principales.

8.1.9.2. ANOVA y prueba de Tuckey

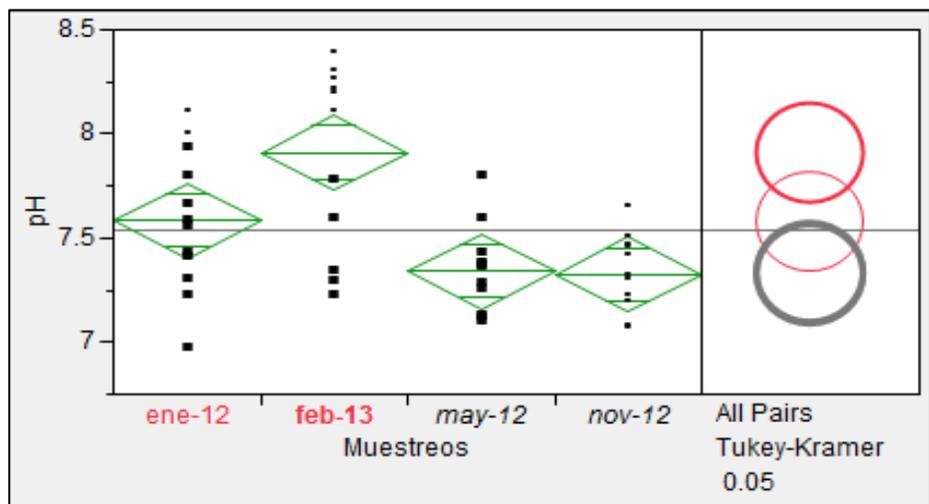
Se efectuó la prueba de Anova y tukey para los parámetros fisicoquímicos y los metales pesados en agua en el programa JMP, con el fin de comparar las medias aritméticas de todos los parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua del estudio. Los cuadros de ANOVA y Tukey-kramer se encuentran en el Anexo D (Cuadros del 29 al 74).

8.1.9.2.1. ANOVA y Tukey de Parámetros fisicoquímicos *in situ*

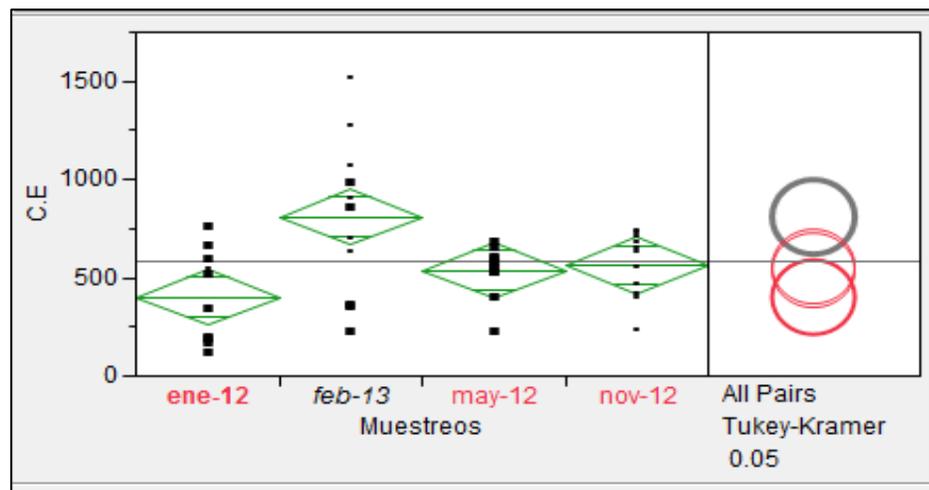
De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza para los parámetros fisicoquímicos *in situ*, la temperatura presentó una $P = 0.1563$ indicándonos que está con respecto a los muestreos no presenta diferencias significativas, por lo que sus medias son muy parecidas, presentando similitudes los cuatro muestreos (Gráfica 37, Cuadros 29 y 30). El pH se muestra en la Gráfica 38 y en los Cuadros 31 y 32, con una $P < 0.0001$, presentando diferencias significativas en sus medias, con respecto a las comparaciones tukey, el muestreo de feb-12 solo comparte similitudes con ene-12, por lo que es el que presenta las mayores variaciones, los otros tres muestreos son más similares. La conductividad eléctrica presentó diferencias significativas entre los muestreos de feb-13 y ene-12 ($P = 0.0021$), presentando grandes diferencias entre sus medias, en comparación con los muestreos de may-12 y nov-12 los cuales tienen una gran similitud (Gráfica 39, Cuadros 33 y 34). El oxígeno disuelto presentó una $P = 0.002$ con un error de 0.49647, lo cual nos indica que este parámetro también presenta diferencias significativas, las cuales se ven marcadas en la prueba de tukey, presentando las mayores diferencias en los muestreos de ene-12 y feb-13 (Gráfica 40, Cuadros 35 y 36). Por último los sólidos disueltos totales tienen un comportamiento más o menos similar en los cuatro muestreos, al igual que los otros parámetros el muestreo de feb-13 es el que presenta la mayor variación con respecto a los otros tres, ya que se encuentra por arriba de la media promedio (Gráfica 41, Cuadros 37 y 38).



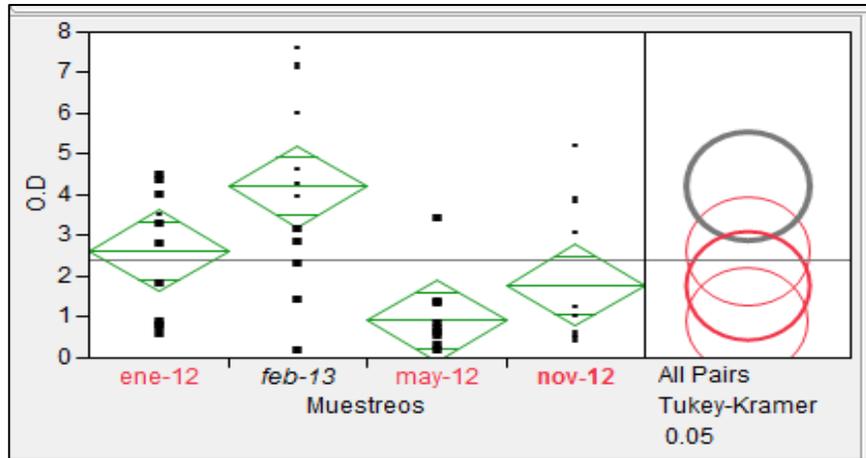
Gráfica 37.- Análisis de una vía para la temperatura (°C) por muestreo.



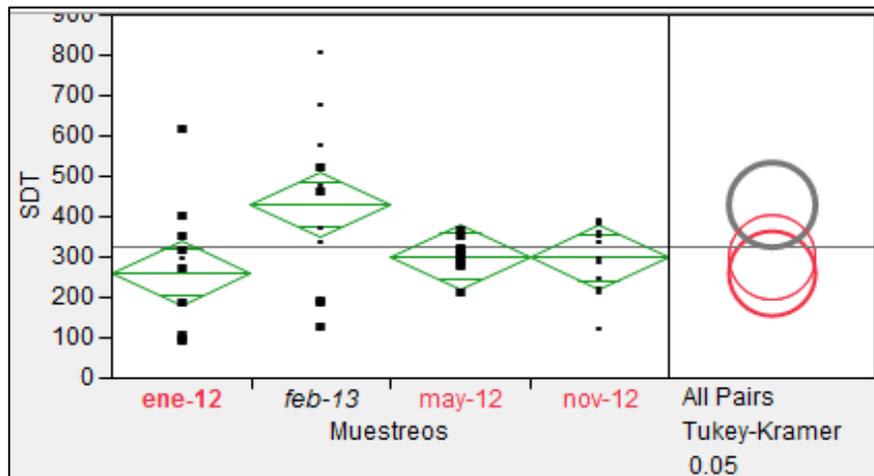
Gráfica 38.- Análisis de una vía para el pH por muestreo.



Gráfica 39.- Análisis de una vía para la conductividad eléctrica ($\mu\text{s cm}^{-1}$) por muestreo.



Gráfica 40.- Análisis de una vía para oxígeno disuelto (mg L^{-1}) por muestreo.



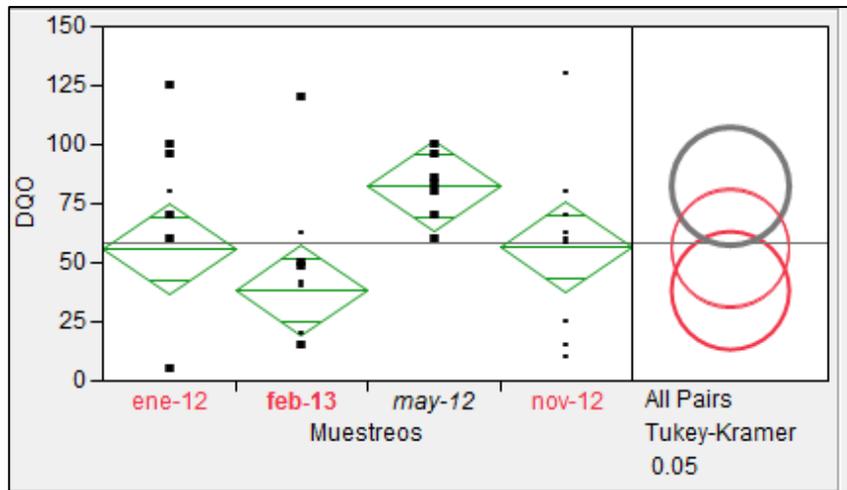
Gráfica 41.- Análisis de una vía para sólidos disueltos totales (mg L^{-1}) por muestreo.

8.1.9.2.2. ANOVA y Tukey de Parámetros fisicoquímicos de laboratorio

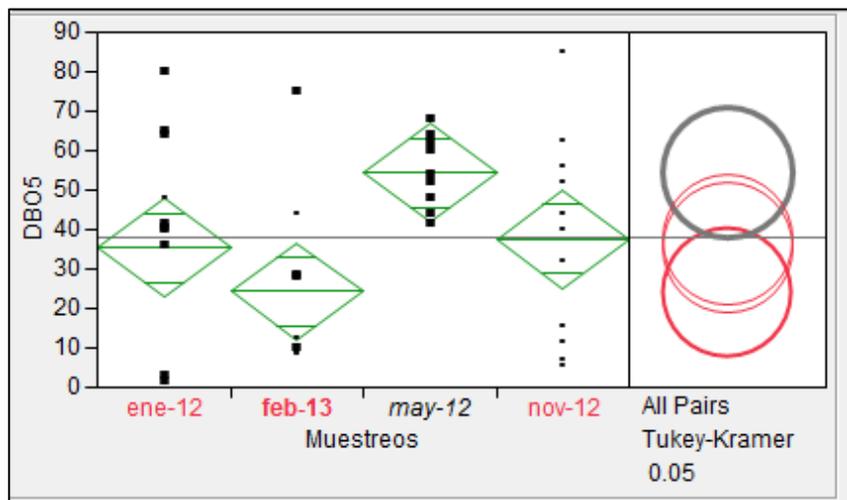
La DQO presenta una $P= 0.0166$, esto indica que existen diferencias significativas de las medias de este parámetro en los muestreos estudiados, teniendo la mayor variación en may-12, por lo que las mayores similitudes se dan en los muestreos de ene-12 y nov-12 (Gráfica 42, Cuadros 39 y 40), la DBO_5 presenta un comportamiento estadístico muy parecido al de la DQO, solo que la media promedio es menor, se tiene una $P= 0.0119$, teniendo diferencias significas entre los muestreos (Gráfica 43, Cuadro 41 y 42). La dureza total presenta una $P=0.0014$, esta si presenta una gran variación estadística, ya que no todos los muestreos pueden combinarse, esto debido a que sus medias son muy diferentes, el muestreo de feb-13 presenta la mayor variación (Gráfica 44, Cuadros 43 y 44). La alcalinidad total presenta diferencias de medias en los muestreos de ene-12 y feb-13, teniendo solo a los otros dos muestreos con mayores similitudes (Gráfica 45, Cuadros 45 y 46).

En el comportamiento de los componentes principales, se tiene que el Ca^{2+} presenta en los muestreos de ene-12, may-12 y nov-12 una media muy similar, en cambio el muestreo de feb-13 muestra una media más alta. Se tiene dos combinaciones la del muestreo de feb-13 con nov-12 y la de ene-12, may-12 y nov-12 (Gráfica 46, Cuadros 47 y 48). El Mg^{2+} tiene diferencias significativas con una $P=0.0013$, al igual que la mayoría de los parámetros se presenta la mayor variación en feb-13, el cuál no tiene ninguna similitud estadística con los otros muestreos (Gráfica 47, Cuadros 49 y 50). El Na^+ en cambio no presenta diferencias significativas por lo que las medias se encuentran cercanas, por lo cual se tienen características similares en los cuatro muestreos (Gráfica 48, Cuadros 51 y 52). Los SO_4^{2-} no muestran diferencias significativas ya que las medias se encuentran muy cercanas, de acuerdo con la prueba de Tukey esto se comprueba, ya que se puede dar la combinación entre todos los muestreos (Gráfica 49, Cuadros 53 y 54). Los HCO_3^- tienen una $P=0.0007$, se tiene un comportamiento estadístico similar, presentando las mayores variaciones en los muestreos de ene-12 y feb-13, ya que sus medias son muy diferentes a la media promedio (Gráfica 50, Cuadros 55 y 56). Los Cl^- no presentan diferencias significativas ya que sus medias se encuentran cercanas a la media promedio, por lo que en la prueba de tukey nos muestra que presentan características similares (Gráfica 51, Cuadros 57 y 58). El N-NH_3 se tiene una $P=0.0187$, teniendo diferencias significativas en los muestreos de ene-12, may-12 y nov.12, ya que sus medias se encuentra alejadas de la media promedio, solo el muestreo de feb-13 se encuentra cercano a esta, se tienen dos combinaciones, el muestreo may-12, nov-12 y feb-13, y el de ene-12 y feb-13, por lo que feb-13 comparte similitudes con todos los muestreos (Gráfica 52, Cuadros 59 y 60).

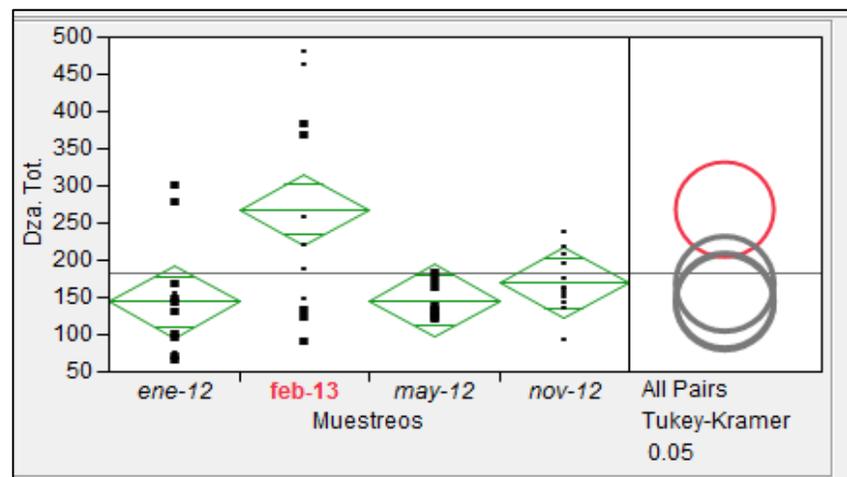
Con respecto a los sólidos, estos no presenta diferencias significativas, ya que las medias de los cuatro muestreos son muy parecidas, por lo que se pueden tener combinaciones en los cuatro muestreos, para los sólidos sedimentables se tiene una $P=0.4518$ (Gráfica 53, Cuadros 61 y 62), para los sólidos totales una $P=0.235$ (Gráfica 54, Cuadros 63 y 64), para los sólidos suspendidos totales $P=0.4475$ (Gráfica 55, Cuadros 65 y 66). Por último se tienen los coliformes fecales los cuales presentan una $P<0.001$, por lo que existe una gran diferencia significativa entre los muestreos, los cuatro muestreos se encuentra muy alejados de la medias, solo los muestreos de ene-12 y nov-12 se encuentra más o menos cercanos, por lo que estos presentan similitudes en el estudios (Gráfica 56, Cuadros 67 y 68).



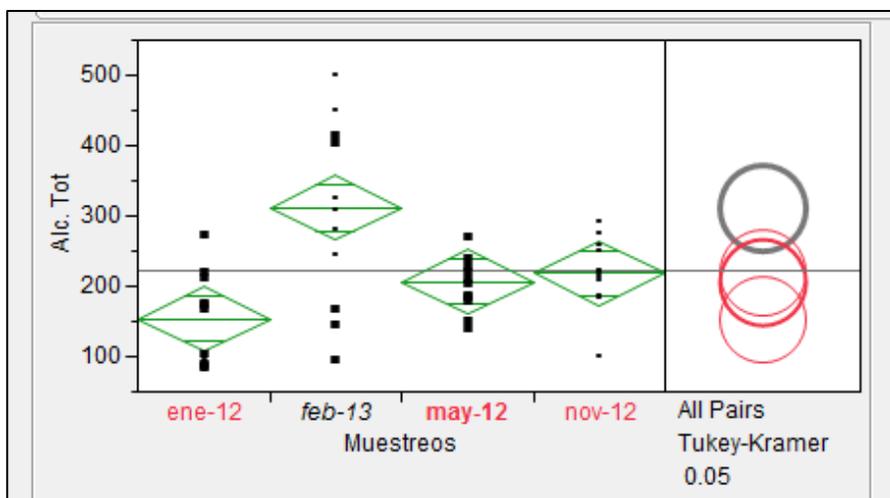
Gráfica 42.- Análisis de una vía para la DQO (mg L^{-1}) por muestreo.



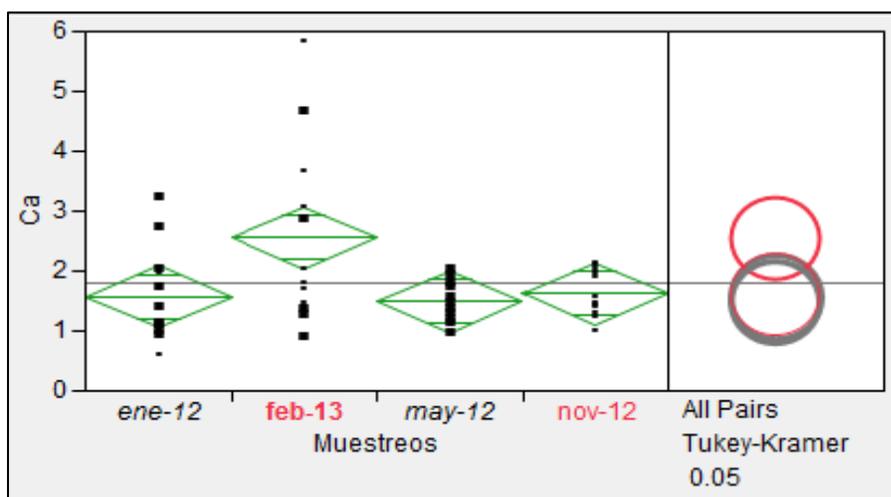
Gráfica 43.- Análisis de una vía para la DBO_5 (mg L^{-1}) por muestreo.



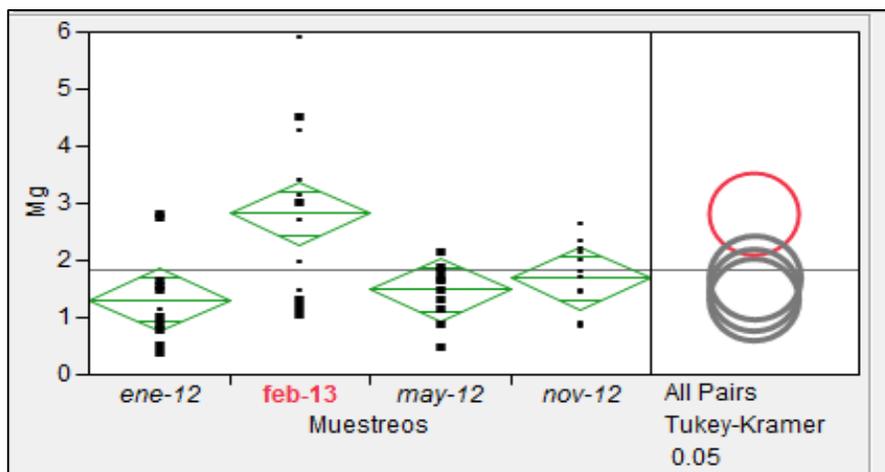
Gráfica 44.- Análisis de una vía para la dureza total (mg L^{-1}) por muestreo.



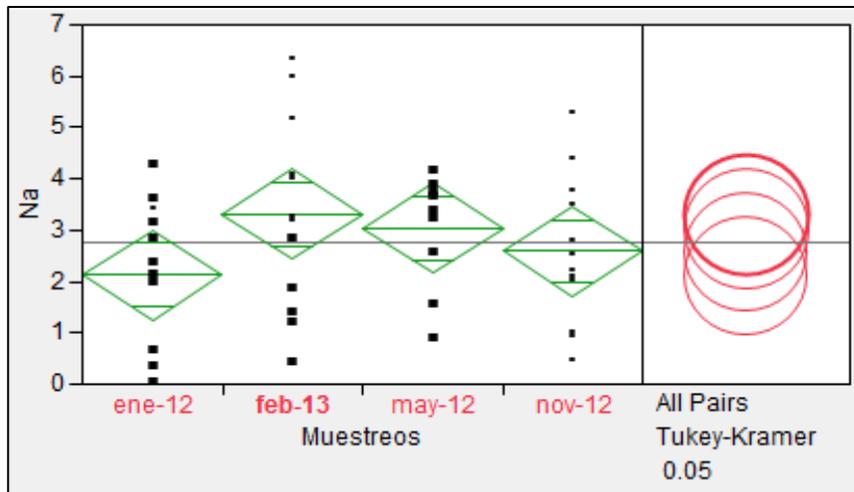
Gráfica 45.-Análisis de una vía para la alcalinidad total (mg L⁻¹) por muestreo.



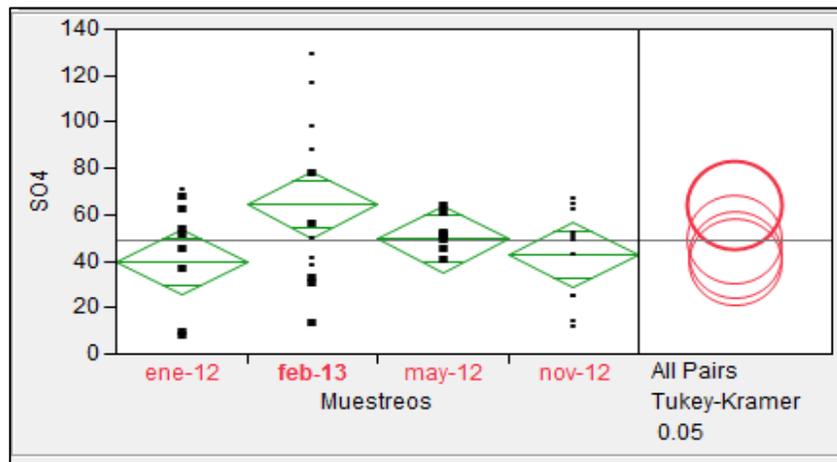
Gráfica 46.- Análisis de una vía para el calcio (mg L⁻¹) por muestreo.



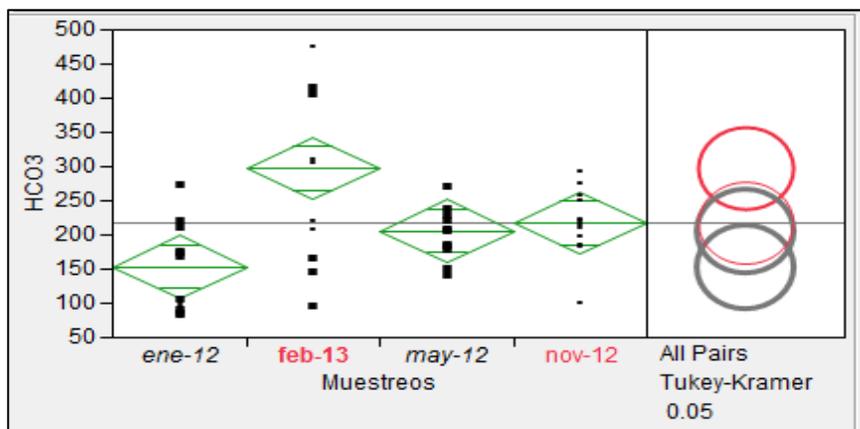
Gráfica 47.- Análisis de una vía para el magnesio (mg L⁻¹) por muestreo.



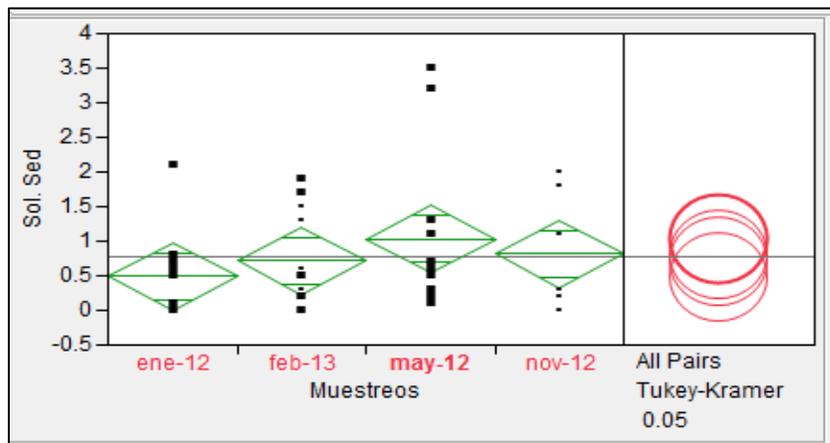
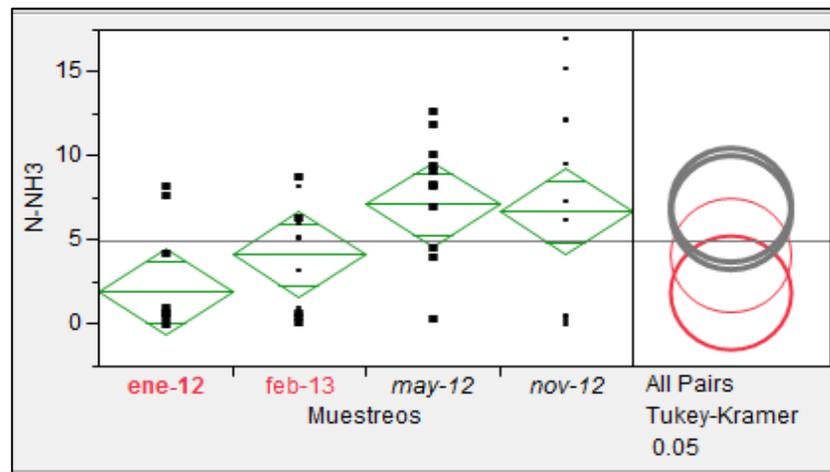
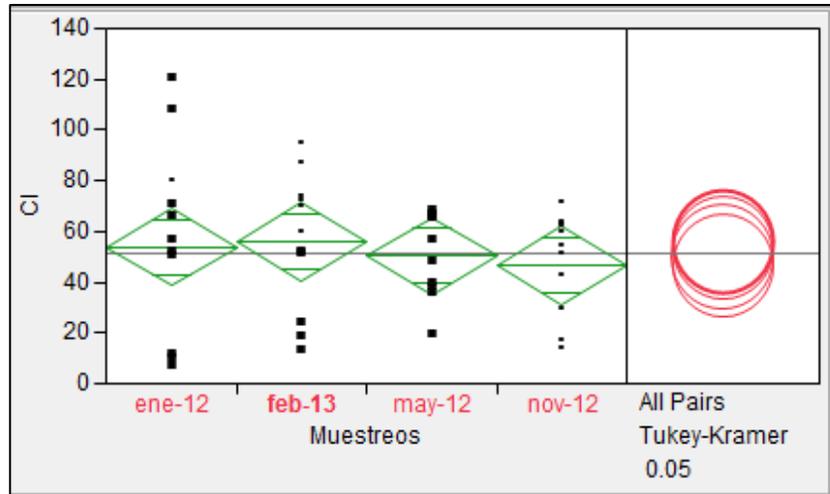
Gráfica 48.- Análisis de una vía para el sodio (mg L^{-1}) por muestreo.

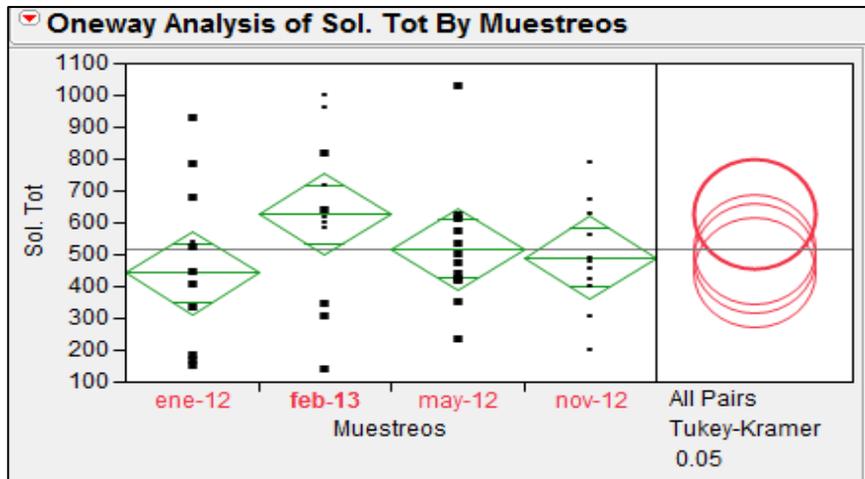


Gráfica 49.- Análisis de una vía para los sulfatos (mg L^{-1}) por muestreo.

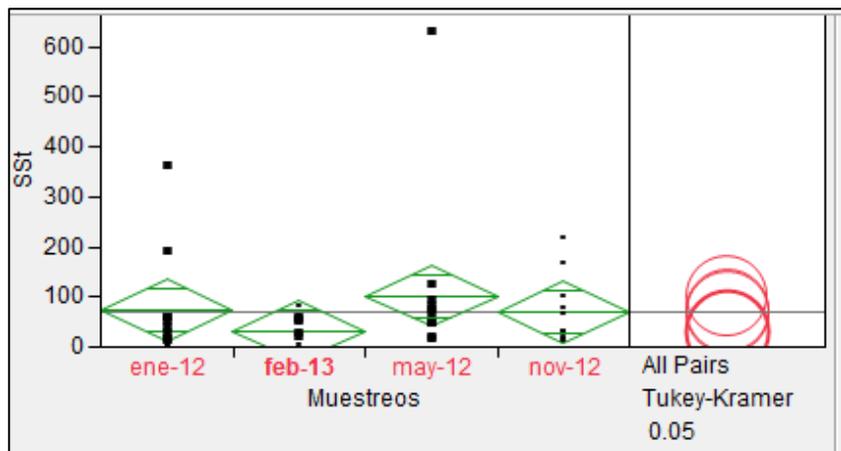


Gráfica 50.- Análisis de una vía para los bicarbonatos (mg L^{-1}) por muestreo.

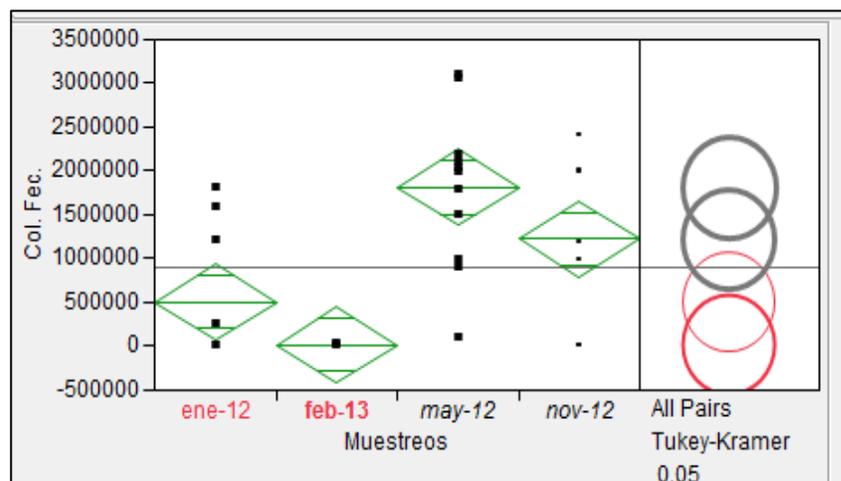




Gráfica 54.- Análisis de una vía para los sólidos totales (mg L^{-1}) por muestreo.



Gráfica 55.- Análisis de una vía para los sólidos suspendidos totales (mg L^{-1}) por muestreo.

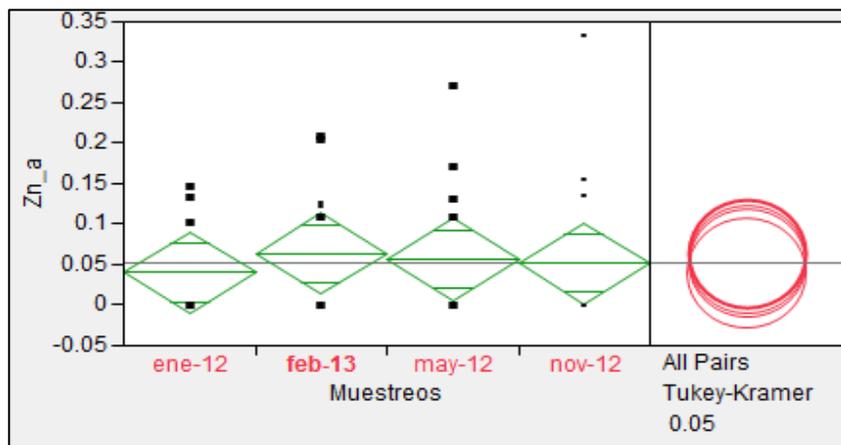
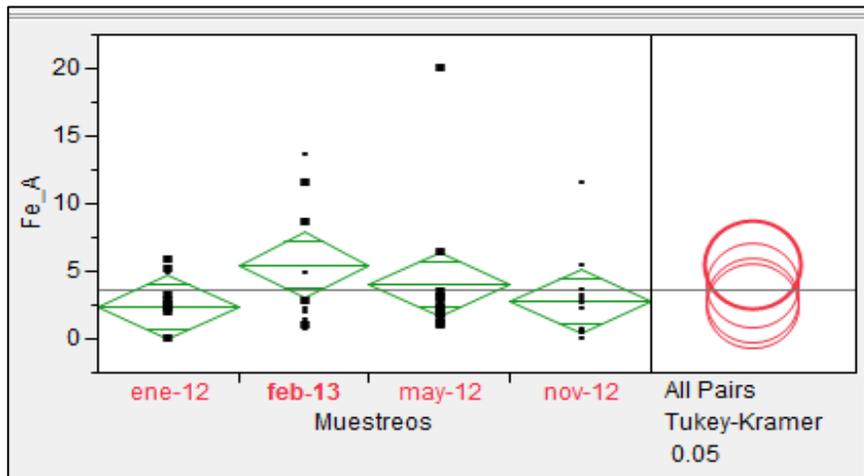


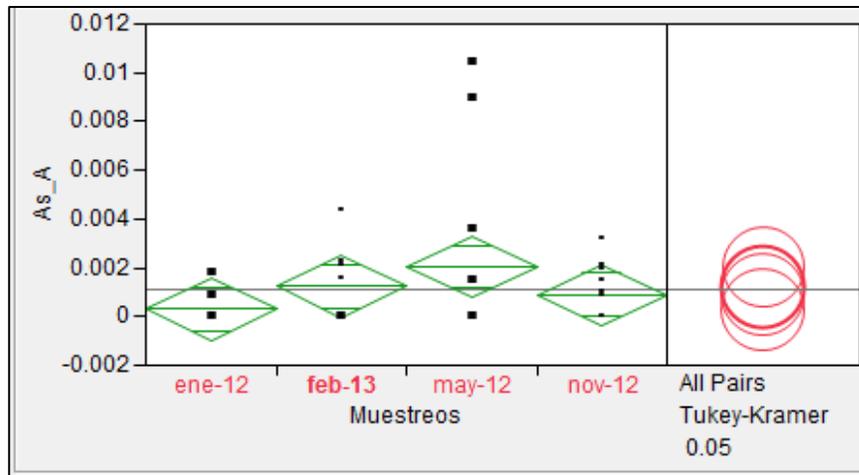
Gráfica 56.- Análisis de una vía para los coliformes fecales (mg L^{-1}) por muestreo.

8.1.9.2.3. ANOVA y Tukey de los metales pesados en agua

Los metales pesados y As presentan una matriz con pocos datos, por lo cual las pruebas estadísticas solo se realizaron para Fe, Zn y As, ya que son los que tienen la mayor cantidad de datos para los sitios y muestreos. Los cuadros de ANOVA y Tukey-Kramer se encuentran en el Anexo D.

El Fe presentó una $P=0.2754$, por lo que no existen diferencias significativas en cuanto al comportamiento de sus medias, por lo que se tienen similitudes en los cuatros muestres en el comportamiento estadístico de este metal (Gráfica 57, Cuadros 69 y 70). El Zn tampoco presenta diferencias significativas ya que tiene una $P=0.9232$, de acuerdo a esta probabilidad las medias se encuentran muy cercanas a la media promedio (Gráfica 58, Cuadros 71 y 72). El As tiene una $P=0.2655$, las medias de los muestreos son muy parecidas, teniendo la mayor variación en ene-12 aunque esta no es muy grande, por lo que también se tienen un comportamiento similar en los cuatro muestreos con respecto a este metal (Gráfica 58, Cuadros 73 y 74).





Gráfica 59.- Análisis de una vía para el arsénico (mg L⁻¹) por muestreo.

8.2. Sedimentos

8.2.1. Parámetros físicos

8.2.1.1. Color

La determinación de color en sedimento se realizó mediante el método de las cartas de Munsell para suelos, donde se observa el color en seco y húmedo; comparando con las celdas de las cartas se obtienen el matiz, el brillo y la intensidad. El color en seco y húmedo de los sedimentos se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8.- Color en los sedimentos del río grande de Morelia.

Sitios	Matiz (Hue)	Brillo (Value)	Intensidad (Chroma)	Color	Determinación
S1	5YR	4	1	Gris	Seco
	7.5YR	2.5	1	Negro	Húmedo
S2	5YR	5	1	Gris	Seco
	7.5YR	3	1	Gris muy oscuro	Húmedo
S3	5YR	4	3	Gafé	Seco
	7.5YR	3	2	Café oscuro	Húmedo
S4	7.5YR	4	1	Gris oscuro	Seco
	7.5YR	3	1	Gris muy oscuro	Húmedo
S5	7.5YR	5	1	Gris	Seco
	10YR	3	1	Gris muy oscuro	Húmedo
S6	7.5YR	4	2	Café	Seco
	7.5YR	3	3	Café oscuro	Húmedo
S7	7.5YR	4	1	Gris oscuro	Seco
	10YR	2.5	1	Negro	Húmedo
S8	7.5YR	5	1	Gris	Seco
	7.5YR	3	1	Gris muy oscuro	Húmedo
S9	7.5YR	6	1	Gris	Seco
	10YR	2.5	1	Negro	Húmedo
S10	7.5YR	5	3	Café	Seco
	7.5YR	3	3	Café oscuro	Húmedo
S11	7.5YR	6	1	Gris	Seco
	7.5YR	3	1	Gris muy oscuro	Húmedo
S12	7.5YR	6	1	Gris	Seco
	7.5YR	3	1	Gris muy oscuro	Húmedo

El color de los sedimentos se debe al material que lo conforma. Los colores claros se relacionan con el contenido de carbonatos, los oscuros a materia orgánica, los rojos y cafés a los óxidos de Fe.

Todos los sitios excepto los S3, S6 y S10, presentan colores oscuros indicando que tienen gran cantidad de materia orgánica, esto debido a que reciben diferentes descargas residuales, en cuanto a los sitios S3, S6 y S9, el color café, muestra que los sedimentos contienen óxidos de Fe.

De acuerdo a esto los sedimentos tienden a retener a los metales pesados debido al contenido de materia orgánica y los óxidos de hierro ya que estos tienen una alta afinidad por ellos, esto también favorece a que se tengan mayores cantidades de metales pesados en sedimentos que en agua, pero la materia orgánica con pequeñas perturbaciones como lluvias o algún movimiento de los sedimentos es más fácil que libere los metales pesados, en cambio los óxidos de hierro los retienen más tiempo pero presentan una alta movilidad ya que se resuspenden y transportan al metal depositándose nuevamente en otro sitio.

8.2.1.2. Tamaño de partícula

El tamaño de partícula de los sedimentos determinado por el método de la pipeta se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9.- Tamaño de partícula en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	arenas	Limos	arcillas	Clase textural
	%	%	%	
S1	1.8	41.1	57.2	Arcillo limoso
S2	4.9	72.5	22.6	Franco limoso
S3	19.4	61.0	19.6	Franco limoso
S4	32.8	58.7	8.6	Franco limoso
S5	5.5	35.4	59.2	Arcilloso
S6	5.5	74.0	20.6	Franco limoso
S7	6.9	65.3	28	Franco limoso
S8	12.0	65.9	22.2	Franco limoso
S9	5.6	87.7	6.8	Limoso
S10	14.4	53.7	32	Franco arcillo limoso
S11	46.5	42.0	11.6	Franco
S12	23.7	61.2	15.2	Franco limoso

La clase de textura que predominó fue franco limoso, a excepción de los sitios S1 con Arcillo limos, S5 con arcilloso, S10 con franco arcillo limoso y S11 con franco.

Las texturas encontradas presentan mayor cantidad de clase limosa y arcillosa, las cuales debido a su tamaño favorecen la acumulación y liberación de metales pesados y As, ya que el tamaño de las partículas es pequeño y combinado con otros factores (Eh, carbono orgánico, etc.) que también influyen sobre la distribución y acumulación de los metales, sus concentraciones en los sedimentos pueden variar en espacio y tiempo.

8.2.2. Parámetros químicos

8.2.2.1. pH

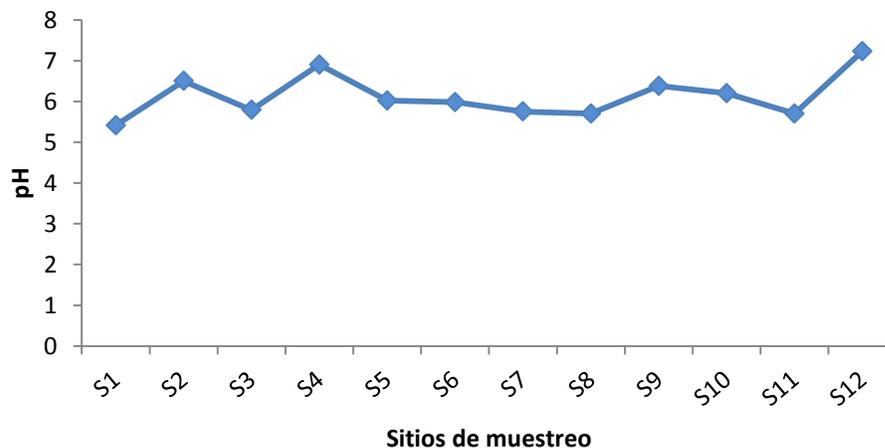
Los resultados obtenidos de pH promediados de los cuatro muestreos en el sedimento se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10.- pH promedio obtenido en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitios	pH
S1	5.41
S2	6.5
S3	5.79
S4	6.9
S5	6.02
S6	5.98
S7	5.75
S8	5.7
S9	6.38
S10	6.2
S11	5.7
S12	7.23

Se Observa en la Gráfica 60 que el pH de los sedimentos incrementa conforme llega a la desembocadura, iniciando con un pH ácido y manteniéndose en casi todos los sitios, hasta que llega a la desembocadura en el cual se vuelve básico.

Los pH ácidos favorecen a tener mejores retenciones por parte de los limos y arcillas de los metales como el Ni, Cr, Cd, pero para los metales como el Fe, Cu, Zn, Pb y As este pH facilita la extracción de estos sedimentos por lo cual se tienen una mayor interacción de estos metales con la fase líquida y sólida.



Gráfica 60.- Comportamiento del pH promedio en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.3. Metales pesados y As totales

Las concentraciones de metales pesados y As en sedimentos de los cuatro muestreos realizados en este estudio, se muestran en el Cuadro15 (Anexo B). En México actualmente no existe una normatividad que regule los metales pesados y As en sedimentos, pero para estudios se complementan utilizando normas de otros países, como Estados Unidos, Canadá o países europeos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, las concentraciones de metales pesados y As en sedimentos fueron mucho mayores que las que se presentaron en el agua, donde solo se encontraron concentraciones de cuatro metales y en sedimento se encontraron ocho de los nueve estudiados, los cuales fueron: Fe, Zn, Ni, Cu, Pb, Cd, Cr y As. Cabe mencionar que la Ag no se encontró en agua ni en sedimentos.

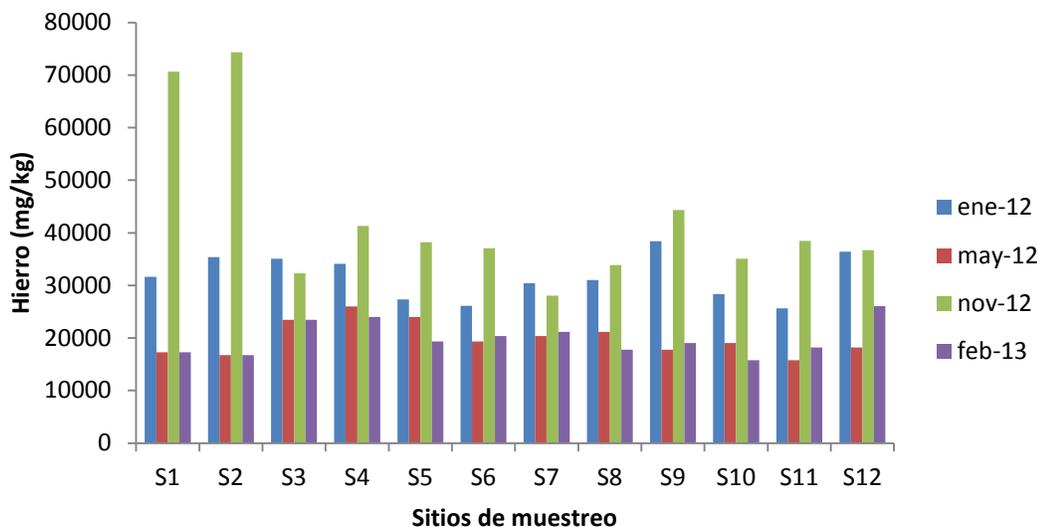
8.2.3.1. Hierro (Fe)

Las concentraciones de Fe de los cuatro muestro estudiados oscilan entre los valores de 10000 a 50000 mg kg⁻¹, teniendo un comportamiento similar a lo largo del río Grande, a excepción del sitio S1 y S2 los cuales presentaron las concentraciones más elevadas por arriba de 70000 mgkg⁻¹ en el muestreo de nov-12.

Como se observa en la Gráfica 61, que el comportamiento de las concentraciones de Fe no varían mucho a lo largo del río Grande ni en las cuatro campañas de muestreo, solo en nov-12 se incrementó su concentración en los sitios S1 y S2, esto debido a las lluvias que se tuvieron este periodo las cuales provocan la remoción de los sedimentos y provocando una resuspensión.

Las altas concentraciones de este metal se deben principalmente a que se encuentra en la corteza terrestre, aunque también se tiene aportaciones de las diferentes descargas que recibe el río Grande entre ellas las de la agricultura, ya que es la principal a portadora de sedimentos a los cuerpos de agua y también utiliza en grandes cantidades este metal en los fertilizantes para los cultivos.

Cabe mencionar que este metal tiene una alta afinidad por las arcillas y limos de los sedimentos, provocando su retención y así muy poca movilidad, por esta razón la variación de las concentraciones a lo largo del río Grande es muy poca.



Gráfica 61.- Concentraciones de hierro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

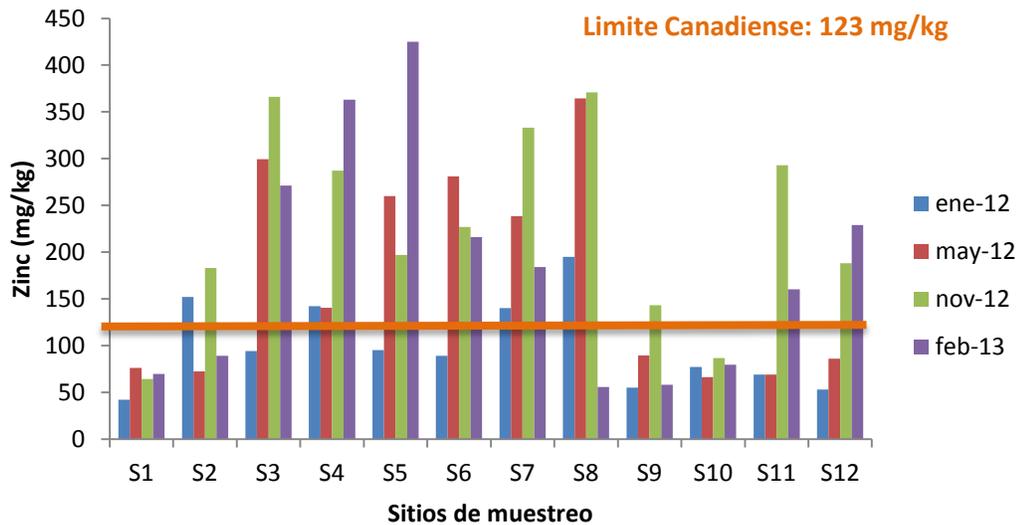
8.2.3.2. Zinc (Zn)

EL zinc presenta concentraciones muy variadas en los cuatro muestreos, se observa en la Gráfica 62, que el Zn incrementa su concentración en la mayoría de los sitios en cada muestreo, esto se da desde el sitio S2, indicándonos el ingreso de Zn posiblemente por fuentes antropogénicas, entre ellas la industria y agricultura.

La concentración más alta se obtuvo en el sitio S5 con 425 mg kg^{-1} en el muestreo de feb-13, el muestreo de ene-12 fue el que presentó menor concentración a lo largo del río Grande en comparación con los otros muestreos.

Los sitios que se encuentran en la zona de Morelia, así como Atapaneo, La Goleta, Álvaro Obregón y el aeropuerto, son los que presentan las concentraciones más altas, esto se debe principalmente a las descargas residuales que se reciben en estos sitios tanto domésticas, industriales y agrícolas, pero debido a las condiciones que presenta el río como la alta cantidad de sólidos, sales y partículas, así como el pH hacen que el Zn se una a ellas, provocan la precipitación y depositándose en el sedimento.

Debido a que en México no existe todavía algún límite máximo permisible de Zn en sedimentos comparamos con la Normatividad Canadiense la cual propone un límite máximo permisible para vida acuática de 123 mg kg^{-1} para Zn en sedimentos, por lo que los sitios S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S11 y S12 superan este límite, en cuanto a los primeros sitios no existe gran problema ya que no existe vida acuática pero se puede dar resuspensión colocando a este metal de nuevo en la columna de agua donde esta es utilizada para riego agrícola, pero en los últimos dos sitios si existe preocupación ya que sus sedimentos pueden ser arrastrados hacia el lago de Cuitzeo donde si existe vida.



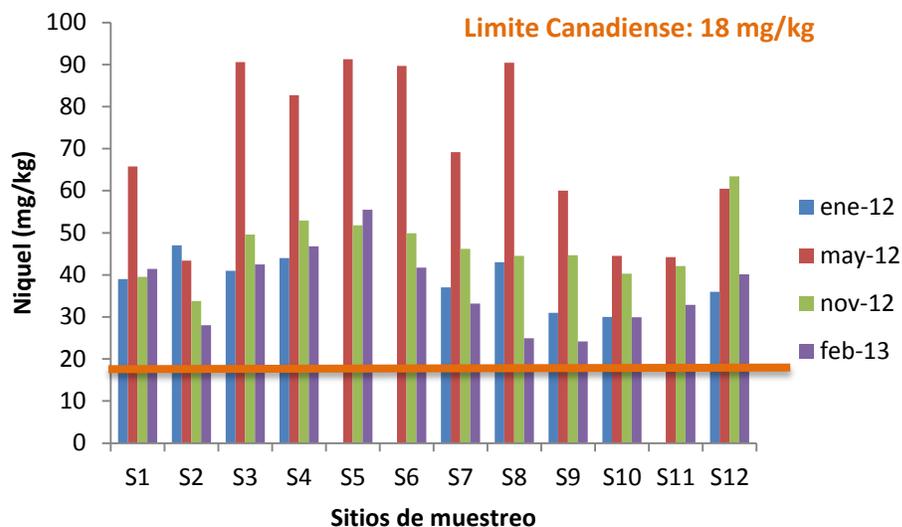
Gráfica 62.- Concentraciones de zinc en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.3.3. Níquel (Ni)

Las concentraciones de Ni se presentan en la Gráfica 62, el comportamiento en general de este metal en todos los sitios a lo largo de las cuatro campañas de muestreo no presentó grandes variaciones, ya que las concentraciones fueron muy similares en los cuatro muestreos, teniendo la mayor variación en el muestreo de mayo-12 donde se incrementaron las concentraciones provocado posiblemente al incremento de sólidos sedimentables también este muestreo, implicando así una mayor sedimentación de este metal por medio de la unión a este parámetro.

De acuerdo también a la textura del sedimento y al pH que presenta el río Grande se tiene una mayor retención del Ni, aunque también se presenta una gran cantidad de arenas que promueven a que el Ni se libere fácilmente.

Las concentraciones de Ni en todos los sitios superan el límite máximo permisible propuesto por la Normatividad Canadiense, la cual establece un valor de 18 mg kg⁻¹, por lo que se pueden considerar que los sedimentos son peligrosos por las concentraciones de Ni, por lo tanto se debe tener cuidado ya que el río Grande es desazolvado y los sedimentos son colocados a los lados de este y en algunos lugares las orillas del río son utilizadas para sembrar cultivos.



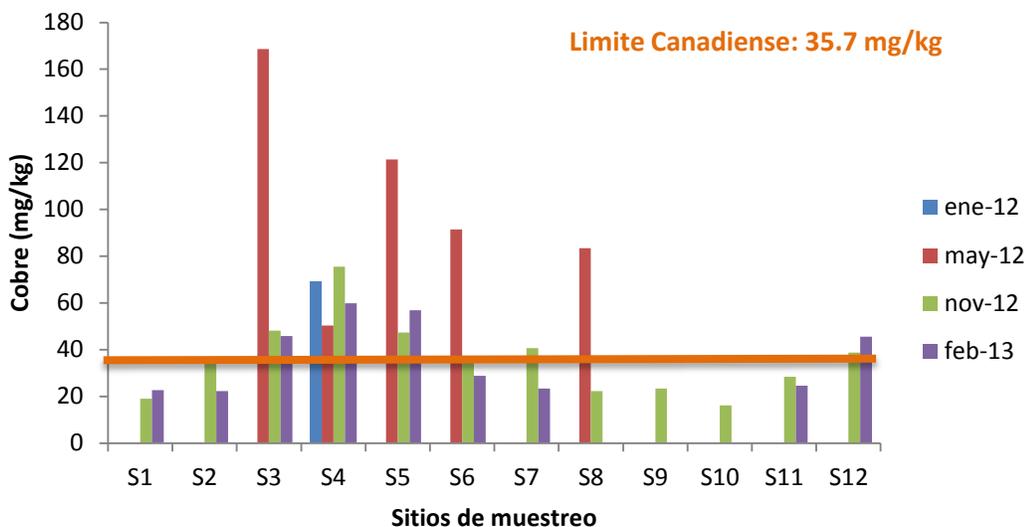
Gráfica 63.- Concentraciones de níquel en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.3.4. Cobre (Cu)

El Cu presentó en cada sitio el mismo comportamiento en los cuatro muestreos, las concentraciones más bajas y más elevadas se obtuvieron en los muestreos de ene-12 y mayo-12 respectivamente, y en los muestreos de nov-12 y feb-13 el comportamiento se mostró similar a lo largo del río Grande. La mayor concentración se obtuvo en el sitio S4 con 168.7 mgkg^{-1} en el muestreo de mayo.

Como se puede observar en la Gráfica 64, las concentraciones más elevadas se encontraron desde los sitios S3 hasta los sitios S8, los cuales pertenecen a la zona de Morelia, Atapaneo y La Goleta, es aquí como ya se mencionó anteriormente donde se tiene la mayor contaminación del río Grande, porque recibe grandes cantidades de aguas residuales, las pueden incluir en este caso el Cu, que por acción del pH, las reacciones redox, la dureza del agua y las sales que se presentan en el río Grande provocan que este sedimento.

De acuerdo con la Normatividad Canadiense las concentraciones obtenidas de los sitios S3, S4, S5, S6, S7 y S8 superan el límite máximo permisible para vida acuática el cual tiene un valor de 35.7 mgkg^{-1} . Aunque para el río Grande no representa gran problema debido a que no existe vida acuática, pero como también se da el fenómeno de resuspensión y de arrastre de sedimentos estos pueden llegar al lago de Cuitzeo donde sí existe.



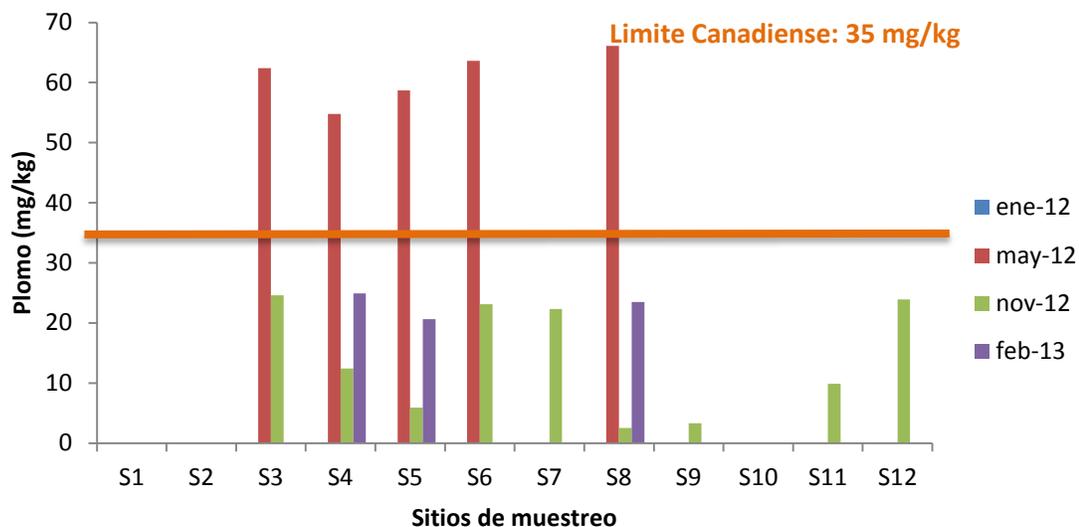
Gráfica 64.- Concentración de cobre en los sedimentos en el río Grande de Morelia.

8.2.3.5. Plomo (Pb)

Las concentraciones de Pb más elevadas del estudio se presentan en los sitios que se encuentran en la zona de Morelia, Atapaneco y La goleta, en la Gráfica 65 se puede apreciar el comportamiento del Pb a lo largo del río Grande. La concentración más alta de Pb se encontró en el sitio S8 con un valor de 66.1 mg kg^{-1} en el mes de may-12, también se presentaron concentraciones por debajo de los 25 mg kg^{-1} en los sitios S11 y S12, estos pueden ser aportaciones de la agricultura ya que en estos sitios es donde se tiene la mayor cantidad de agricultura.

De acuerdo a la normatividad Canadiense el límite máximo permisible para Pb es de 35 mg kg^{-1} por lo que los sitios S3, S4, S5, S6 y S8 lo superan.

La mayoría de los metales pesados de este estudio presenta las concentraciones más altas en los sitios S3 al S8, esto indicándonos que existen aportes importantes de descargas residuales municipales de estos, ya que dentro de los municipios se encuentran la pequeña y mediana empresa que tiran sus residuos en los desagües de las ciudades sin darles un previo tratamiento, aunque los metales pesados no sean arrojados constantemente se debe recordar que estos no son biodegradables por lo que su persistencia es alta, de acuerdo a los resultados obtenidos donde las mayores las mayores concentraciones se presenta en el muestreo may-12 y disminuyen en feb-13, no muestra que estos tienen una alta movilidad ya que las concentraciones presentan grandes variaciones.



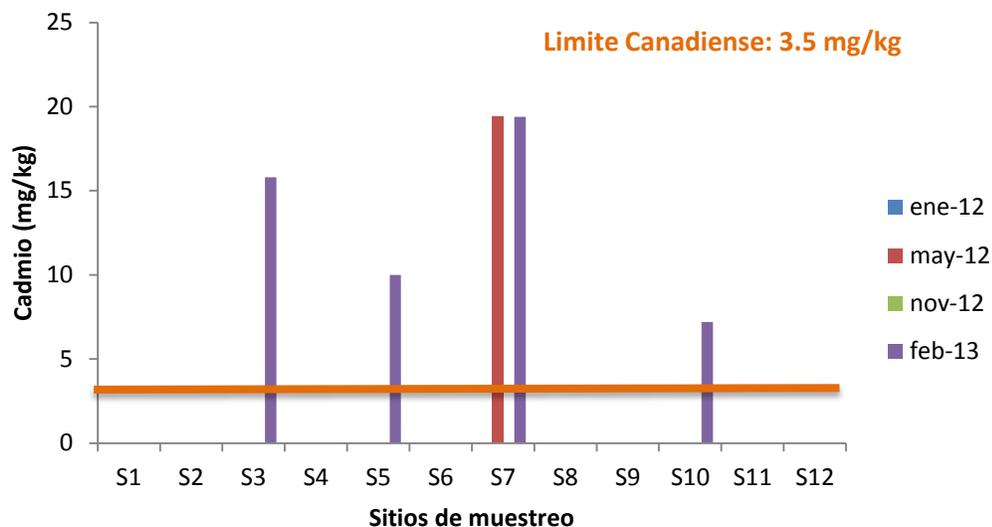
Gráfica 65.- Concentraciones de plomo en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.3.6. Cadmio (Cd)

El comportamiento del cadmio se muestra en la Gráfica 66, donde se observa que solo se encontró en cinco sitios de estudios, en el muestro de may-12 se obtuvo en el sitio de S7, en el muestreo de feb-13 se encontró en S3, S5, S7 y S10, donde la concentración más elevada se dio en el sitio de S7, con 19.4 mgkg^{-1} en ambos muestreos, también se puede apreciar que el Cd ha sido introducido en el río Grande hace poco ya que en los muestreos anteriores no se presentó solo en el feb-13.

Se puede creer que el Cd puede provenir de la descarga de la papelera debido a que en el agua solo se obtuvo concentración en el S2 que es el que se encuentra cercano a esta descarga, pudo haber sido arrastrado a lo largo del río pero debido a las condiciones particulares del río Grande las cuales favorecen a la precipitación de los metales, en este caso a la precipitación del Cd.

La Normatividad Canadiense propone una concentración de 3.5 mgkg^{-1} de Cd en sedimentos para preservación de la vida acuática, de acuerdo a esto las concentraciones encontradas superan esta normatividad, cabe mencionar que no existe vida acuática en el río Grande pero de acuerdo a las características de los sedimentos del río Grande los cuales presentan grandes cantidades de materia orgánica pueden ser muy fácilmente resuspendidos volviéndolos a tener en interacción con el cuerpo de agua.



Gráfica 66.- Concentraciones de cadmio en los sedimentos del río Grande de Morelia.

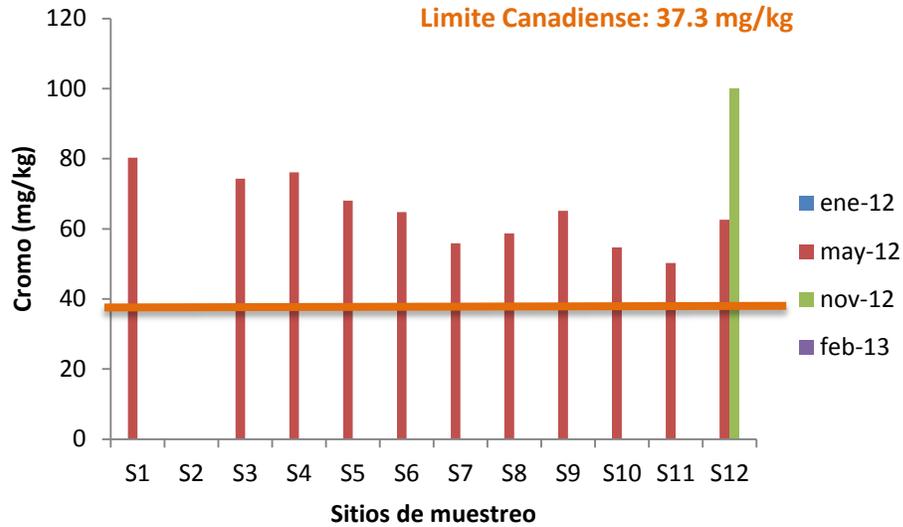
8.2.3.7. Cromo (Cr)

El Cr se muestra en la Gráfica 67, éste se encontró en casi todos los sitios del segundo muestreo y solo en un sitio en el tercer muestreo el cual presentó la mayor concentración con 1006.3 mgkg^{-1} , esto podría indicar el arrastre de metales pesados al río Grande.

El Cr ingresa al río Grande desde el primer sitio, el cual se consideraba como el de mejor calidad según los antecedentes del río ya que cumplía con la normatividad mexicana para uso y consumo humano, de acuerdo a este estudio el S1 no solo en los sedimentos sino también en agua presenta metales pesados por lo que se debe darle previo tratamiento que incluya la eliminación de estos si el agua es utilizada para el uso humano.

De acuerdo al comportamiento que presenta el Cr se observa que existe un arrastre de este metal al lago de Cuitzeo donde está la problemática ya que existe vida acuática, cabe destacar que el Cr es solo arrastrado en ciertas temporadas ya que solo se presenta en los primeros muestreos indicándonos que recientemente no se han tenido descargas de este metal.

La Normatividad Canadiense indica un límite máximo permisible en sedimentos de 37.3 mgkg^{-1} , por lo que todos los sitios con concentraciones de Cr encontrados superan esta normatividad, y se debe en consideración que como existe arrastre de este metal pesado hacia el lago de Cuitzeo se ingresa el Cu en a los sedimentos de este, provocando la interacción con la vida acuática que existe ahí.



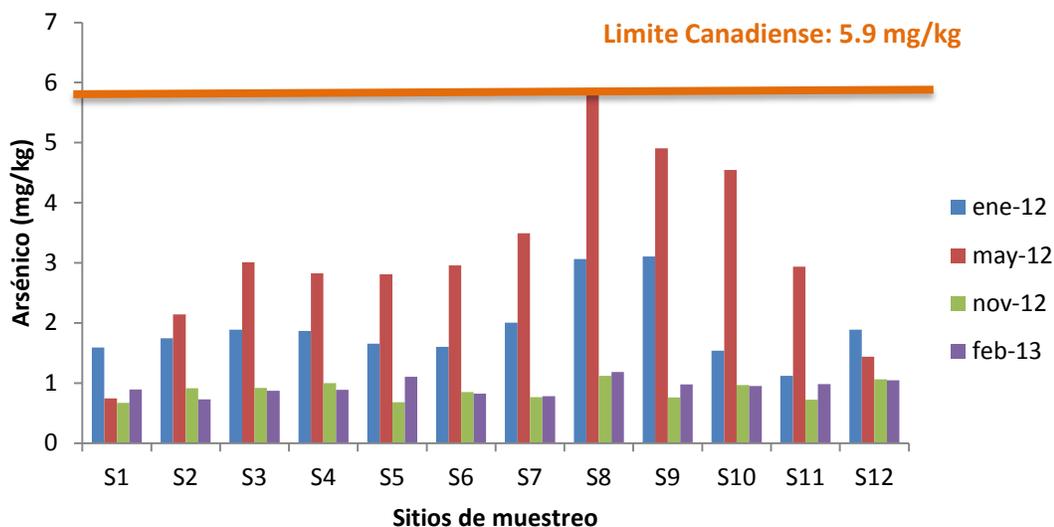
Gráfica 67.- Concentraciones de cromo en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.3.8. Arsénico (As)

La Gráfica 68 muestra las concentraciones de arsénico, el cual se encontró en los cuatro muestreos, donde la mayor concentración se presentó en el muestreo de may-12, después le siguió el muestreo de ene-12 y al final los muestreos de nov-12 y feb-13 que presentaron concentraciones similares, aunque el comportamiento es muy parecido en los sitios.

Las concentraciones son relativamente pequeñas por lo que sí existe un arrastre hacia al lago de Cuitzeo no sería tan significativo debido a las altas concentraciones que se presentan en él, pero el As al pH presenta el sedimento es muy fácil de resuspender por lo que tiene una alta interacción con el agua, la cual como es utilizada para riego agrícola, aunque debido a las concentraciones encontradas en el estudio no son perjudiciales para estos.

Todos los sitios encontrados se encuentran dentro de la Normatividad Canadiense que propone un límite de 5.9 mgkg^{-1} para la preservación de la vida acuática, por lo que debido a que no existe ni plantas ni animales en el río Grande no representa peligrosidad.

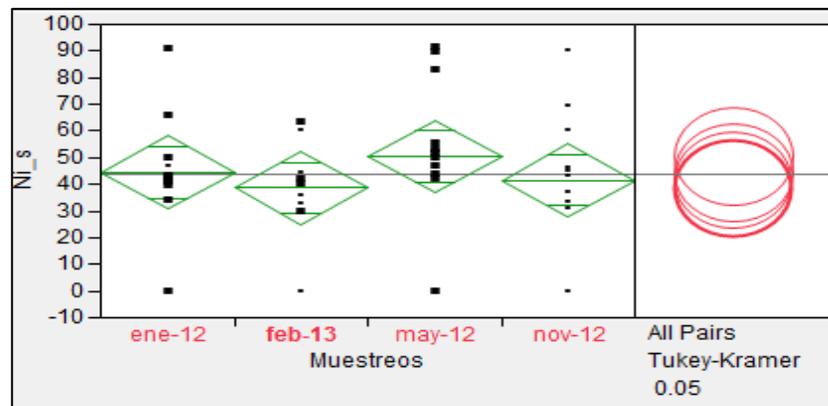
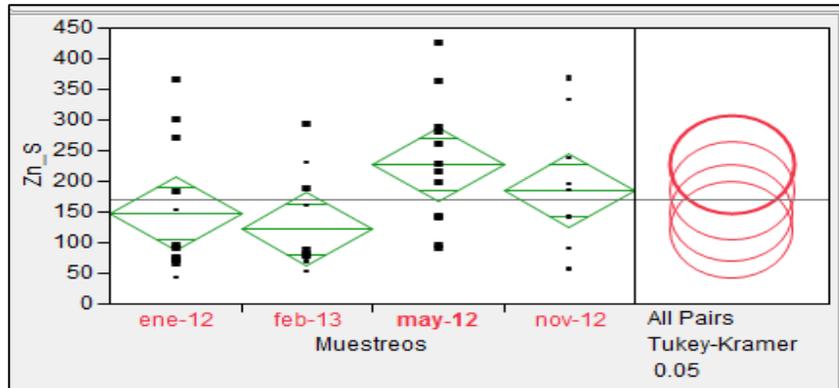
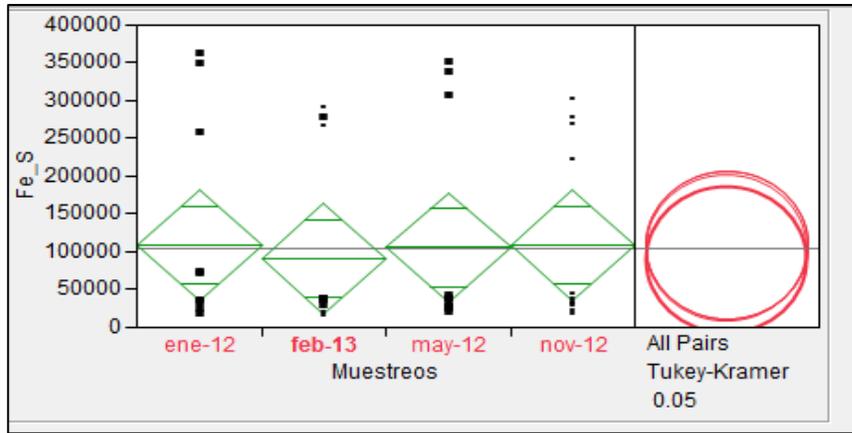


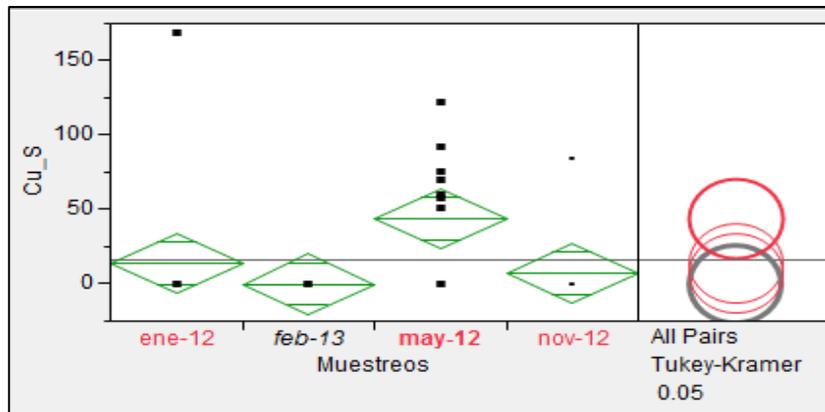
Gráfica 68.- Concentraciones de arsénico en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.4.- Análisis estadístico en sedimentos

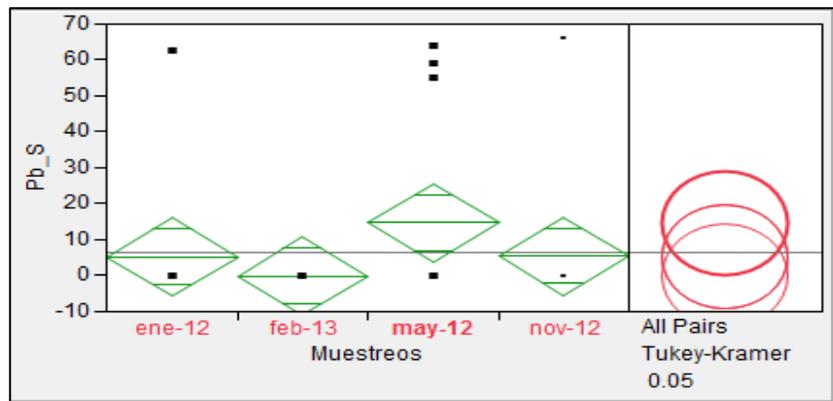
Se realizó la prueba Anova y de tuckey para comparar los metales pesados en los diferentes muestreos realizados, en este caso no se les realizó la prueba estadística para los parámetros fisicoquímicos ya que son variables nominales y no presentan las características para llevarlo a cabo, debido al comportamiento también de los datos de los metales pesados solo se realizó la prueba para Fe, Zn, Ni, Cu, Pb y As. Los valores de ANOVA y de la prueba de Tukey-Kramer se encuentran en el Anexo D (Cuadros del 75 al 86).

El Fe presentó una $P= 0.9823$, la cual nos muestra que las medias son muy parecidas en los cuatro muestreos, por lo cual no existe diferencias significativas, la prueba de tukey nos muestra que existe un comportamiento muy similar (Gráfica 69, Cuadros 75 y 76). Para el Zn se tiene una $P= 0.0823$, la cual también nos indica que no existe una gran diferencia entre las medias, el sitio de may-12 es el que presenta la media más aleja a la media promedio, pero las combinaciones se dan entre los cuatro muestreos mostrándonos que existen similitudes entre ellos (Gráfica 70, Cuadros 77 y 78). El Ni presenta también un comportamiento estadístico similar a los metales pesados anteriores, en el cual no se tienen diferencias significativas, presentando una $P=0.647$ (Gráfica 71, Cuadros 79 y 80). El Cu presentó una $P=0.0181$, por lo que se tiene diferencias significativas lo cual se aprecia en la Gráfica 72 y los cuadros 81 y 82, donde el muestreo de may-12 presenta la mayor variación. El Pb solo en el muestreo de mayo es donde se tiene una pequeña variación entre la media, pero debido a que no es muy grande no representa una diferencia significativa, por lo que se tiene un comportamiento estadístico muy similar en los cuatro muestreos (Gráfica 73, Cuadros 83 y 84). El As tiene una $P= 0.1987$, lo cual nos indica que este metal pesado con respecto a los muestreos no se tienen diferencias significativas, ya que las medias son muy similares (Gráfica 73, Cuadros 85 y 86).

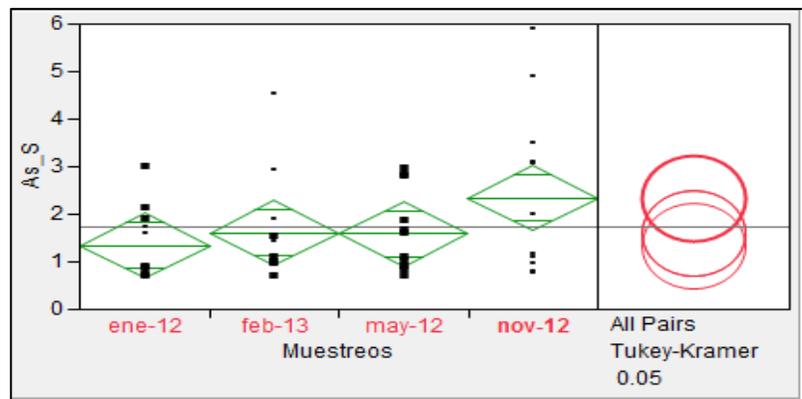




Gráfica 72.- Análisis de una vía para cobre (mg L^{-1}) por muestreo.



Gráfica 73.- Análisis de una vía para el plomo (mg L^{-1}) por muestreo.



Gráfica 74.- Análisis de una vía para el arsénico (mg L^{-1}) por muestreo.

8.2.5. Distribución de metales pesados y As en fracciones geoquímicas

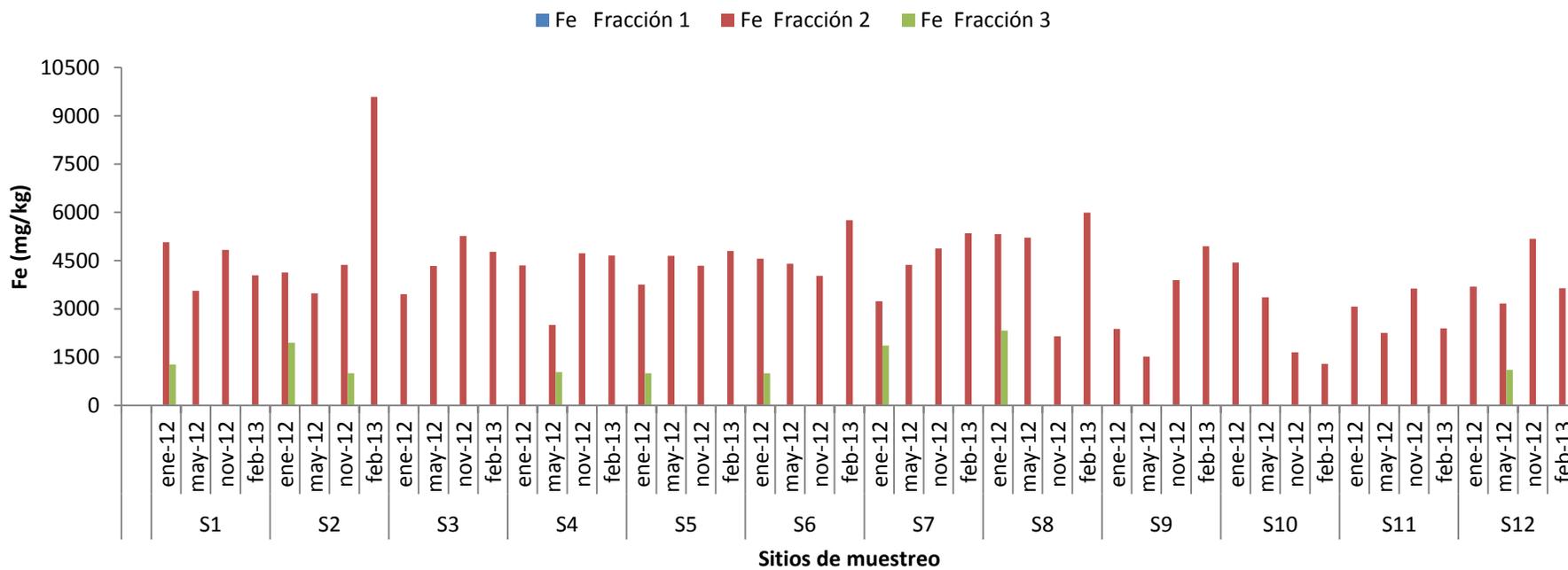
Las concentraciones obtenidas de las fracciones geoquímicas se muestran en los Cuadros del 16 al 23 del Anexo B. Cabe mencionar que existe una variación entre las concentraciones de los metales totales y los metales de las fracciones geoquímicas, esto se debe a diversos errores indeterminados: como error del analista o sesgo, condiciones experimentales y variabilidad inherente en los instrumentos de medición.

8.2.5.1. Fracciones de Fe

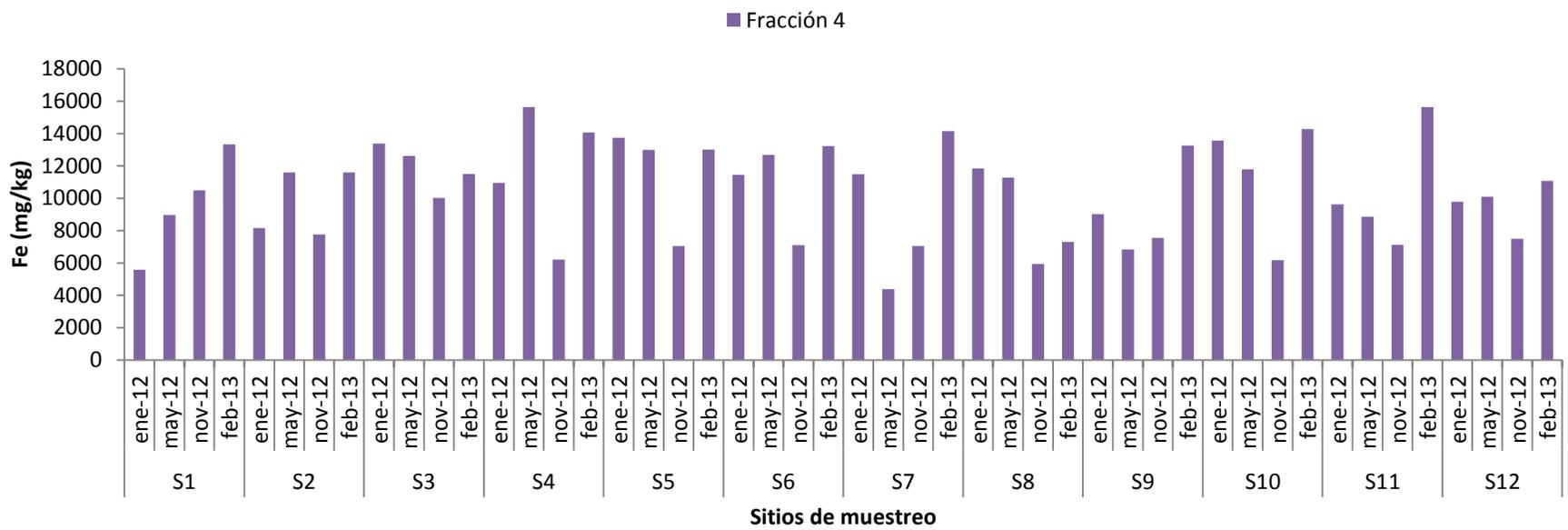
Las concentraciones de las fracciones 1, 2 y 3 se muestran en la Gráfica 75, donde predominó la fracción ligada a óxidos de Fe y Mn, presentando la concentración más alta en el sitio S2 en el mes de feb-13, cabe señalar que esta fracción pertenece a las fracciones disponibles las cuales suelen darle una mayor disponibilidad a este metal, pero debido a que el comportamiento fue muy similar a lo largo del río Grande en las cuatro campañas de muestreo, nos indica que no han ingresado más cantidades de Fe a la columna de agua y tampoco han salido grandes concentraciones de este metal, esto se debe principalmente al pH que presentan los sedimentos ya que favorece a una mayor retención de este metal por parte de los óxidos de Fe, por esto las concentraciones no varían mucho a lo largo del estudio.

En cuanto a las Fracciones F1 y F3 las concentraciones fueron muy pequeñas en comparación con las otras fracciones ya que presentaron concentraciones por debajo de 1000 mg kg^{-1} , estas fueron las que presentaron mayores variaciones a lo largo del estudio por lo que se puede creer que existe movilidad hacia las otras fracciones, en cuanto a la F1 esta puede estar interactuando con el agua y con la F2, para la F3 está interactuando con la F2 y F4.

El hierro se encontró en mayores concentraciones en la F4 la cual es llamada fracción residual (Gráfica 76), las concentraciones encontradas estuvieron por arriba de 2000 mg kg^{-1} , el Fe asociado a esta fracción es indicio de su origen litogénico debido a las altas concentraciones encontradas, por lo que su remoción no puede llevarse bajo condiciones normales. Esta distribución sugiere la existencia de estructuras cristalinas y parcialmente óxidos cristalinos de Fe.



Gráfica 75.- Fracciones geoquímica del hierro en lo sedimentos del río Grande de Morelia.



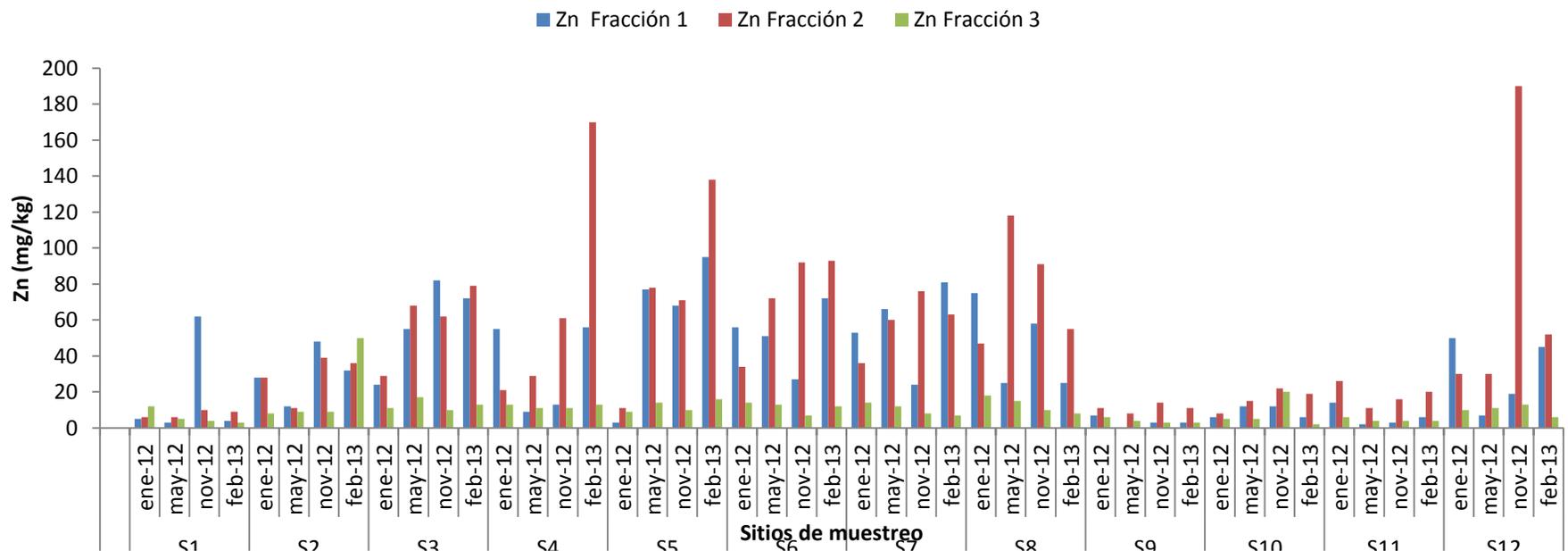
Gráfica 76.- Concentraciones de hierro en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.5.2. Fracciones de Zn

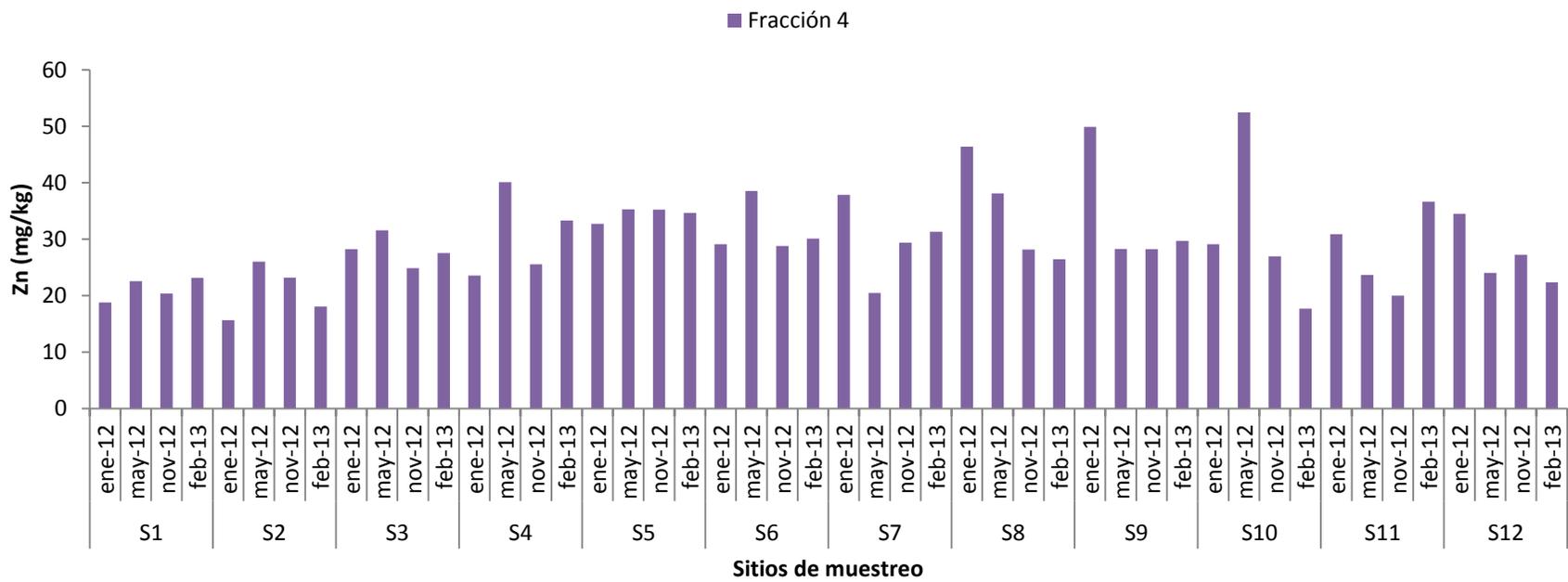
El Zn presentó las concentraciones más elevadas en las fracciones F1 y F2 en la mayoría de los sitios, las cuales corresponden a la fracción unida a iones intercambiables y carbonatos, y a la fracción unida a óxidos de Fe y Mn, respectivamente. Estas dos fracciones son las que se encuentran en mayor disponibilidad. Lo cual nos indica que este metal está ingresando a la columna de agua de forma constante y reciente, también se puede observar que la fracción residual es menor en comparaciones con los otros metales, dando indicios de que el Zn tiene una alta movilidad, en estos sitios. Sin embargo, en los sitios S1, S9, S10 y S11 la fracción mayoritaria fue la cuatro que corresponde a la fracción residual, limitando así su resuspensión (Gráfica 77 y 78).

Como podemos observar las concentraciones más altas de las fracciones F1, F2 y F3 se presentaron en los sitios que se encuentran en la zona de Morelia, Atapaneo, La Goleta y Álvaro Obregón, dándonos indicios que en las descargas municipales ingresan metales pesados al río Grande, también debido a las concentraciones presentadas en el sitio S11 se puede creer que existe un arrastre de metales pesados a la desembocadura del río Grande, teniendo así un ingreso de sedimentos al lago de Cuitzeo.

Las concentraciones de la F4 no variaron mucho a lo largo del estudio, indicándonos que no se tienen ingresos o salidas del Zn en esta fracción, por lo que no representa ningún peligro ya que no se encuentra disponible.



Gráfica 77.- Fracciones geoquímicas del zinc en los sedimentos del río Grande de Morelia.



Gráfica 78.- Concentraciones de zinc en la fracción cuatro de los sedimentos del río Grande de Morelia.

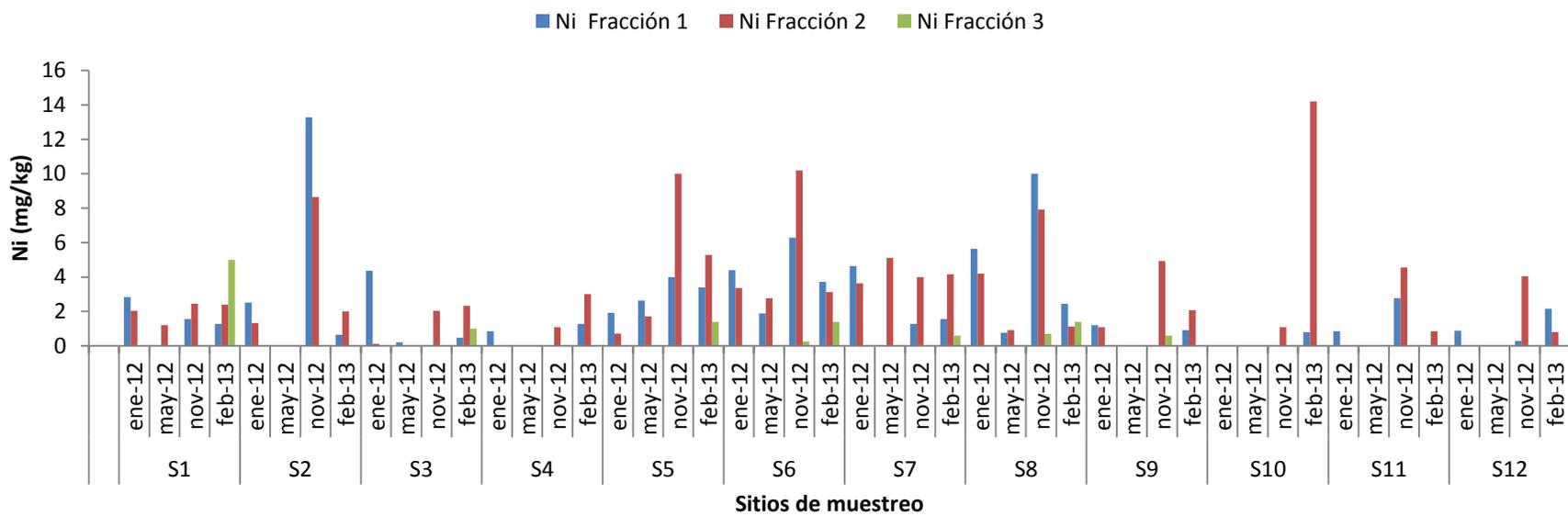
8.2.5.3. Fracciones de Ni

El Ni presentó concentraciones en todas las fracciones, siendo la de mayor concentración en la mayoría de los sitios la F4 y la de menor concentración la fracción F3, correspondiente a la fracción residual y la fracción ligada a la materia orgánica y sulfatos, las concentraciones oscilaron entre 2 a 18 mg kg⁻¹ en todos los sitios (Gráfica 79 y 80).

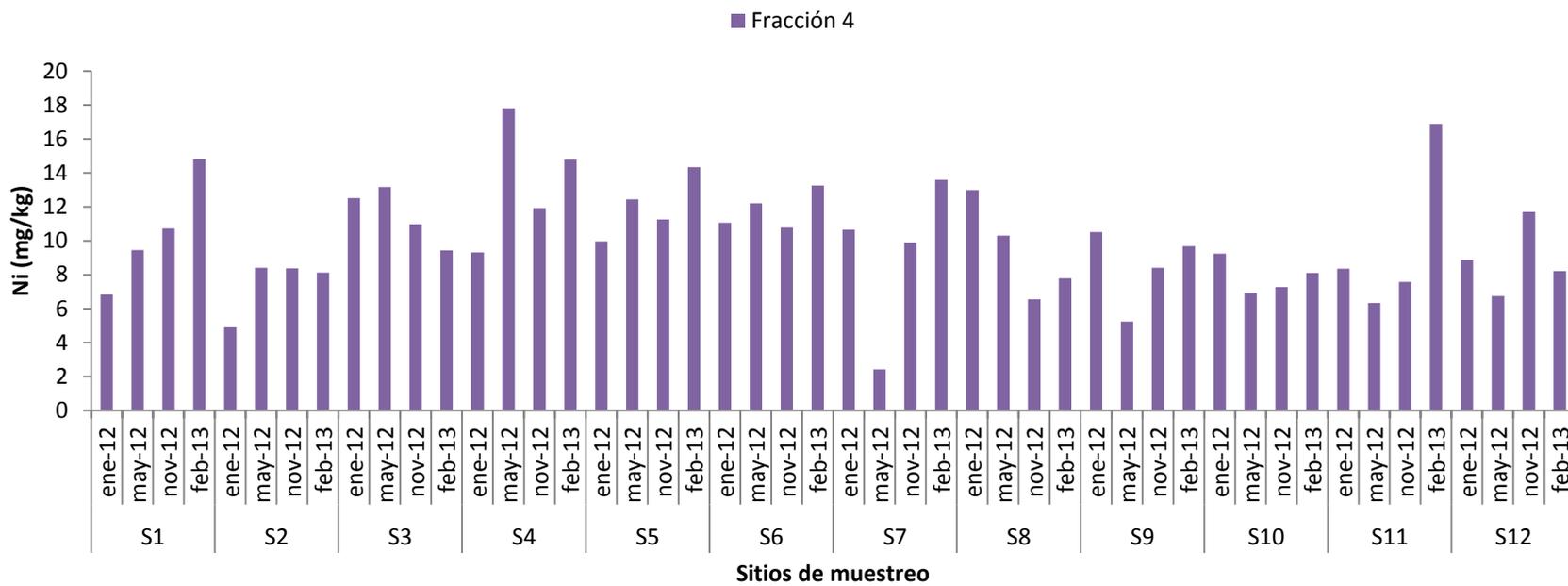
Las fracciones F1 y F2 presentaron las concentraciones más altas en los sitios S2 en el mes de nov-12 y S10 en el mes de feb-13, respectivamente, estas dos fracciones son altamente resuspendibles ya que se encuentra ligadas a iones intercambiables y carbonatos, así como a óxidos de Fe y Mn, podemos observar también que estas concentraciones se encuentran en el S2, S5, S6, S7, S8 y S11, indicándonos que el Ni es ingresado por las arrastres agrícolas y descargar municipales principalmente, la variación de estas dos fracciones a lo largo del estudio fueron muy cambiantes por lo cual se cree que si existe un alta interacción del Zn entre el agua y el sedimento.

La fracción F4 se comporta con concentraciones muy similares en todos los sitios y en todos los muestreos, reafirmando que esta fracción es la que tiene la mayor retención de los metales ya que es muy difícil poder desprenderlos de esta capa del sedimento, aunque también no han habido ingresos de concentraciones nuevas del Zn ya que como se mencionó no existe incremento considerables de este metal en esta fracción.

El Ni se encuentra en forma natural en la corteza terrestre combinado con otros elementos, por lo que parte del Zn encontrado en la F4 se considera parte de esta.



Gráfica 79.- Fracciones geoquímicas de níquel en los sedimentos del río Grande de Morelia.



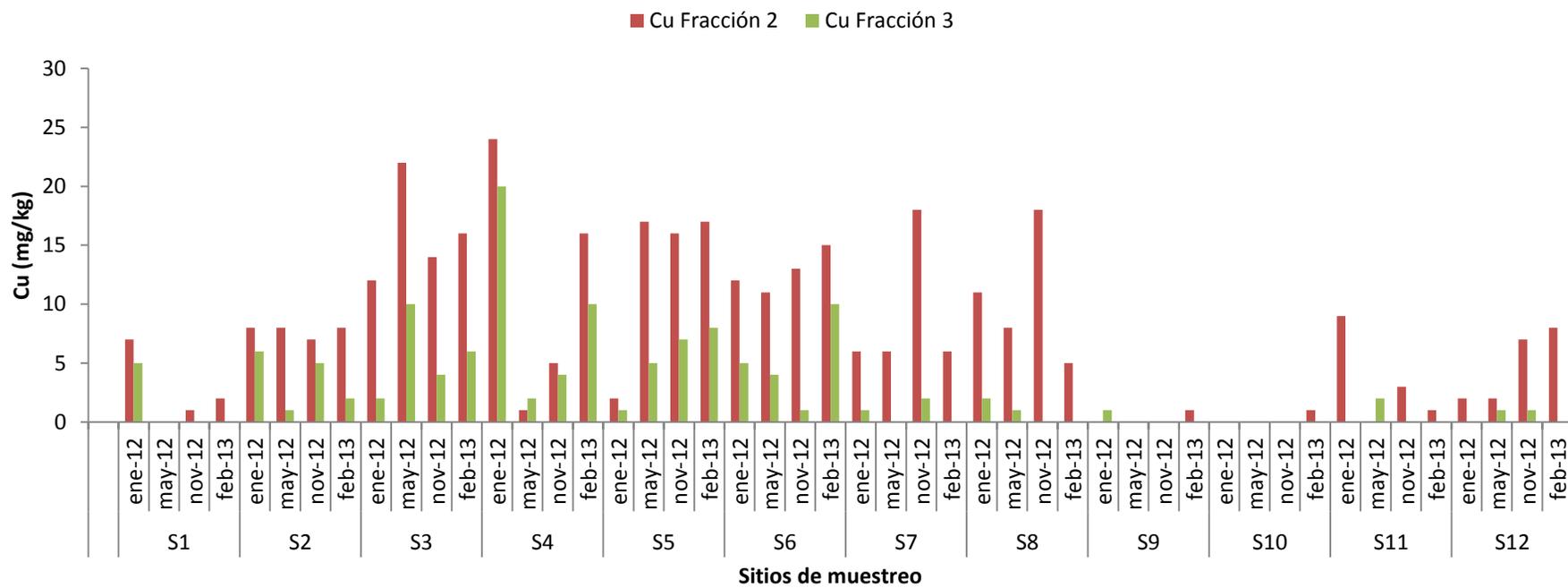
Gráfica 80.- Concentraciones de níquel en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.5.4. Fracciones de Cu

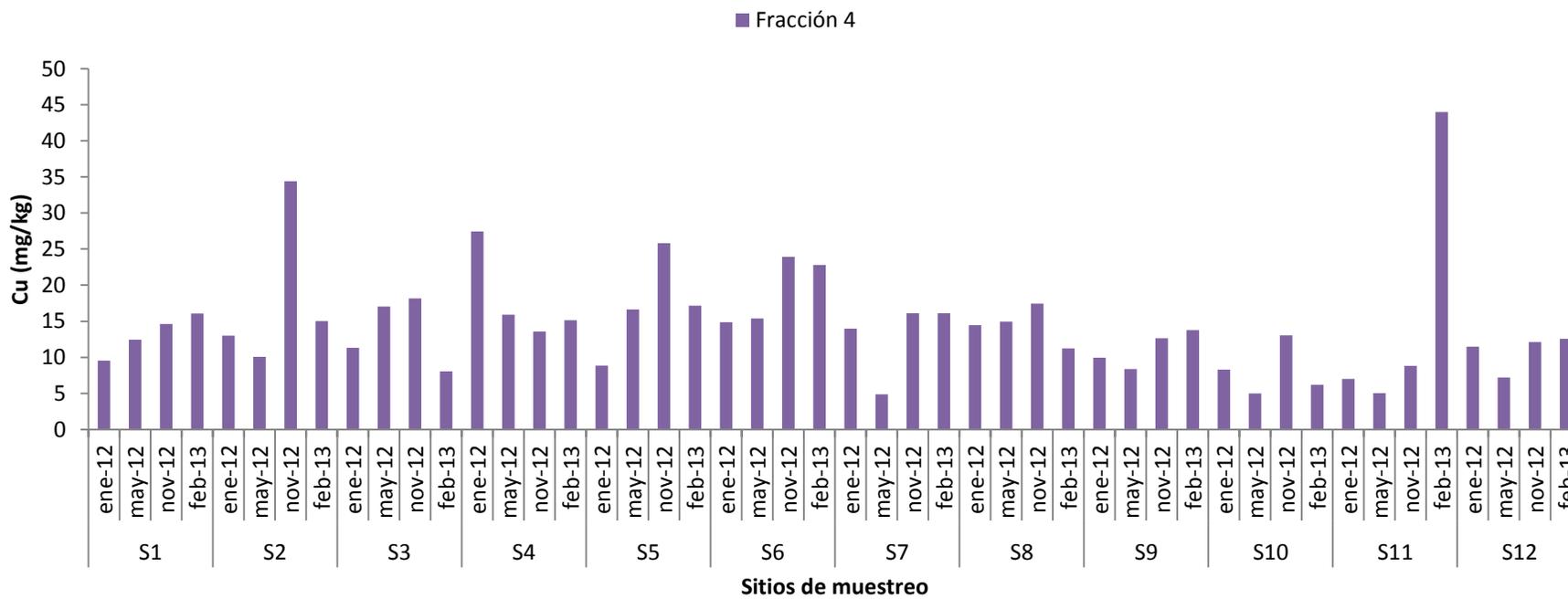
Las concentraciones de Cu se presentaron en las fracciones F2, F3 y F4, predominando esta última. En la Gráfica 81, se observa que en los sitios S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 y S8 se tienen las concentraciones más altas de las fracciones F2 y F3, esto se debe principalmente a que las condiciones del río Grande favorecen a la formación de óxidos de Fe y a que las cantidades de materia orgánica en los sedimentos es alta, por eso la mayoría de los metales de las fracciones de sedimentos se presentan en estas dos. Al igual que el comportamiento del Zn y el Ni, el Cu presenta las concentraciones más elevadas en la zona de la ciudad de Morelia, Atapaneo y La Goleta, lo cual nos reafirma que la entrada de estos metales pesados se da por las diferentes descargas residuales que se tienen ahí.

De acuerdo a las concentraciones de agua y de las fracciones F1, F2 y F3, de este metal, se puede decir que es transportado fuera de la columna de agua, ya que en el agua presenta concentraciones muy bajas y en las fracciones presenta variaciones de concentración en los diferentes sitios, lo cual nos puede dar a creer que si existe una interacción entre estos dos medios provocando que el Cu ingrese al agua y sea arrastrado hacia otros lugares.

Con respecto a la fracción F4, está tiene un comportamiento muy similar a lo largo del estudio, por lo cual no se tienen cambios considerables en las concentraciones de esta fracción, a excepción de los sitios S2 y S3 que presentan un incremento de esta fracción, indicándonos que se tiene ingreso de este metal por aportación de las otras fracciones (Gráfica 82).



Gráfica 81.- Fracciones geoquímicas de cobre en los sedimentos del río Grande de Morelia.



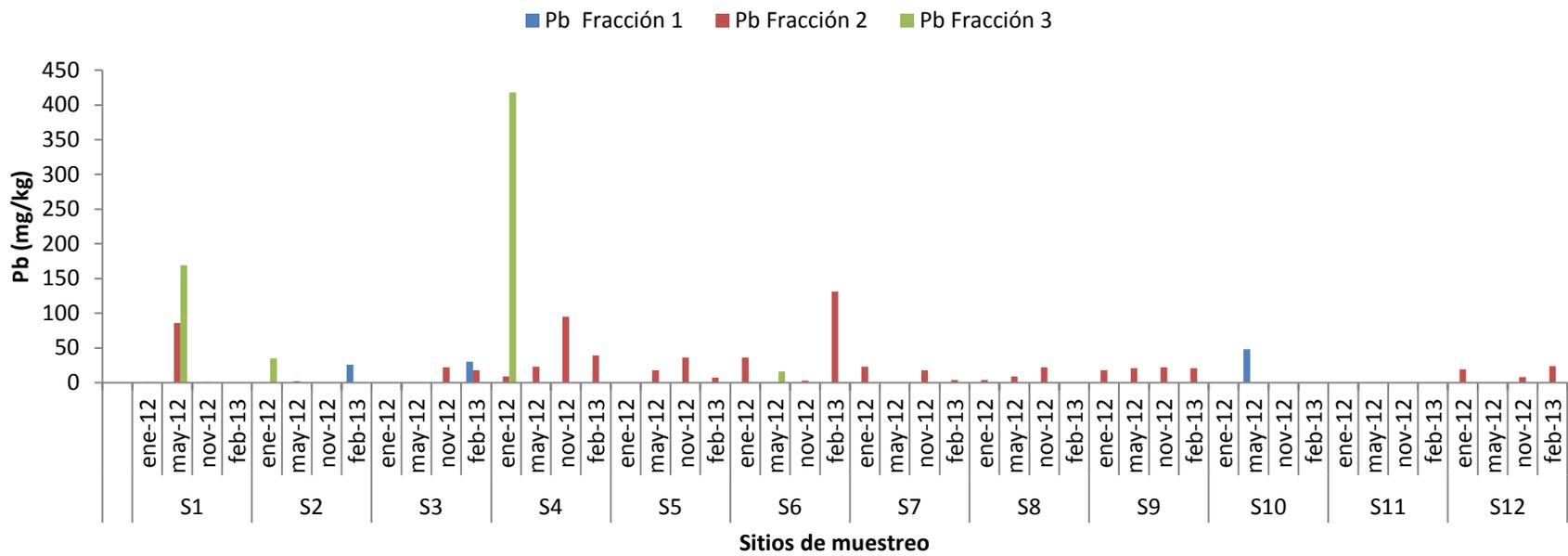
Gráfica 82.- Concentraciones de cobre en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.5.5. Fracciones de Pb

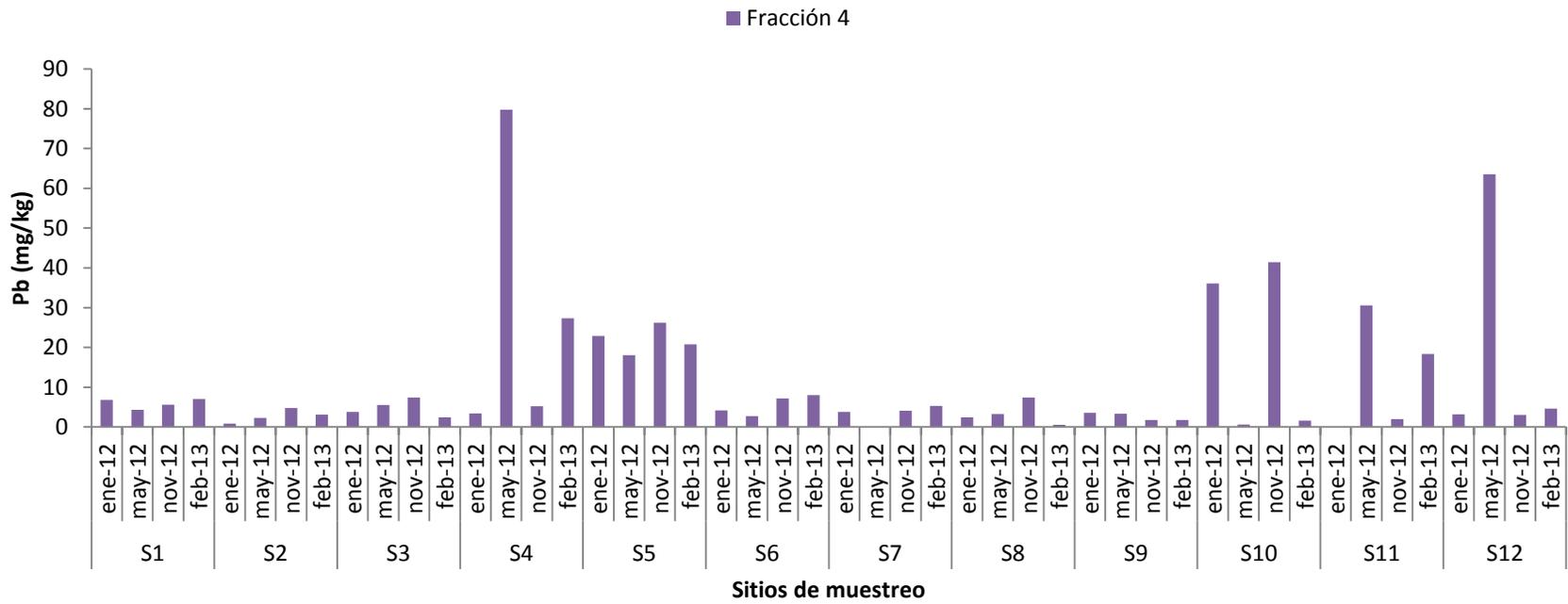
El Pb presentó con respecto a las primeras tres fracciones, concentraciones en todos los sitios excepto el S11, se obtuvo el valor más alto en S4 con 400 mg kg^{-1} en el mes de ene-12 (Gráfica 83), de acuerdo al comportamiento de este metal se puede decir que existe un gran intercambio de este l hacia las aguas y viceversa, ya que las concentraciones varían mucho en cada muestreo, en el S4 donde se tuvo la mayor concentración se considera que existió una descarga puntual y que debido a las condiciones del río Grande favorecieron a que este se uniera a la materia orgánica, pero como podemos ver esta concentración disminuyó en los otros muestreos y de acuerdo a los resultados de la F4 este se transportó a capas del sedimento más profundo.

Con respecto a lo obtenido el Pb se considera que ha sido ingresado a la columna de agua recientemente, pero de acuerdo a las características del sedimento este favorece a que el Pb se una a las fracciones no disponibles, esto se puede ver claramente en la F4.

En cuanto a la fracción 4, ésta osciló entre 10 y 80 mg kg^{-1} , los sitios que presentaron las concentraciones más elevadas fueron S4, S5, S10, S11, S12, lo cual nos indica que en estos sitios se tienen las mayores descargas de este metal, de acuerdo al pH obtenido y la gran cantidad de materia orgánica que presenta el sedimento favorece a la retención de este metal llevándolo hasta las capas más profundas del sedimento, dándole muy poca disponibilidad para que pueda ser resuspendido (Gráfica 84).



Gráfica 83.- Fracciones geoquímicas de plomo en los sedimentos del río Grande de Morelia.



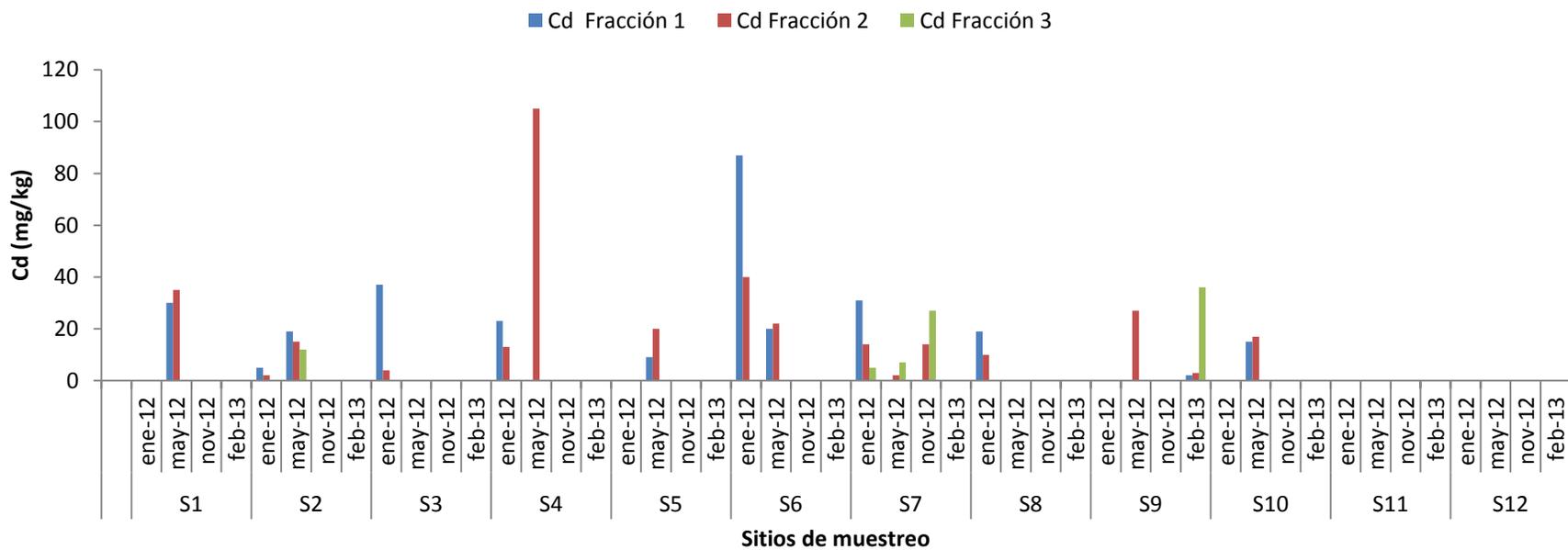
Gráfica 84.- Concentraciones de plomo en la fracción cuatro de los sedimentos del río Grande de Morelia.

8.2.5.6. Fracciones de Cd

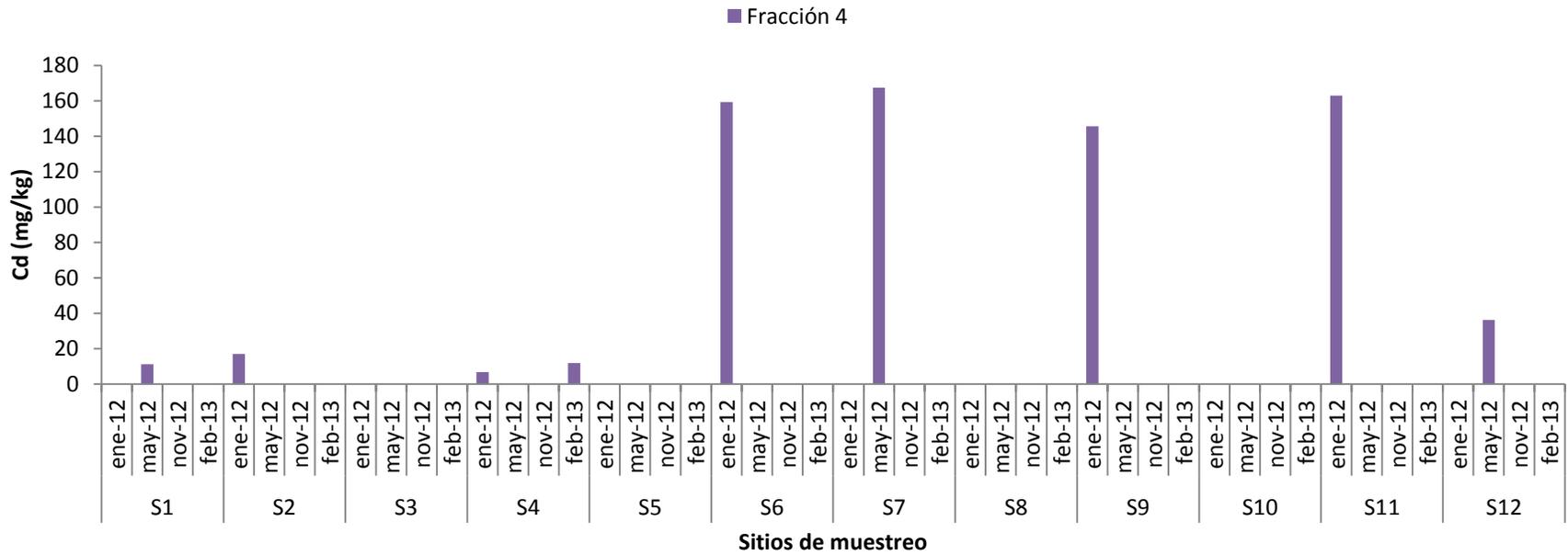
El Cd presentó las concentraciones más elevadas en los muestreos de ene-12 y may-12, en las F1, F2 y F4, con concentraciones de hasta 160 mg/kg, en los muestreos de nov-12 y feb13, se presentó en los sitios S7 y S9, con la F3. En la Gráfica 85 se muestran las primeras tres fracciones, observando que las fracciones unidas a iones intercambiables y carbonatos así como la fracción unida a óxidos de Fe y Mn son las que se encuentran en mayor concentración, por lo que el Cd se encuentra en una alta disponibilidad interactuando con el sistema acuático, provocando así su movilidad a lo largo del río Grande. De acuerdo a esto en los S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 y S10, se tienen descargas con concentraciones de este metal, por lo que la contaminación se da desde el inicio del río Grande donde se presentaba la mejor calidad, en el S1 no se tienen descargas domésticas ni industriales, lo que puede estar provocando el ingreso de metales pesados al manantial es la agricultura, ya que en esta zona se realiza esta actividad.

La Gráfica 86 muestra la F4, donde solo los sitios S1, S2, S4, S6, S7, S9, S11 y S11 presentan concentraciones, por lo que podemos observar que el Cd es arrastrado por los sedimentos y se acumula en los sitios S6, S7, S8, S9 y S10, de acuerdo a las concentraciones encontradas el Cd ya no se presentó en los últimos muestreos, lo que nos hace suponer que este ha sido removido de estos lugares, debido al desazolve del río Grande.

De acuerdo a las concentraciones presentadas en el estudio de Cd nos demuestran que existen descargas residuales con altas concentraciones de este metal y de manera más o menos continua, por lo que se puede considerar que el Cd está ingresando a los cultivos agrícolas así como al lago de Cuitzeo, lo cual es preocupante ya que las concentraciones están por arriba de los límites máximos permisibles de las normas para sedimentos para la preservación de la vida acuática.



Gráfica 85.- Fracciones geoquímicas de cadmio en los sedimentos del río Grande de Morelia.

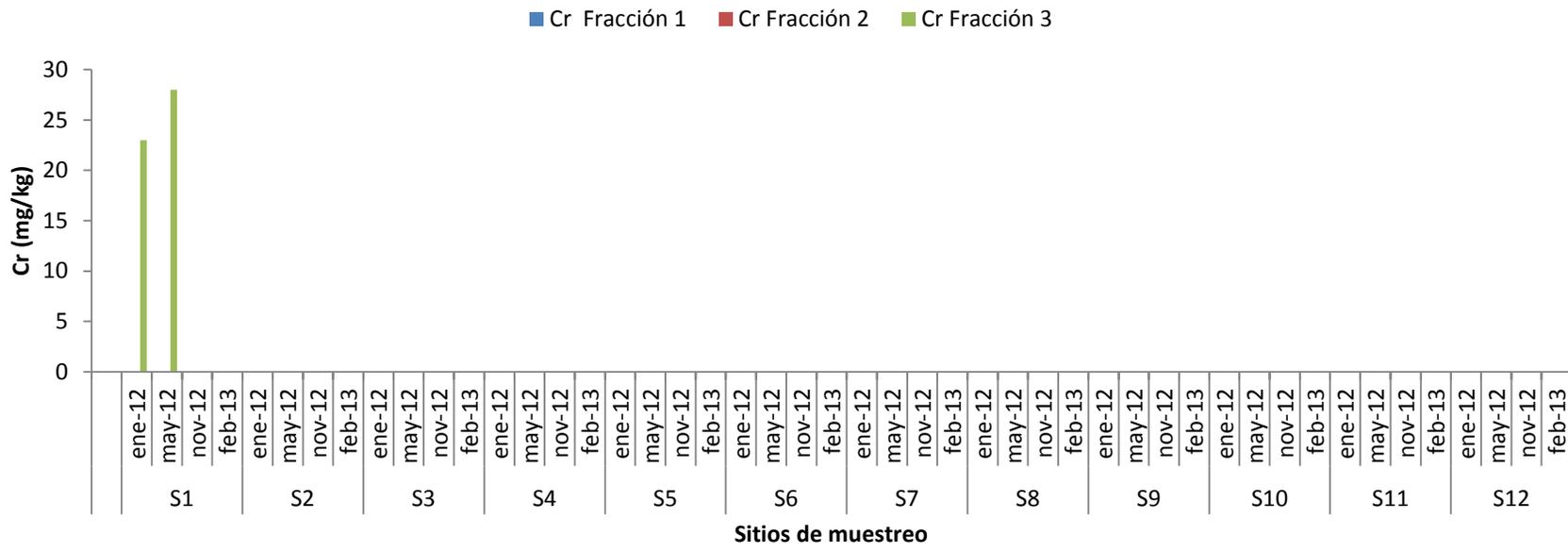


Gráfica 86.- Concentraciones de cadmio en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

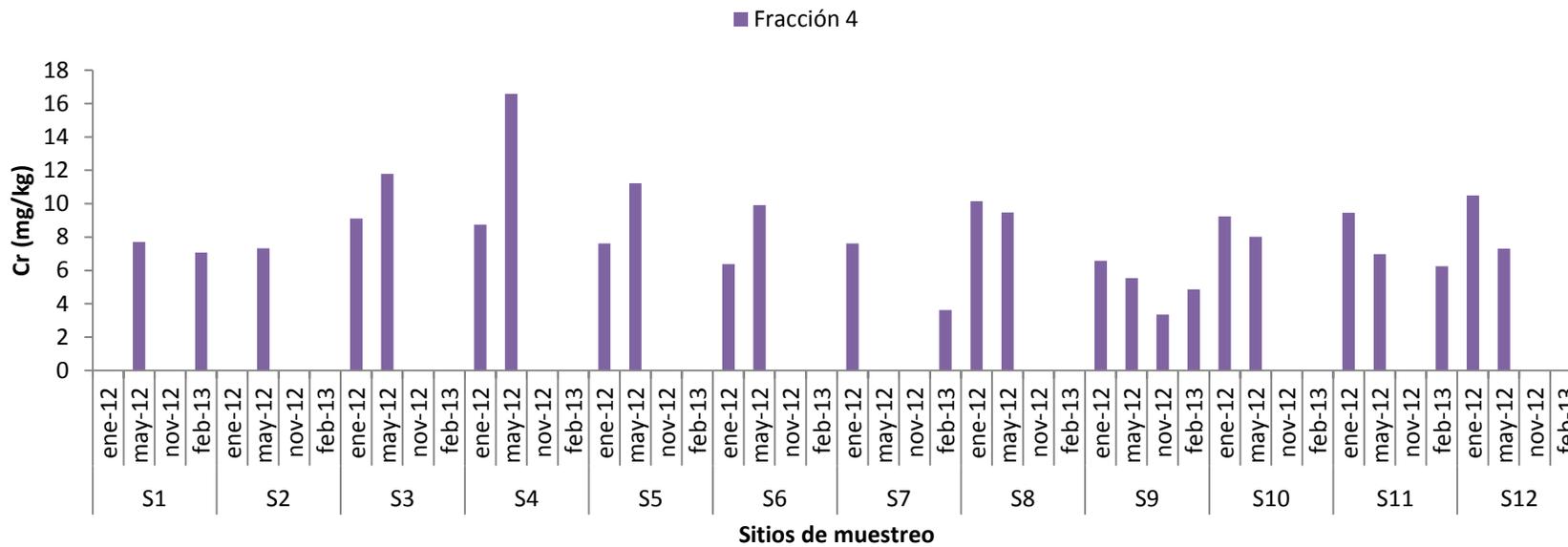
8.2.5.7. Fracciones de Cr

Las concentraciones de Cr se muestran en las Gráficas (87 y 88), se puede observar que la fracción que predominó fue la residual, en cuanto a la fracción unida a la materia orgánica y sulfatos solo se encontró en los sitios S1, las cuales son consideradas como fracciones no disponibles ya que es muy difícil que suelten a el metal, por lo que el Cr no presenta algún peligro para la salud humana, esto nos indica que en las descargas recientes este metal no ha sido desechado, pero se debe tener en cuenta que se tiene un indicio de que existen descargas que lo han contenido, así también que el manantial la Mintzita presenta contaminación por metales pesados lo cual es importante ya que su agua es utilizada para el uso y consumo humano de la ciudad de Morelia, por lo que el tratamiento que se le debe dar debe incluir algún método de eliminación de metales pesados.

En la fracción cuatro el Cr se presenta en más sitios, las concentraciones fueron casi similares en cada sitio, lo cual nos indica que no existe un ingreso reciente de este metal al río Grande, por lo tanto no existe peligro por este metal en los sedimentos ya que las concentraciones se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles de las normas para sedimento.



Gráfica 87.- Fracciones geoquímicas de cromo en los sedimentos del río Grande de Morelia.

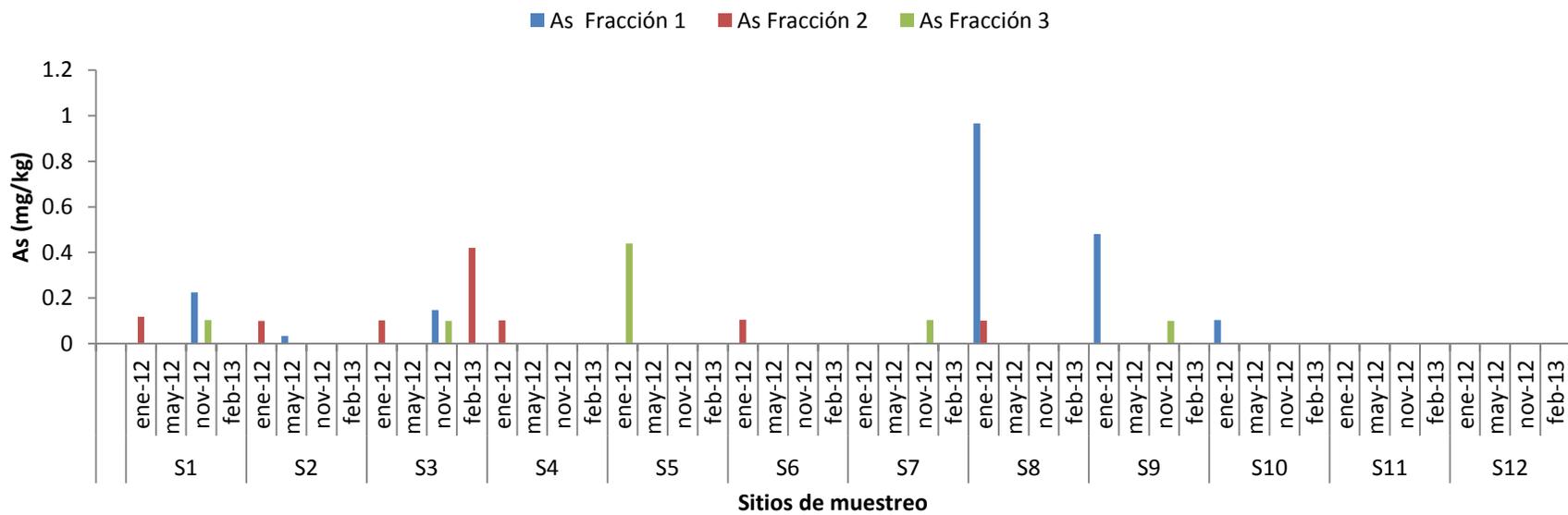


Gráfica 88.- Concentraciones de cromo en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

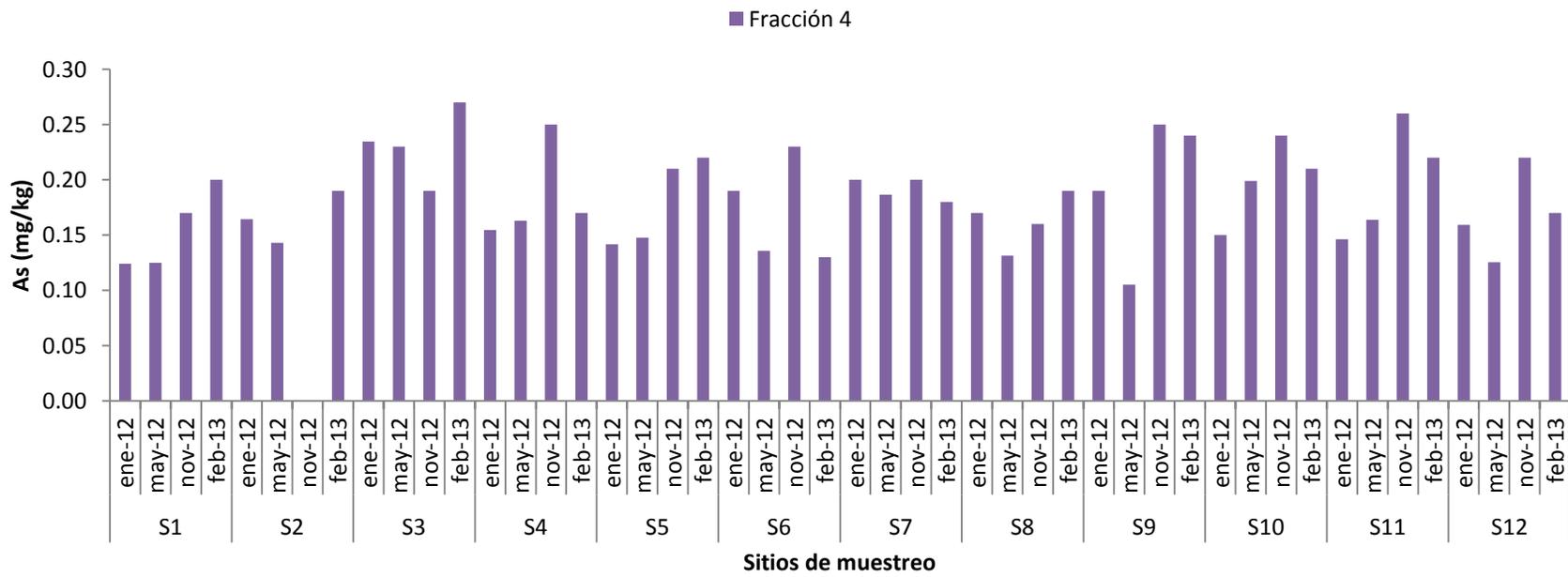
8.2.5.8. Fracciones de As

Las F1, F2 y F3, se muestran en la Gráfica 89, en la que observamos que el As se encontró en los sitios S1, S2, S6, S7, S8, S9 y S10, donde las fracciones disponibles predominaron, las concentraciones estuvieron entre 0.1 y 1 mg kg⁻¹ siendo esta última la más alta en el sitio S8 en ene-12. De acuerdo a estos resultados las concentraciones son bajas por lo que aunque se encuentren en las fracciones disponibles no presentan grave peligro para las plantas y animales, al contrario en estas concentraciones son buenas para el crecimiento de las plantas.

La fracción residual presento las concentraciones más elevadas con valores entre 0.1 y 0.25 mg kg⁻¹, su comportamiento fue más o menos similar a lo largo del río lo cual se puede observar en la Gráfica 90, estas concentraciones pueden ser principalmente debido a la presencia del As en el suelo, ya que en el agua las concentraciones fueron muy bajas indicándonos que no existen grandes cantidades de AS en las descargas residuales que recibe el río Grande.



Gráfica 89.- Fracciones geoquímicas de arsénico en los sedimentos del río Grande de Morelia.



Gráfica 90.- Concentraciones de arsénico en la fracción cuatro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

CONCLUSIONES

Existe un incremento en la contaminación del río Grande con respecto a los estudios anteriormente realizados, esto se debe posiblemente a las descargas municipales e industriales, por ser las que aportan gran cantidad de contaminantes al río Grande, lo cual afecta a los diferentes parámetros de calidad, también estas aguas residuales son grandes aportadoras de sales y partículas disueltas y lo más importante de metales pesados, lo cual hace peligroso su uso para fines agrícolas.

Aunque el río Grande no es muy largo tiene una gran recuperación en su desembocadura puesto que los parámetros físicoquímico disminuyen en los últimos sitios de muestreo, debido principalmente a la forma que tiene y a la velocidad de su cauce, mucho se pensaría que la planta tratadora de aguas residuales de Atapaneo sería la que provocara esto pero de acuerdo con el presente estudio el sitio cercano a La Goleta en donde descarga el agua tratada es uno de los que presenta mayor contaminación.

Los metales en agua, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles que indica la NOM-001-SEMARNAT-1996, cabe destacar que éstos son persistentes por lo tanto, pueden acumularse en los animales o las plantas, pudiendo ser una vía de ingreso a la cadena trófica, debido a que el agua del río Grande es utilizada para riego de cultivos agrícolas y sus aguas llegan al lago de Cuitzeo donde existen vida acuática

En cuanto a los metales en sedimentos en México todavía no existe normatividad que los regule, pero de acuerdo a la normatividad canadiense todos los metales estudiados a excepción del As superan los límites máximos permisibles, por lo que representan un grave problema ya que los sedimentos son arrastrados al lago Cuitzeo donde varios peces se alimentan de los microorganismos que se encuentran en el sedimento, otra grave problemática es el desazolve del río Grande, debido a que los sedimentos se colocan a los costados de este y en varios sitios son utilizados para cultivar. De acuerdo también a las fracciones geoquímicas estudiadas la mayoría de los metales pesados se encuentran en las fracciones F1 y F2 siendo estas las más disponibles y las más fáciles de desprenderse por lo que se cree que existe una alta interacción de los metales pesados con el agua y sedimentos del río Grande.

RECOMENDACIONES

- Realizar proyectos sustentables como programas para las actividades agropecuarias en los cuales se promuevan la utilización de compuestos naturales, así como un mejor orden territorial para las nuevas parcelas e industria, y pláticas para crear concientización en las poblaciones, y así ayudar a la remediación y recuperación de la calidad del río Grande.
- Implementar plantas de tratamiento de aguas residuales en puntos estratégicos de Morelia, así como en las poblaciones aledañas, por ejemplo colocar una planta de tratamiento exclusiva para la zona industrial ya que sus aguas residuales son muy diferentes a las municipales y domésticas, y una en la zona de Álvaro Obregón ya que es un municipio cercano a las pequeñas poblaciones cercanas al río Grande, las cuales también son aportadoras de aguas residuales.
- Hacer mejoras a las plantas de tratamiento de aguas residuales actuales, como tener una mejor captación de estas aguas, tener un mejor tratamiento químico para la eliminación de metales pesados.
- Ampliar el estudio multidisciplinario para el río Grande para tener mejores propuestas de remediación.
- Involucrar a las instancias gubernamentales como al gobierno Municipal de las poblaciones cercanas al río Grande así como también al gobierno Estatal y Federal tratando que el personal de los puestos más altos se encuentren enterados sobre el tema de la recuperación de la calidad del río Grande, para que así se comience a prestar atención y se obtenga apoyo por parte de ellas.
- Realizar estudios fisicoquímicos y de metales pesados más estrictos a la industria que se encuentra dentro de la ciudad de Morelia y en la zona industrial, debido a que estos son aportadores de desechos al río.
- Mejorar la normatividad mexicana en cuestión de calidad del agua y protección ambiental, ya que no cuentan con las recomendaciones necesarias para todos los parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y metales pesados que se requieren para realizar un estudio completo de calidad de agua.
- Crear una normatividad para sedimentos con límites máximos permisibles para metales pesados, ya que actualmente no se cuenta con alguna en México, y como se observa en el presente estudio las mayores concentraciones de metales pesados se encuentran en ellos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca Sergio, Mora Bernardo. 2007. Contaminación del agua. Rev. Biocenosis. 20, 1-2.
- Abrego Guadalupe. 2005. Determinación de parámetros de calidad del agua en el escurrimiento del Río Grande de Morelia, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Civil, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Ackay H., Oguz A., Karapire. 2003. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments Water research, 37: 813 – 822.
- Adame R.A. y Salin P.D.A. 1993. Contaminación ambiental, Editorial Trillas, México. 31 - 50.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2005. Priority List of Hazardous Substance.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).2013. Evaluación de los datos ambientales, biológicos y de salud de la isla de Vieques, Puerto Rico.
- Alfaro R. 2010. Estudio de la movilidad y toxicidad de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del lago de Cuitzeo, Michoacán. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Andrade María Luisa, Fernández Emma y Alonso Vega María Flora. 2005. Influencia del manejo agrícola intensivo en la contaminación del suelo. Rev. Pilque, Agronomía. 7(7).
- APHA-AWWA-WPCF (1995).Methods for the examination of water, 19ª Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF). USA.
- CEQGS. 2010. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life.
- Bartlett, A.J., Borgmann, U., Dixon, D.G., Batchelor, S.P. & Maguire, R.J. 2004. Accumulation of tributyltin in *Hyalella azteca* as an indicator of chronic toxicity: survival, growth, and reproduction. Environ. Toxicol. Chem., 23 (12): 2878-2888.
- Bendell-Young, L.I., Chouinard, J. & Pick, F.R. 1994.Metal concentrations in chironomids in relation to peatland geochemistry.Arch. Environ. Con. Tox., 27:186-194.
- Berry, W.J., Hansen, D.J., Mahony, J., Robson, D., Di Toro, D.M. & Shipley B. 1996.Predicting the toxicity of metal-spiked laboratory sediments using acid-volatile sulfide and interstitial water normalizations.Environ. Toxicol, 15(12): 2067-2079.
- Besser, J.M., Brumbaugh, W.G., May, T.W. & Ingersoll, C.G. 2003. Effects of organic amendments on the toxicity and bioavailability of cadmium and copper in spiked formulated sediments.Environ.Toxicol.Chem. 22: 805-815.
- Bilos, C., Colombo, J.C. &Rodríguez Presa, M.J. 1998. Trace metals in suspended particles, sediments and Asiatic clams (*Corbicula fluminea*) of the Río de la Plata Estuary, Argentina. Environ. Pollut., 99:1-11.
- Botello, A. V., J.L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomeli, 1996. Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, México. EPOMEX serie Científica 5. 666.

- Bryan, G.W. & Langston, W.J. 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environ. Poll.* 76: 89-131.
- Camili6n, M.C., Manassero, M.J., Hurtado, M.A. & Ronco, A.R. 2003. Copper, Lead and Zinc distribution in soils and sediments of the South Western coast of the R6o de la Plata estuary. *J. Soils Sediments*, 3(3): 213-220.
- Carazo, A., S. CArvajal, S. Collado, B. Espasand6n, A. Hernando, B. Mart6nez, M. Mart6nez, y Y. Reid, 2006. Metales pesados y medio ambiente. Control microbiol6gico de La contaminaci6n por metales pesados y biominer6a. Universidad Aut6noma de Madrid, Espa6a. 28.
- Chapman, P. M., Wang, F., Janssen, C., Persoone, G. & Allen, H. E. 1998. Ecotoxicology of metals in aquatic sediments: binding and release, bioavailability, risk assessment, and remediation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55(10):2221-2243.
- Chira F. Jorge. Vargas R. Luis. 2011. Dispersi6n relativa de metales pesados en la cuenca alta del r6o Torres-Vizcarra, departamentos de Ancash y Hu6nuco. *Rev. Instituto de investigaciones (RIIGEO)*. 4 (27). 13-21.
- CNA. 2005. Indicadores de calidad del agua.
- Consejo de Europa, 1968. Carta del agua.
- Costa, M., y C. Klein, 1999, Nickel Carcinogenesis, Mutation, Epigenetics, or Selection. *Environmental Health Perspectives*. 107 (09).
- Cuellar Lilian, Molina Enrique, Del Puerto Asela, Maldonado Geomina. 2012. Distribuci6n espacial de los fluoruros en fuentes de abasto de aguas subterr6neas en cuatro provincias de Cuba. *Higiene y epidemiolog6a*. 50 (3): 365-379.
- Da Silva. I.S., Abate G., Lichtig, J. y Msdini J.C. 2002. Heavy Metals Distribution in Recent sediments of the Tiete-Pinheiros River System in Sao Paulo State, Brazil. *Applied Geochemistry*, 17: 105-116.
- David R. Maidment et al. 1994. *Hidrolog6a Aplicada. Aguas superficiales*. 146.
- Deutsch W.J. 1997. *Groundwater Geochemistry. Fundamentals and Applications to* Editorial McGraw Hill Interamericano, Mexico.
- Di Toro, D. M., Mahony, J.U.D., Hansen, D.J., Scott, K.J., Hicks, M.B., Mayr, S.M. & Redmond, M.S. 1990. Toxicity of cadmium in sediments: The role of acid volatile sulfide, *Environ. Toxicol. Chem.*, 9, 1487.
- DOF. 1980a. *Diario Oficial de la Federaci6n. Norma Mexicana NMX-AA-014-1980. Lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, excluyendo aguas estuarinas y aguas marinas, con el fin de determinar sus caracter6sticas f6sicas, qu6micas y t6xicas .M6xico*
- DOF. 1980b. *Diario Oficial de la Federaci6n. Norma Mexicana NMX-AA-017-1980. Aguas. Determinaci6n de color. M6xico.*
- DOF. 1981. *Diario Oficial de la Federaci6n. Norma Mexicana NMX-AA-074-1981. An6lisis de agua –Determinaci6n del ion sulfato. M6xico.*
- DOF. 1994. *Diario Oficial de la Federaci6n. Norma Mexicana NMX-AA-112-SSA1-1994. Determinaci6n de bacterias coliformes. T6cnica del n6mero m6s probable. M6xico.*
- DOF. 1995. *Diario Oficial de la Federaci6n. Norma Mexicana NMX-AA-112-1995-SCFI. An6lisis de agua y sedimentos. Evaluaci6n de toxicidad aguda con photobacterium, phosphoreum. M6todo de prueba. M6xico.*

- DOF. 1997. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminación para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. México.
- DOF. 1998. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales. México.
- DOF. 2000a. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. México.
- DOF. 2000b. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. México.
- DOF. 2001a. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NOM-127-SSAI-2001. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México.
- DOF. 2001b. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-038-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México
- DOF. 2001c. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-030-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la demanda de química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba. México.
- DOF. 2001d. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-028-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - Método de prueba- México.
- DOF. 2001e. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-029-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- DOF. 2001f. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-036-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- DOF. 2001g. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-072-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- DOF. 2001h. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-034-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- DOF. 2001i. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.
- DOF. 2001j. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas –Método de prueba. México.

- DOF. 2001k. Diario Oficial de la Federación. Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas –Método de prueba.
- EPA. 2001. Technical Manual: “Methods for collection, Storage Manipulation of Sediments for and Toxicological Analyses” Environmental Protection Agency U.S.A.
- Escobar Jairo. 2002. Recursos naturales e infraestructura. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. 5.
- Eugene Odum. 2006. Fundamentos de Ecología. Ecología Regional. 425 -428.
- Ferreira Rosalva. 1995. Estudio de la calidad del agua en base a bacterias coliformes en la presa la Mintzita y el Río Grande de Morelia, Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Franquet Bernis José María. 2001. Con el agua al cuello: 55 respuestas al Plan Hidrológico Nacional. 3 y 4.
- Fuentes V. María, Rojas de Gascue Blanca, Rojas de Astudillo Luisa. 2011. Distribución, comportamiento y toxicidad de metales y azufre en el agua de poro de los sedimentos superficiales del saco del Golfo de Cariaco, Estado Sucre, Venezuela. Rev. Int. Contam. Ambient. 27.1.
- García Roberto. 2011. “Simulación numérica del transporte de contaminantes, en el Río Grande de Morelia” Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional,
- Girbau García. Enfermería Comunitaria I. Salud Pública. Masón 2002
- Goldara Carolina. 2007. “Metales pesados en organismos acuáticos en dos lagunas costeras del sur de Tamaulipas y Norte de Veracruz”. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Gómez Juan. 2003, Evaluación de la calidad del agua con base en los parámetros fisicoquímicos primaria y análisis bacteriológico de la presa la Mintzita de Morelia, Mich, Mex. Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Gómez-Álvarez Agustín, Villalba-Atondo Arturo, et al.2004. Metales pesados en el agua superficial del Río San Pedro durante 1997 y 1999. Rev. Int. Contam. Ambien. 20 (1) 5-12.
- Gorski, P.R., Armstrong, D.E., Hurley, J.P. & Krabbenhoft, D.P. 2008. Influence of natural dissolved organic carbon on the bioavailability of mercury to a freshwater alga. Environ. Pollut., 154: 116-123.
- Herrera Miguel. 2007. Evaluación de metales pesados y arsénico en agua y sedimentos del Lago de Cuitzeo. Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Horowitz, A.J. 1986. A primer on trace metal-sediment chemistry.U.S. Geological Survey.Water-Supply paper. 2277.
- INEGI.2009.URL<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datosgeograficos/16/16053.pdf>.
- INEGI.2011.http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/mich/sombreado_ri.cfm?c=444&e=29.
- Jain C. K., Malik. D. S,Yadav. R. 2007. Sediments of Lake Natinal, uttaranchar, India.Environmental Monitorring and Assessment, 130: 129-139.

- Jiménez Blanca 2001. La Contaminación Ambiental en México. Causas, efectos y tecnología, Instituto de Ingeniería UNAM Capítulo 1.
- Kalma Bobiie. 2009. Los Ríos de la Tierra. Crabtree Publishing. 4-10
- Kwon Y-T., Lee C-W 2001. Sediment metal speciation for the ecological risk assessment. *Analytical Sciences*, 17: 1015-1017.
- Lau S.S.S., Chu L.M., 2001. The significance of sediment contamination in a coastal wetland, Hong Kong, China. *Water Research*, 34(2): 379 – 386.
- Lee, B. 2000. Influences of dietary uptake and reactive sulfides on metal bioavailability from aquatic sediments. *Science*, 287(5451): 282-284.
- Lima M.C., Giacomeli O.M.B., Stüpp V., Roberge D.F. y Bermejo B.P. 2001. Especificação de cobre e chumbo em sedimento do rio tubarão (sc) pelo método Tessier. *Química Nova*, 4 (6): 734-742.
- Mackay, D. 2001. *Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach*, 2nd ed., CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL, p. 272.
- Manahan. E. Stanley. 2007. *Introducción a la Química Ambiental*. Editorial Reverté. 221.
- Mancilla-Villa Oscar Raúl, Ortega-Escobar Héctor Manues, et al. 2012. Metales pesados totales y arsénico en el agua de riego de Puebla y Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambien.* 28 (1) 39-48.
- Marrero Levi. 1996. *La Tierra y sus Recursos. Los ríos y Los lagos. Cap 23.*
- Martínez Oswaldo. 2003. Determinación de la calidad fisicoquímica del agua del canal de Chiquimulilla en la Reserva Natural de Usos Múltiples, Monterrico. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Mena, M.E., 2004. Diagnóstico de las aguas residuales y prediseño de una planta de tratamiento biológico para la parroquia Gonzales Suárez. Universidad técnica del Norte. 9-13.
- Molina L. Idolina. 2011. Evaluación de la calidad del agua de la red hidráulica superficial de la parte sur-sureste del municipio de Morelia, Michoacán: hacia un modelo de gestión. Tesis de Maestría. UMSNH, México.
- Montoya Carolina, et al. 2011. Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *EIA*, ISSN 1794-1237. 16, 137 -148.
- Mudroch A., Azcue J.M., Mudroch P. 1995. *Manual of Aquatic Sediment Sampling*. Lewis Publishers, Estados Unidos.
- Odum, E.P, 1972. *Ecología*. Nueva Editorial Interamericana, México. 221.
- OMS, 1995. Organización Mundial de la Salud.
- Páez A. 2008. Evaluación de la concentración de arsénico y calidad del agua subterránea en función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Peluso, L. 2011. Evaluación de efectos biológicos y disponibilidad de contaminantes en sedimentos del Río de la Plata y afluentes, Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Argentina.

- Pérez G. G. 2005. Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados aplicados y limitados de la fracción en la determinación de gradientes de polución. Memoria para aspirar al grado de Doctor en Química, Universidad Autónoma de Barcelona.
- PNUMA, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011. Water in the Transition to a Green Economy: A UNEP Brief.
- PNUMA, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, International Resource Panel. 2011. Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth.
- PNUMA, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Principales reservas hídricas en el mundo.
- Price E.R., Pichler T. 2005. Distribution, speciation and bioavailability of arsenic in a shallow-water submarine hydrothermal system, Tutum Bay. *Chemical Geology*, 224; 122-135.
- Rauret G, et al. 1999. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *JEM. Envirom. Monit.*, 1, 57-61.
- Rigola. L.M. 1990. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Editorial Alfaomega. 33 y 34.
- Rodríguez Amador. Monks S. Pulido Flores G. Gaytán Oyarzun J.C. 2012. Metales pesados en el pez dormitator latifrons (Richardson, 1884) y agua de la laguna de Tres palos, Guerrero, México. *Rev. Ra Ximhai*. 8 (2). 43-47.
- Ronquillo Miguel A., Bonilla Noemí, et al. 2011. Especiación de metales pesados en sedimentos de la presa Manuel Ávila Camacho. Tesis Doctoral. Facultad de Ing. Ambiental. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ross A. Sutherland, Filip M. G. Tack. 2002. Determination of Al, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in certified reference material using the optimized BCR sequential extraction procedure. *Analytical Chemical Acta*. 454, 249-257.
- Sarabia Meléndez et al, 2011. *Int. Contam. Ambie.* 27 (2), 103-113.
- Seoanez Mariano. 2001. Ingeniería del Medio Ambiente Aplicada al Medio Natural Continental de Suelos, Vegetación y Faunas.
- Sierra A.I., Morante Z.S., Pérez Q. D. 2007. Experimentación en Química Analítica, Editorial DYKINSON. 91.
- Solorzano Eduardo. 1998. Evaluación de la calidad del agua en el estado de Michoacán periodo 1986-1995, Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Sotero-Solís Victor. Alva-Astudillo Mario. 2013. Contenido de metales pesados en agua y sedimento en el bajo Nanay. *Rev. Ciencia amazónica (Iquitos. En línea)*. 3 (1). 24-32.
- Strahler Alan y Arthur. 2002. *Science and Systems of the Human Environment. The Cycling of Water on the Continents*. 445 y 446, 456 y 457.
- Tacj F.M., Verlo M.G. 1995. Chemical speciation and fractionation in soil and sediment heavy metal analysis a review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 59: 225-238.
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. 1979. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, 51 (7): 844 – 851.

- Torres J., Pintas V., Domínguez S., Kreme C., Kremer E. 2010. Selenite and selenite speciation in natural waters. Interaction with bivalent metal ions. *Journal of solution chemistry*, 39 (1): 1-10.
- Triverdi, P. & Axe, L. 2000. Modeling Cd and Zn sorption to hydrous metal oxides. *Environ. Sci. Technol.*, 34: 2215-2223.
- Valencia F. M., Rojas de Astudillo L., Díaz A. 210 Distribución de metales pesados en los sedimentos superficiales del saco de Golfo de Ciriaco. *Biol. Trop.* (58). 3.
- Vázquez-Sauceda María de la Luz, et al. 2006. Contenido de metales pesados en agua, sedimentos y ostiones de la Laguna de San Andrés, en Tamaulipas, México. Tesis de Calidad del Premio Universitario.
- Verrengia Guerrero, N.R. & Kesten, E.M. 1994. Levels of heavy metals in waters from the La Plata River, Argentina: An approach to assess bioavailability. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 52: 254-260.
- Verrengia Guerrero, N.R., Taylor, M.G., Wider, E.A. & Simkiss, K. 2003. Influence of particle characteristics and organic matter content on the bioavailability and bioaccumulation of pyrene by clams. *Environ. Pollut.*, 121(1): 115-122.
- Villalobos Benjamín. 2007. Contenido de metales pesados en agua y sedimentos en la desembocadura del Río Grande de Morelia en el Lago de Cuitzeo, Michoacán, Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Villalobos, C.B., et al. 2010. Distribution and partitioning of iron, zinc, and arsenic in surface sediments in the Grande River mouth to Cuitzeo Lake, Mexico. *Environ. Monit. Assess.*
- Walpole. R. E., Myers R. H. (1992). *Probabilidad y estadística*. Editorial McGraw Hill, México.

ANEXOS

ANEXO A.- Cuadros de valores de los parámetros obtenidos en agua y sedimentos del río Grande de Morelia.

Cuadro 11.- Concentraciones de los parámetros *in situ* en el agua del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	T agua	pH	C.E	O.D	SDT	Salinidad
		°C					
				$\mu\text{S cm}^{-1}$	mg L^{-1}	mg L^{-1}	
S1	ene-12	18.4	8.11	176	4.3	105	0.1
	may-12	20	7.66	169.5	4	89.5	0.1
	nov-12	19.7	6.97	196.8	4.35	105.7	0.1
	feb-13	18.3	7.94	180	3.3	94.9	0.1
S2	ene-12	19.8	8	542	3.5	295	0.3
	may-12	18.7	7.59	342	4.5	185	0.2
	nov-12	23.3	7.41	115.2	1.8	613	0.6
	feb-13	18.5	7.8	754	2.81	399	0.4
S3	ene-12	18.7	7.56	594	0.6	316	0.3
	may-12	19.9	7.23	513	0.9	272	0.2
	nov-12	20	7.3	595	0.81	317	0.3
	feb-13	19.9	7.43	660	0.76	351	0.3
S4	ene-12	18.4	7.43	550	0.72	292	0.3
	may-12	20	7.8	599	0.62	322	0.3
	nov-12	18.4	7.28	401	3.4	212	0.2
	feb-13	19.4	7.6	522	0.52	277	0.3
S5	ene-12	19.4	7.37	588	0.3	314	0.3
	may-12	21.4	7.12	527	0.51	280	0.3
	nov-12	31.9	7.28	225	1.33	300	0.3
	feb-13	19.9	7.36	656	0.83	349	0.3
S6	ene-12	19.5	7.1	590	0.2	315	0.3
	may-12	22.2	7.13	545	0.64	290	0.3
	nov-12	21.6	7.26	570	1.37	304	0.3
	feb-13	19.8	7.38	685	0.51	363	0.3

S7	ene-12	21.1	7.2	652	0.4	349	0.3
	may-12	24.7	7.07	554	0.64	285	0.3
	nov-12	20.7	7.65	714	1.01	380	0.4
	feb-13	21.4	7.3	737	0.52	391	0.4
S8	ene-12	20	7.08	678	0.5	360	0.3
	may-12	23.7	7.23	630	0.63	334	0.3
	nov-12	22.4	7.32	557	1.26	297	0.3
	feb-13	21.5	7.47	729	0.47	387	0.4
S9	ene-12	17.1	7.46	414	3.9	222	0.2
	may-12	20.5	7.42	464	3.05	246	0.2
	nov-12	17.8	7.2	229	5.2	122.1	0.1
	feb-13	15.7	7.51	395	3.84	210	0.2
S10	ene-12	19.9	7.78	858	0.2	458	0.4
	may-12	24	8.22	1518	4.27	806	0.8
	nov-12	18.4	7.29	228	3.16	123.4	0.1
	feb-13	19.2	7.6	979	1.41	520	0.5
S11	ene-12	22	8.2	703	6	372	0.3
	may-12	39.7	8.31	629	7.1	334	0.3
	nov-12	20.1	7.23	359	2.32	191.5	0.2
	feb-13	22.4	8.11	857	4.62	455	0.4
S12	ene-12	20.2	8.27	1071	7.6	575	0.5
	may-12	30.1	8.39	901	7.18	476	0.4
	nov-12	18.8	7.34	350	2.83	185.7	0.2
	feb-13	23	8.2	1270	3.95	677	0.6
NOM- 001-SEMARNAT		40	6.5 - 8.5	-	-	-	-
NOM- 127-SSA1-1994		NA	-	-	-	1000	-
OMS		-	6.5-8	1500	5	1000	-

Temperatura (T, °C), Conductividad eléctrica (C.E, $\mu\text{S cm}^{-1}$), Oxígeno disuelto (O.D, mg L^{-1}), Sólidos disueltos totales (SDT, mg L^{-1}).

Cuadro 12.- Concentraciones de los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en el agua del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	DQO	DBO ₅	Dza Tot	Alc. Total	Sol. Sed.	Sól. Tot.	Sól. Susp. Tot.	Turb.	Color	Col. Fe.
		mg L^{-1}	UTN	Pt/Co	NMP/100 ml						

S1	ene-12	4	2.4	75.554	97	0	184	2	3.5	10	20
	may-12	5	3	65.344	86	0	148	14	4.1	10	20
	nov-12	<5.0	1.33	100.34	90	0	182	12	6	20	2000
	feb-13	5.2	3	70.7	82	0	164	28	3.8	10	40
S2	ene-12	80	48	155.192	164	0.5	540	4	175	300	300
	may-12	70	41.33	93.932	104	0.6	336	60	92.5	300	700
	nov-12	60	36	299.8	272	2.1	782	50	200	500	250000
	feb-13	100	65	277.7	168	0.7	930	360	104	800	400
S3	ene-12	60	40.67	147.024	220	0.6	522	40	146	250	1810000
	may-12	60	40	130.688	176	0.8	404	58	52	250	1600000
	nov-12	96	64	168.64	173	0.1	442	60	23.8	120	1210000
	feb-13	124.8	80	141.4	210	0.5	680	190	45	100	1200000
S4	ene-12	80	60	171.528	270	3.2	474	18	34	100	910000
	may-12	80	68	130.688	270	3.5	424	14	29	80	1000000
	nov-12	96	52	120.75	151	0.1	234	14	68	120	1500000
	feb-13	100	60	133.3	182	0.6	1030	630	14.1	60	2100000
S5	ene-12	80	64	171.528	228	0.6	534	18	151.5	250	2190000
	may-12	70	41.33	122.52	186	0.7	418	46	48.5	250	2030000
	nov-12	96	52	170.72	140	0.3	348	48	26.8	140	2000000
	feb-13	83.2	54	137.3	208	0.5	612	124	41	200	1800000
S6	ene-12	60	48	163.36	238	1.1	620	82	147	200	3100000
	may-12	60	48	122.52	204	1.3	440	74	51	200	3060000
	nov-12	86	44	183.21	178	0.2	498	68	33	120	100000
	feb-13	100	62	125.2	220	0.3	570	94	7	100	2000000
S7	ene-12	80	56	175.612	276	1.8	674	32	150	200	2420000
	may-12	80	62.67	134.772	214	2	488	102	69.5	250	2010000
	nov-12	80	44	194.82	209	0.3	486	32	24.8	120	2000000
	feb-13	62.4	40	237.3	250	0.3	788	216	22	200	2000000
S8	ene-12	70	52	142.94	292	0	562	66	150	200	2020000
	may-12	60	40	155.192	220	0.2	478	76	53	250	2000000
	nov-12	58	32	162.39	183	1.1	458	17	16.1	100	1000000
	feb-13	130	85	217.1	258	0.3	626	168	40	100	1200000
S9	ene-12	25	15.33	208.284	222	1.8	420	12	28	50	18000
	may-12	15	11.33	159.276	214	1.8	400	66	8.6	40	6000
	nov-12	10	5.33	92.83	100	0	202	30	15.8	60	500
	feb-13	10.4	7	149.4	185	0.2	308	20	9.4	40	200
S10	ene-12	50	28.5	367.56	415	0.2	814	60	77	100	41000
	may-12	40	28	479.87	500	0.2	998	80	15.5	80	30000
	nov-12	48	28	90.75	94	0	140	18	14.2	50	10000
	feb-13	120	75	382.8	404	0.5	640	50	5	60	35000
S11	ene-12	15	8.67	220.536	324	0.2	586	4	55.5	100	14900
	may-12	16	9.2	147.024	244	0.2	598	14	20.6	80	3000
	nov-12	15	10	133.248	166	1.7	342	53	50	100	13000
	feb-13	41.6	28	257.5	309	0.3	614	22	7.2	80	30000
S12	ene-12	20	12.5	367.56	450	1.3	960	18	34.5	100	50000
	may-12	15	10	187.864	280	1.5	716	14	21.6	80	4000
	nov-12	15	10	121.57	144	1.9	304	26	30	50	8000
	feb-13	62.4	43.8	462.6	410	0.6	814	28	14.2	100	3000
NOM-001-SEMARNAT		-	150			1		150			2000
NOM-127-SSA1-OMS		-		500					5	20	Ausente
CONAGUA		40		200					5	15	

Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda biológica de oxígeno (DBO₅), Dureza total (Dza. Tot), calcio (Ca), Alkalinidad total (Alc. Tot), carbonatos (CO₃), bicarbonatos (HCO₃), sólidos totales (Sól. Tot.), Sólidos suspendidos totales (Sól. Susp. Tot.), turbiedad (turb.) y coliformes fecales (col. Fec.).

Cuadro 13.- Concentraciones de los componentes mayoritarios en el agua del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	N-NH ₃	B.I
		mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	mg L ⁻¹				

S1	ene-12	12.285	10.904	15.862	12.38	0	97	10.374	0	0.41
	may-12	18.818	4.461	15.035	10.38	0	86	9.261	0	1.06
	nov-12	20.160	12.156	0.782	11.33	0	90	9.6	0	0.51
	feb-13	18.597	5.899	7.970	7.22	0	82	7.74	0	0.82
S2	ene-12	39.278	13.882	78.576	79.81	0	164	70.694	0.336	0.49
	may-12	22.104	9.421	54.300	51.9	0	104	45.478	0.63	1.14
	nov-12	65.090	33.356	65.703	120.64	0	272	36.19	1	0.91
	feb-13	55.030	34.084	45.288	108.25	0	168	62.23	0.56	2.53
S3	ene-12	27.836	18.842	98.439	70.8	0	220	67.551	7.616	1.06
	may-12	22.926	17.845	72.599	56.86	0	176	53.478	4.158	1.05
	nov-12	35.050	19.717	48.737	50.92	0	173	51.02	0.42	1.00
	feb-13	40.481	10.551	83.521	66.5	0	210	50.72	8.176	0.69
S4	ene-12	26.192	25.783	74.300	36.1	0	270	48.673	11.872	0.97
	may-12	19.639	19.826	95.381	37.96	0	270	51.304	12.598	0.90
	nov-12	27.535	20.215	35.311	19.33	0	151	40.18	3.92	7.96
	feb-13	24.288	17.649	58.762	39.92	0	182	45.48	9.424	1.10
S5	ene-12	31.102	22.805	85.795	67	0	228	63.673	6.944	1.02
	may-12	22.926	15.864	77.956	56.75	0	186	52.174	4.536	0.46
	nov-12	35.050	20.215	20.414	39.6	0	140	40.18	0.253	0.15
	feb-13	38.838	10.551	85.636	68.4	0	208	48.97	8.288	0.89
S6	ene-12	29.459	21.808	89.312	66.5	0	238	60.408	8.176	0.34
	may-12	26.192	13.882	84.393	56.92	0	204	51.826	9.072	0.29
	nov-12	35.872	22.744	35.380	48.54	0	178	40.01	0.253	0.30
	feb-13	40.481	5.875	95.556	65.55	0	220	50.72	10.08	0.67
S7	ene-12	27.836	25.783	100.945	63.2	0	276	64.898	16.912	1.07
	may-12	24.549	17.845	80.163	54.57	0	214	50.696	12.222	0.15
	nov-12	37.775	24.421	51.174	51.09	0	209	52.07	6.16	0.92
	feb-13	42.084	32.117	58.341	71.25	0	250	50.37	12.048	0.38
S8	ene-12	28.637	17.347	121.681	62.25	0	292	66.939	9.52	0.82
	may-12	26.192	21.808	86.646	63.79	0	220	62.157	7.266	0.81
	nov-12	31.703	10.503	46.323	42.71	0	183	43.01	0.155	-7.17
	feb-13	40.481	28.185	64.629	59.85	0	258	48.97	15.12	1.00
S9	ene-12	39.278	26.768	23.380	29.5	0	222	24.811	0	1.27
	may-12	29.459	20.823	47.978	29.39	16	198	25.242	0	3.47
	nov-12	19.860	11.013	11.150	13.84	0	100	11.36	0.45	1.89
	feb-13	42.886	10.292	21.453	16.92	0	185	14.37	0.336	0.77
S10	ene-12	57.294	54.532	65.634	52.3	0	415	77.857	8.736	0.93
	may-12	73.667	71.878	145.313	86.76	24	476	116.957	5.04	9.28
	nov-12	18.176	15.669	10.023	13.31	0	94	12.91	0.11	8.70
	feb-13	93.507	36.293	42.491	51.3	0	404	56.3	6.24	0.78
S11	ene-12	34.369	32.724	91.795	59.85	20	304	41.224	5.936	2.81
	may-12	29.459	17.845	94.071	52.83	36	208	38.261	3.192	5.13
	nov-12	27.535	14.247	31.886	23.8	0	166	30	0.362	-1.62
	feb-13	40.481	37.994	75.507	74.1	0	309	50.02	5.12	0.89
S12	ene-12	61.383	52.052	118.508	70.3	36	414	98.163	5.04	4.09
	may-12	36.012	23.789	137.842	72.62	60	220	87.826	0.966	6.69
	nov-12	25.190	12.642	27.587	18.85	0	144	32.93	0.586	-1.69
	feb-13	116.893	41.440	72.942	95	0	410	129.35	8.16	0.85

**NOM-001-
SERMANAT**

NOM-127-SSA1

250

400

0.5

OMS

CONAGUA

250

calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na), cloruros (Cl⁻), carbonatos (CO₃), bicarbonatos (HCO₃⁻), Sulfatos (SO₄²⁻) y nitrógeno amoniacal (N-NH₃), Balance iónico (B.I).

ANEXO B.- Valores obtenidos de metales pesados y As en agua y sedimentos

Cuadro 14.- Concentraciones de metales pesados y As en agua del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Fe	Zn	Ni	Cu	Pb	Cd	Cr	Ag	As
		Mg L ⁻¹								
S1	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.317	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00091
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	0.102	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S2	ene-12	4.9	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	5.88	<LD	<LD	0.306	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00182
	nov-12	5.082	0.145	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	3.228	0.102	<LD	<LD	<LD	0.264	<LD	<LD	<LD
S3	ene-12	2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	2.784	<LD	<LD	0.297	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00090
	nov-12	2.259	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	2.54	0.132	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S4	ene-12	20	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.0036
	may-12	0.913	<LD	<LD	0.308	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	2.229	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	3.46	0.13	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.01048
S5	ene-12	1.5	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	3.04	<LD	<LD	0.346	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00900
	nov-12	1.79	0.108	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	3.11	0.171	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S6	ene-12	1.9	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	2.507	<LD	<LD	0.348	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00150
	nov-12	1.118	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	6.456	0.27	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S7	ene-12	2.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.001
	may-12	2.93	<LD	<LD	0.28	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00090
	nov-12	2.685	0.155	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	3.593	0.332	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S8	ene-12	11.5	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.002
	may-12	3.13	<LD	<LD	0.31	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00150
	nov-12	0.601	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	0.134	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S9	ene-12	5.442	<LD	<LD	0.356	<LD	<LD	<LD	<LD	0.0021
	may-12	0.7	<LD	<LD	0.274	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00320
	nov-12	0.395	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	0.572	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S10	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	0.716	<LD	<LD	0.288	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00440
	nov-12	8.609	0.208	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	2.748	0.108	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S11	ene-12	4.9	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.0023
	may-12	1.34	<LD	<LD	0.286	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00160
	nov-12	11.5	0.204	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	2.187	0.121	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
S12	ene-12	13.6	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.0044
	may-12	2.01	<LD	<LD	0.314	<LD	<LD	<LD	<LD	0.00210
	nov-12	0.975	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	11.664	0.125	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Nom-001-SEMARNAT			10	2	4	0.5-0.2	0.2	1-0.5		0.2-0.1
Nom-127-SSA1		0.3	5		2	0.01	0.005	0.05		0.025
OMS		0.3	3	0.02	2	0.01	0.003	0.05		0.01

Hierro (Fe), Zinc (Zn), Níquel (ni), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plata (Ag) y Arsénico (As).

Cuadro 15.- Concentraciones de metales pesados y As en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Fe	Zn	Ni	Cu	Pb	Cd	Cr	Ag	As
						mg kg ⁻¹				
S1	ene-12	31620	42	39	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.5892
	may-12	17250	76	65.8	<LD	<LD	<LD	80.3	<LD	0.7456
	nov-12	70643	64,1	39.5	19	<LD	<LD	<LD	<LD	0.7
	feb-13	361630	69.6	41.4	22.7	<LD	<LD	<LD	<LD	0.8900
S2	ene-12	35360	152	47	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.7452
	may-12	16750	72.5	43.4	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.1405
	nov-12	74353	183	33.8	35.4	<LD	<LD	<LD	<LD	0.9
	feb-13	258430	89	28	22.2	<LD	15.8	<LD	<LD	0.7300
S3	ene-12	35090	94	41	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.8881
	may-12	23450	299.5	90.6	168.7	62.4	<LD	74.3	<LD	3.0108
	nov-12	32292	366	49.6	48.1	24.6	<LD	<LD	<LD	0.9
	feb-13	348870	271	42.5	45.8	<LD	<LD	<LD	<LD	0.8700
S4	ene-12	34080	142	44	69	<LD	<LD	<LD	<LD	1.8667
	may-12	26008	140.5	82.7	50.3	54.8	<LD	76.1	<LD	2.8256
	nov-12	41316	287	52.9	75.5	12.4	<LD	<LD	<LD	1.0
	feb-13	306610	363	46.8	59.9	24.9	<LD	<LD	<LD	0.8875
S5	ene-12	27320	95	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.6533
	may-12	24010	260	91.3	121.4	58.7	<LD	68	<LD	2.8071
	nov-12	38232	197	51.8	47.3	5.9	<LD	<LD	<LD	0.7
	feb-13	350970	425	55.5	56.8	20.6	10	<LD	<LD	1.1050
S6	ene-12	26100	89	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.5999
	may-12	19330	281	89.7	91.4	63.6	<LD	64.8	<LD	2.9553
	nov-12	37043	227	49.9	35.6	23.1	<LD	<LD	<LD	0.9
	feb-13	337440	216	41.7	28.8	<LD	<LD	<LD	<LD	0.8250
S7	ene-12	301410	140	37	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.0055
	may-12	20340	238.5	69.2	<LD	<LD	19.4	55.9	<LD	3.4922
	nov-12	28041	333	46.2	40.7	22.3	19.4	<LD	<LD	0.8
	feb-13	276930	184	33.2	23.3	<LD	<LD	<LD	<LD	0.7800
S8	ene-12	31020	195	43	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.0621
	may-12	21130	364.5	90.4	83.4	66.1	<LD	58.7	<LD	5.9056
	nov-12	33889	371	44.5	22.2	2.5	<LD	<LD	<LD	1.1
	feb-13	221380	55.8	24.9	<LD	23.5	<LD	<LD	<LD	1.1825
S9	ene-12	38730	55	31	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	3.1074
	may-12	17760	89.5	60	<LD	<LD	<LD	65.1	<LD	4.9056
	nov-12	44336	143	44.7	23.4	3.3	<LD	<LD	<LD	0.8
	feb-13	268860	57.9	24.2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.9750
S10	ene-12	28360	77	30	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.5359
	may-12	19020	66.3	44.5	<LD	<LD	<LD	54.7	<LD	4.5477
	nov-12	35073	86.6	40.3	16.1	<LD	<LD	<LD	<LD	1.0
	feb-13	277380	79.6	29.9	<LD	<LD	7.2	<LD	<LD	0.9525
S11	ene-12	25640	69	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.1196
	may-12	15740	68.9	44.2	<LD	<LD	<LD	50.2	<LD	2.9367
	nov-12	38438	293	42.1	28.4	9.9	<LD	<LD	<LD	0.7
	feb-13	266080	160	32.9	24.6	<LD	<LD	<LD	<LD	0.9825
S12	ene-12	36430	53	36	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.8881
	may-12	18190	86	60.5	0.314	<LD	<LD	62.6	<LD	1.4369
	nov-12	36675	188	63.4	38.8	23.9	<LD	<LD	<LD	1.1
	feb-13	292190	229	40.1	45.5	<LD	<LD	1006.3	<LD	1.0475
Norma canadiense			123	18	35.7	35	3.5	37.3		5.9

Hierro (Fe), Zinc (Zn), Níquel (ni), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plata (Ag) y Arsénico (As).

Cuadro 16.- Fracciones geoquímicas del hierro en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Fe			
		Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
				mg kg ⁻¹	
S1	ene-12	78	5073	1276	5585
	may-12	3	3561	78	8968
	nov-12	6	4836	833	10486
	feb-13	138	4048	437	13330
S2	ene-12	82	4134	1949	8153
	may-12	28	3483	112	11595
	nov-12	53	4370	839	7764
	feb-13	10.2	9593	707	11601
S3	ene-12	9	3459	141	13390
	may-12	24	4337	114	12611
	nov-12	18	5264	421	10016
	feb-13	187	4777	297	11508
S4	ene-12	58	4351	117	10947
	may-12	55	2505	1042	15648
	nov-12	26	4730	258	6207
	feb-13	91	4664	339	14061
S5	ene-12	11	3756	936	13736
	may-12	3	4651	122	12989
	nov-12	<LD	4349	253	7042
	feb-13	169	4801	373	13001
S6	ene-12	24	4561	994	11451
	may-12	57	4407	90	12681
	nov-12	1	4032	232	7096
	feb-13	288	5755	269	13218
S7	ene-12	52	3242	1863	11483
	may-12	53	4371	47	4385
	nov-12	51	4877	574	7039
	feb-13	244	5355	249	14155
S8	ene-12	10	5324	2323	11851
	may-12	75	5217	93	11269
	nov-12	0	2148	78	5945
	feb-13	7	5996	152	7302
S9	ene-12	105	2381	154	9023
	may-12	7	1519	133	6830
	nov-12	<LD	3899	179	7546
	feb-13	23	4953	249	13252
S10	ene-12	31	4439	73	13564
	may-12	6	3358	117	11789
	nov-12	2	1655	368	6179
	feb-13	41	1290	180	14275
S11	ene-12	27	3076	106	9618
	may-12	14	2254	133	8858
	nov-12	<LD	3632	500	7126
	feb-13	<LD	2399	387	15637
S12	ene-12	137	3697	79	9781
	may-12	50	3170	1105	10085
	nov-12	<LD	5175	127	7491
	feb-13	220	3645	198	11072

Cuadro 17.- Fracciones geoquímicas del zinc en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Zn			
		Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
		mg kg ⁻¹			
S1	ene-12	5	6	12	18.79
	may-12	3	6	5	22.56
	nov-12	62	10	4	20.38
	feb-13	4	9	3	23.14
S2	ene-12	28	28	8	15.67
	may-12	12	11	9	26
	nov-12	48	39	9	23.18
	feb-13	32	36	50	18.04
S3	ene-12	24	29	11	28.21
	may-12	55	68	17	31.59
	nov-12	82	62	10	24.88
	feb-13	72	79	13	27.51
S4	ene-12	55	21	13	23.53
	may-12	9	29	11	40.11
	nov-12	13	61	11	25.57
	feb-13	56	170	13	33.32
S5	ene-12	3	11	9	32.7
	may-12	77	78	14	35.3
	nov-12	68	71	10	35.25
	feb-13	95	138	16	34.65
S6	ene-12	56	34	14	29.12
	may-12	51	72	13	38.55
	nov-12	27	92	7	28.78
	feb-13	72	93	12	30.11
S7	ene-12	53	36	14	37.83
	may-12	66	60	12	20.48
	nov-12	24	76	8	29.35
	feb-13	81	63	7	31.29
S8	ene-12	75	47	18	46.41
	may-12	25	118	15	38.09
	nov-12	58	91	10	28.18
	feb-13	25	55	8	26.44
S9	ene-12	7	11	6	49.92
	may-12	<LD	8	4	28.28
	nov-12	3	14	3	28.2
	feb-13	3	11	3	29.67
S10	ene-12	6	8	5	29.12
	may-12	12	15	5	52.49
	nov-12	12	22	20	26.96
	feb-13	6	19	2	17.71
S11	ene-12	14	26	6	30.88
	may-12	2	11	4	23.66
	nov-12	3	16	4	20.01
	feb-13	6	20	4	36.67
S12	ene-12	50	30	10	34.52
	may-12	7	30	11	24.05
	nov-12	19	190	13	27.22
	feb-13	45	52	6	22.35

Cuadro 18.- Fracciones geoquímicas de níquel en lo sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Ni			
		Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
		mg kg ⁻¹			
S1	ene-12	2.84	2.04	<LD	6.83
	may-12	<LD	1.2	<LD	9.46
	nov-12	1.56	2.44	<LD	10.73
	feb-13	1.28	2.4	5	14.79
S2	ene-12	2.52	1.32	<LD	4.91
	may-12	<LD	<LD	<LD	8.4
	nov-12	13.28	8.64	<LD	8.37
	feb-13	<LD	2	<LD	8.13
S3	ene-12	4.36	<LD	<LD	12.51
	may-12	0.2	<LD	<LD	13.17
	nov-12	<LD	2.04	<LD	10.97
	feb-13	<LD	2.32	1	9.44
S4	ene-12	<LD	<LD	<LD	9.31
	may-12	<LD	<LD	<LD	17.81
	nov-12	<LD	1.08	<LD	11.93
	feb-13	1.28	3	<LD	14.78
S5	ene-12	1.92	<LD	<LD	9.97
	may-12	2.64	1.72	<LD	12.44
	nov-12	4	10	<LD	11.26
	feb-13	3.4	5.28	1.4	14.33
S6	ene-12	4.4	3.36	<LD	11.06
	may-12	1.88	2.76	<LD	12.21
	nov-12	6.28	10.2	0.25	10.78
	feb-13	3.72	3.12	1.4	13.25
S7	ene-12	4.64	3.64	<LD	10.65
	may-12	<LD	5.12	<LD	2.42
	nov-12	1.28	4	<LD	9.89
	feb-13	1.56	4.16	<LD	13.59
S8	ene-12	5.64	4.2	<LD	12.99
	may-12	0.76	0.92	<LD	10.31
	nov-12	10	7.92	<LD	6.55
	feb-13	2.44	1.12	1.4	7.79
S9	ene-12	1.2	1.08	<LD	10.52
	may-12	<LD	<LD	<LD	5.24
	nov-12	<LD	4.92	0.6	8.4
	feb-13	0.92	2.08	<LD	9.69
S10	ene-12	<LD	<LD	<LD	9.24
	may-12	<LD	<LD	<LD	6.92
	nov-12	<LD	1.08	<LD	7.27
	feb-13	0.8	14.2	<LD	8.11
S11	ene-12	0.84	<LD	<LD	8.35
	may-12	<LD	<LD	<LD	6.33
	nov-12	2.76	4.56	<LD	7.58
	feb-13	<LD	0.84	<LD	16.89
S12	ene-12	0.88	<LD	<LD	8.87
	may-12	<LD	<LD	<LD	6.75
	nov-12	<LD	4.04	<LD	11.7
	feb-13	2.16	0.8	<LD	8.22

Cuadro 19.- Fracciones geoquímicas de cobre en los sedimentos del río Grande de Morelia.

		Cu			
Sitio	Muestreo	Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
S1	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	12.44
	nov-12	<LD	1	<LD	14.61
	feb-13	<LD	2	<LD	16.07
S2	ene-12	<LD	<LD	<LD	13
	may-12	<LD	<LD	<LD	10.06
	nov-12	<LD	7	5	34.39
	feb-13	<LD	8	2	15.02
S3	ene-12	<LD	12	<LD	11.31
	may-12	<LD	22	10	17.04
	nov-12	<LD	14	4	18.15
	feb-13	1.36	16	6	8.03
S4	ene-12	4	24	20	27.43
	may-12	<LD	1	2	15.91
	nov-12	<LD	5	4	13.57
	feb-13	6.12	16	10	15.15
S5	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	17	5	16.65
	nov-12	<LD	16	7	25.81
	feb-13	1.28	17	8	17.16
S6	ene-12	<LD	12	5	14.86
	may-12	<LD	11	4	15.38
	nov-12	<LD	13	<LD	23.92
	feb-13	1.32	15	10	22.82
S7	ene-12	<LD	<LD	<LD	13.96
	may-12	<LD	<LD	<LD	4.88
	nov-12	<LD	18	2	16.11
	feb-13	1.2	6	<LD	16.09
S8	ene-12	<LD	11	2	14.46
	may-12	<LD	8	1	14.95
	nov-12	<LD	18	<LD	17.46
	feb-13	<LD	5	<LD	11.25
S9	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	12.66
	feb-13	<LD	1	<LD	13.77
S10	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	13.03
	feb-13	<LD	1	<LD	6.21
S11	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	3	<LD	8.83
	feb-13	<LD	1	<LD	44.01
S12	ene-12	<LD	<LD	<LD	11.48
	may-12	<LD	2	1	7.2
	nov-12	<LD	7	1	12.13
	feb-13	<LD	8	<LD	12.56

Cuadro 20.- Fracciones geoquímicas de plomo en los sedimentos del río Grande de Morelia.

		Pb			
Sitio	Muestreo	Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
S1	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	86	169	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S2	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	2	35	2.26
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	26	<LD	<LD	<LD
S3	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	22	<LD	5.49
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	30	<LD	<LD	<LD
S4	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	23	<LD	79.78
	nov-12	<LD	95	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S5	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	1	36	<LD	18.07
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S6	ene-12	<LD	36	<LD	4.17
	may-12	<LD	<LD	16	2.76
	nov-12	<LD	3	<LD	7.15
	feb-13	<LD	131	<LD	8.02
S7	ene-12	<LD	<LD	<LD	3.82
	may-12	<LD	23	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	4.06
	feb-13	<LD	<LD	<LD	5.28
S8	ene-12	<LD	<LD	<LD	2.43
	may-12	<LD	<LD	<LD	3.29
	nov-12	<LD	22	<LD	7.44
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.55
S9	ene-12	<LD	18	<LD	3.54
	may-12	<LD	21	<LD	3.37
	nov-12	<LD	22	<LD	<LD
	feb-13	<LD	21	<LD	1.77
S10	ene-12	<LD	<LD	<LD	36.08
	may-12	48	<LD	<LD	0.61
	nov-12	<LD	<LD	<LD	41.42
	feb-13	<LD	<LD	<LD	1.61
S11	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	30.6
	nov-12	<LD	<LD	<LD	2
	feb-13	<LD	<LD	<LD	18.37
S12	ene-12	<LD	19	<LD	3.21
	may-12	<LD	<LD	<LD	63.54
	nov-12	<LD	8	<LD	3.04
	feb-13	<LD	24	<LD	4.62

Cuadro 21.- Fracciones geoquímicas de cadmio en los sedimentos del río Grande de Morelia.

		Cd			
Sitio	Muestreo	Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
S1	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	30	35	<LD	11.25
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S2	ene-12	5	<LD	<LD	16.9
	may-12	19	15	12	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S3	ene-12	37	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S4	ene-12	23	13	<LD	6.75
	may-12	<LD	105	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	11.91
S5	ene-12	<LD	2	<LD	<LD
	may-12	<LD	20	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	2	<LD	<LD
S6	ene-12	87	40	<LD	159.38
	may-12	20	22	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S7	ene-12	31	14	5	<LD
	may-12	<LD	2	7	167.44
	nov-12	<LD	14	27	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S8	ene-12	19	10	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S9	ene-12	<LD	<LD	<LD	145.6
	may-12	<LD	27	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	36	<LD
S10	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	15	17	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S11	ene-12	<LD	<LD	<LD	163.02
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S12	ene-12	5	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	36.13
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD

Cuadro 22.- Fracciones geoquímicas de cromo en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	Cr			
		Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
				mg kg ⁻¹	
S1	ene-12	<LD	<LD	23	<LD
	may-12	<LD	<LD	28	7.71
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	7.06
S2	ene-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	may-12	<LD	<LD	<LD	7.33
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S3	ene-12	<LD	<LD	<LD	9.11
	may-12	<LD	<LD	<LD	11.79
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S4	ene-12	<LD	<LD	<LD	8.75
	may-12	<LD	<LD	<LD	16.59
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S5	ene-12	<LD	<LD	<LD	7.62
	may-12	<LD	<LD	<LD	11.23
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S6	ene-12	<LD	<LD	<LD	6.37
	may-12	<LD	<LD	<LD	9.91
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S7	ene-12	<LD	<LD	<LD	7.61
	may-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	3.63
S8	ene-12	<LD	<LD	<LD	10.14
	may-12	<LD	<LD	<LD	9.48
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S9	ene-12	<LD	<LD	<LD	6.57
	may-12	<LD	<LD	<LD	5.53
	nov-12	<LD	<LD	<LD	3.35
	feb-13	<LD	<LD	<LD	4.86
S10	ene-12	<LD	<LD	<LD	9.23
	may-12	<LD	<LD	<LD	8.01
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD
S11	ene-12	<LD	<LD	<LD	9.45
	may-12	<LD	<LD	<LD	6.98
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	6.24
S12	ene-12	<LD	<LD	<LD	10.49
	may-12	<LD	<LD	<LD	7.31
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	<LD

Cuadro 23.- Fracciones geoquímicas de arsénico en los sedimentos del río Grande de Morelia.

Sitio	Muestreo	As			
		Fracción 1	Fracción 2	Fracción 3	Fracción 4
		mg kg ⁻¹			
S1	ene-12	<LD	0.1180	<LD	0.12
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.12
	nov-12	0.225	<LD	0.103	0.17
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.2
S2	ene-12	<LD	0.1	<LD	0.16
	may-12	0.0340	<LD	<LD	0.14
	nov-12	<LD	<LD	<LD	<LD
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.19
S3	ene-12	<LD	0.1020	0.0113	0.23
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.23
	nov-12	0.1470	<LD	0.1	0.19
	feb-13	<LD	0.4200	<LD	0.27
S4	ene-12	<LD	0.1020	<LD	0.15
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.16
	nov-12	<LD	<LD	<LD	0.25
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.17
S5	ene-12	<LD	<LD	0.4388	0.14
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.15
	nov-12	<LD	<LD	<LD	0.21
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.22
S6	ene-12	<LD	0.1050	<LD	0.19
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.14
	nov-12	<LD	<LD	<LD	0.23
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.13
S7	ene-12	<LD	<LD	<LD	0.20
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.19
	nov-12	<LD	<LD	0.104	0.20
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.18
S8	ene-12	0.9670	0.1010	<LD	0.17
	may-12	0.0220	<LD	<LD	0.13
	nov-12	0.0340	<LD	<LD	0.16
	feb-13	0.0400	<LD	<LD	0.19
S9	ene-12	0.4800	<LD	<LD	0.19
	may-12	0.0020	<LD	<LD	0.11
	nov-12	0.0760	<LD	0.1	0.25
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.24
S10	ene-12	0.1030	<LD	<LD	0.15
	may-12	0.0140	<LD	<LD	0.20
	nov-12	0.0140	<LD	<LD	0.24
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.21
S11	ene-12	0.0580	<LD	<LD	0.15
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.16
	nov-12	<LD	<LD	<LD	0.26
	feb-13	<LD	<LD	<LD	0.22
S12	ene-12	0.0150	<LD	<LD	0.16
	may-12	<LD	<LD	<LD	0.13
	nov-12	0.0330	<LD	<LD	0.22
	feb-13	0.0330	<LD	<LD	0.17

ANEXO C.- Cuadros de especiación química

Cuadro 24.- Especiación química del Fe (II) en el agua del río Grande de Morelia.

Especie	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
	%											
Fe²⁺	-	96.28	96.30	96.45	96.42	96.28	95.79	-	96.952	93.87	92.31	90.468
FeHCO₃⁺	-	2.419	3.085	2.668	3.058	3.183	3.712	-	2.513	5.33	4.384	5.497
FeOH⁺	-	1.295	0.609	0.874	0.519	0.534	0.498	-	0.535	0.793	3.301	4.032

Cuadro 25.- Especiación química del Fe(III) en el agua del río Grande de Morelia.

Especie	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
	%											
FeOH²⁺	-	0.01	0.025	0.017	0.029	0.028	0.033	-	0.022	0.018	-	-
Fe(OH)₂⁺	-	96.16	98.53	97.71	98.78	98.72	98.84	-	98.67	97.78	84.54	78.12
Fe(OH)₃ (aq)	-	2.33	1.09	1.56	0.932	0.967	0.874	-	1.055	1.52	5.062	5.869
Fe(OH)₄⁻	-	1.49	0.35	0.704	0.256	0.276	0.248	-	0.253	0.681	10.39	16.00

Cuadro 26.- Especiación química del zinc en el agua del río Grande de Morelia.

Especie	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
	%											
Zn(CO₃)₂⁻²	0.03	0.061	0.021	0.033	0.02	0.02	0.018	0.04	-	0.126	0.552	1.107
ZnHCO₃⁺	2.31	4.30	6.284	5.205	6.38	6.56	7.652	7.36	-	8.718	4.534	4.392
ZnOH⁺	3.419	2.30	1.241	1.705	1.08	1.10	1.027	1.42	-			
Zn(OH)₂ (aq)	6.15	2.91	0.597	1.266	0.44	0.47	0.325	0.66	-	1.296	3.414	3.222
ZnCO₃ (aq)	16.66	22.18	13.75	16.89	11.9	12.77	12.361	17.62	-	0.959	6.42	7.037
Zn⁺²	71.42	68.22	78.10	74.89	80.16	79.06	78.617	72.89	-	27.77	47.067	55.45 8

ANEXO D.- Tablas de estadística

Tablas del Minitab

Cuadro 27.- Nombre de los sitios correspondientes a los números del Minitab.

Sitios	
N°	Nombre
1	
2	
3	S1
4	
5	
6	
7	S2
8	
9	
10	
11	S3
12	
13	
14	
15	S4
16	
17	
18	
19	S5
20	
21	
22	
23	S6
24	
25	
26	
27	S7
28	
29	
30	
31	S8
32	
33	
34	
35	S9
36	
37	
38	
39	S10
40	
41	
42	
43	S11
44	
45	
46	
47	S12
48	

Cuadro 28.- Valores de las variables creadas para cada parámetros en Minitab.

Variable	PC1	PC2	PC3
T_agua	0.074	-0.135	-0.233
pH	0.134	-0.265*	0.035
C_E	0.253	-0.019	-0.026
O_D	0.013	-0.378*	0.047
SDT	0.273*	0.006	0.021
DQO	0.075	0.345*	-0.005
DBO_5	0.083	0.355*	-0.059
SO_4	0.246	0.039	-0.102
Dza_Tot	0.257	-0.045	0.197
Ca	0.225	-0.01	0.28
Mg	0.243	-0.067	0.097
Na	0.197	0.028	-0.362*
Alc_Total	0.264*	-0.044	-0.022
CO3	0.11	-0.298*	-0.245
HCO3	0.261*	-0.007	0.009
Sol_Sed	0.033	0.042	-0.215
Sol_Tot	0.245	0.076	-0.042
SST	0.036	0.195	-0.004
Cl	0.215	0.132	-0.049
Turbiedad	0.045	0.193	-0.115
Color	0.06	0.208	-0.006
N-NH3	0.116	0.235	-0.208
Col_Fecal	-0.004	0.303*	-0.289
Fe	0.073	0.029	-0.004
Zn	0.026	0.14	0.237
Cu	-0.007	-0.117	-0.345*
Cd	0.033	0.084	0.15
As	0.051	-0.033	-0.273*

Cuadros de ANOVA y Tukey para agua

Cuadro 29.- ANOVA para temperatura en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	81.16562	27.0552	1.8263	0.1563
Error	44	651.80917	14.8138		
C. Total	47	732.97479			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	19.6000	1.1111	17.361	21.839
feb-13	12	23.1500	1.1111	20.911	25.389
may-12	12	20.9917	1.1111	18.752	23.231
nov-12	12	20.5500	1.1111	18.311	22.789

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 30.- Comparación de medias para temperatura utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
		feb-13	may-12	nov-12	ene-12
feb-13	-4.19537	-2.03704	-1.59537	-0.64537	
may-12	-2.03704	-4.19537	-3.75371	-2.80371	
nov-12	-1.59537	-3.75371	-4.19537	-3.24537	
ene-12	-0.64537	-2.80371	-3.24537	-4.19537	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	23.150000
may-12 A	20.991667
nov-12 A	20.550000
ene-12 A	19.600000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 31.- ANOVA para pH en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	2.6986167	0.899539	9.4612	<.0001*
Error	44	4.1833500	0.095076		
C. Total	47	6.8819667			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	7.58333	0.08901	7.4039	7.7627
feb-13	12	7.91167	0.08901	7.7323	8.0911
may-12	12	7.34250	0.08901	7.1631	7.5219
nov-12	12	7.32583	0.08901	7.1464	7.5052

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 32.- Comparación de medias para pH utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

	q*	Alpha
	2.67001	0.05

Abs(Dif)-LSD

	feb-13	ene-12	may-12	nov-12
feb-13	-0.3361	-0.00777	0.233064	0.24973
ene-12	-0.00777	-0.3361	-0.09527	-0.0786
may-12	0.233064	-0.09527	-0.3361	-0.31944
nov-12	0.24973	-0.0786	-0.31944	-0.3361

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	7.9116667
ene-12 A B	7.5833333
may-12 B	7.3425000
nov-12 B	7.3258333

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 33.- ANOVA para conductividad eléctrica en agua.

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	1036071.3	345357	5.7557	0.0021*
Error	44	2640094.5	60002		
C. Total	47	3676165.8			

Means for Oneway Anova

Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	403.125	70.712	260.61	545.64
feb-13	12	810.250	70.712	667.74	952.76
may-12	12	538.167	70.712	395.66	680.68
nov-12	12	562.750	70.712	420.24	705.26

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 34.- Comparación de medias para Conductividad eléctrica utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

	q*	Alpha
	2.67001	0.05

Abs(Dif)-LSD

	feb-13	nov-12	may-12	ene-12
feb-13	-267.005	-19.5054	5.077961	140.1196
nov-12	-19.5054	-267.005	-242.422	-107.38
may-12	5.077961	-242.422	-267.005	-131.964
ene-12	140.1196	-107.38	-131.964	-267.005

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	810.25000
nov-12 A B	562.75000
may-12 B	538.16667
ene-12 B	403.12500

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 35.- ANOVA para oxígeno disuelto en agua.

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	71.50025	23.8334	8.0610	0.0002*
Error	44	130.09202	2.9566		
C. Total	47	201.59227			

Means for Oneway Anova

Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	2.63583	0.49637	1.635	3.6362
feb-13	12	4.22000	0.49637	3.220	5.2204
may-12	12	0.91250	0.49637	-0.088	1.9129
nov-12	12	1.78500	0.49637	0.785	2.7854

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 36.- Comparación de medias para oxígeno disuelto utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

q* 2.67001
Alpha 0.05

Abs(Dif)-LSD

	feb-13	ene-12	nov-12	may-12
feb-13	-1.87428	-0.29012	0.560715	1.433215
ene-12	-0.29012	-1.87428	-1.02345	-0.15095
nov-12	0.560715	-1.02345	-1.87428	-1.00178
may-12	1.433215	-0.15095	-1.00178	-1.87428

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	4.2200000
ene-12 A B	2.6358333
nov-12 B	1.7850000
may-12 B	0.9125000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 37.- ANOVA para sólidos disueltos totales en agua.

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	197767.9	65922.6	3.5272	0.0224*
Error	44	822341.8	18689.6		
C. Total	47	1020109.7			

Means for Oneway Anova

Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	261.925	39.465	182.39	341.46
feb-13	12	431.133	39.465	351.60	510.67
may-12	12	301.500	39.465	221.96	381.04
nov-12	12	298.592	39.465	219.06	378.13

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 38.-Comparación de medias para sólidos disueltos totales utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	may-12	nov-12	ene-12	
feb-13	-149.017	-19.3839	-16.4755	20.19112	
may-12	-19.3839	-149.017	-146.109	-109.442	
nov-12	-16.4755	-146.109	-149.017	-112.351	
ene-12	20.19112	-109.442	-112.351	-149.017	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	431.13333
may-12 A B	301.50000
nov-12 A B	298.59167
ene-12 B	261.92500

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 39.- ANOVA para la demanda química de oxígeno en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	12052.507	4017.50	3.7975	0.0166*
Error	44	46548.720	1057.93		
C. Total	47	58601.227			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	55.8333	9.3894	36.910	74.76
feb-13	12	38.1667	9.3894	19.244	57.09
may-12	12	82.6000	9.3894	63.677	101.52
nov-12	12	56.7333	9.3894	37.810	75.66

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 40.- Comparación de medias para la demanda química de oxígeno utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	may-12	nov-12	ene-12	feb-13	
may-12	-35.4539	-9.58724	-8.68724	8.979424	
nov-12	-9.58724	-35.4539	-34.5539	-16.8872	
ene-12	-8.68724	-34.5539	-35.4539	-17.7872	
feb-13	8.979424	-16.8872	-17.7872	-35.4539	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	82.600000
nov-12 A B	56.733333
ene-12 A B	55.833333
feb-13 B	38.166667

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 41.- ANOVA para la Demanda bioquímica de oxígeno en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	5578.879	1859.63	4.1016	0.0119*
Error	44	19949.190	453.39		
C. Total	47	25528.069			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	35.3942	6.1468	23.006	47.782
feb-13	12	24.3058	6.1468	11.918	36.694
may-12	12	54.4442	6.1468	42.056	66.832
nov-12	12	37.5550	6.1468	25.167	49.943

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 42.- Comparación de medias para la demanda bioquímica de oxígeno utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	may-12	nov-12	ene-12	feb-13	
may-12	-23.2099	-6.32071	-4.15988	6.928453	
nov-12	-6.32071	-23.2099	-21.049	-9.96071	
ene-12	-4.15988	-21.049	-23.2099	-12.1215	
feb-13	6.928453	-9.96071	-12.1215	-23.2099	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	54.444167
nov-12 A B	37.555000
ene-12 A B	35.394167
feb-13 B	24.305833

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 43.- ANOVA para dureza total en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	124188.94	41396.3	6.1169	0.0014*
Error	44	297772.42	6767.6		
C. Total	47	421961.36			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	143.860	23.748	96.00	191.72
feb-13	12	268.240	23.748	220.38	316.10
may-12	12	146.052	23.748	98.19	193.91
nov-12	12	169.160	23.748	121.30	217.02

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 44.- Comparación de medias para la dureza total utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	nov-12	may-12	ene-12	
feb-13	-89.6711	9.4094	32.51707	34.70957	
nov-12	9.4094	-89.6711	-66.5634	-64.3709	
may-12	32.51707	-66.5634	-89.6711	-87.4786	
ene-12	34.70957	-64.3709	-87.4786	-89.6711	
Positive values show pairs of means that are significantly different.					
Level	Mean				
feb-13	A	268.24017			
nov-12	B	169.15967			
may-12	B	146.05200			
ene-12	B	143.85950			
Levels not connected by same letter are significantly different.					

Cuadro 45.-ANOVA Alcalinidad total en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	155893.17	51964.4	8.3140	0.0002*
Error	44	275010.83	6250.2		
C. Total	47	430904.00			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	153.500	22.822	107.50	199.50
feb-13	12	311.667	22.822	265.67	357.66
may-12	12	206.250	22.822	160.25	252.25
nov-12	12	218.583	22.822	172.59	264.58

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 46.- Comparación de medias para la alcalinidad total utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	nov-12	may-12	ene-12	
feb-13	-86.1758	6.907565	19.2409	71.9909	
nov-12	6.907565	-86.1758	-73.8424	-21.0924	
may-12	19.2409	-73.8424	-86.1758	-33.4258	
ene-12	71.9909	-21.0924	-33.4258	-86.1758	
Positive values show pairs of means that are significantly different.					
Level	Mean				
feb-13	A	311.66667			
nov-12	B	218.58333			
may-12	B	206.25000			
ene-12	B	153.50000			
Levels not connected by same letter are significantly different.					

Cuadro 47.-ANOVA para el Calcio en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestreos	3	8.978843	2.99295	3.7412	0.0177*
Error	44	35.199774	0.79999		
C. Total	47	44.178617			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	1.57042	0.25820	1.0501	2.0908
feb-13	12	2.55308	0.25820	2.0327	3.0734
may-12	12	1.48692	0.25820	0.9666	2.0073
nov-12	12	1.62483	0.25820	1.1045	2.1452

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 48.- Comparación de medias para el calcio utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD						
	q*	Alpha				
	2.67001	0.05	Abs(Dif)-LSD			
			feb-13	nov-12	ene-12	may-12
feb-13			-0.97495	-0.0467	0.007721	0.091221
nov-12			-0.0467	-0.97495	-0.92053	-0.83703
ene-12			0.007721	-0.92053	-0.97495	-0.89145
may-12			0.091221	-0.83703	-0.89145	-0.97495

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	2.5530833
nov-12 A B	1.6248333
ene-12 B	1.5704167
may-12 B	1.4869167

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 49.- ANOVA para el magnesio en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestreos	3	16.583120	5.52771	6.2381	0.0013*
Error	44	38.989145	0.88612		
C. Total	47	55.572265			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	1.31018	0.27174	0.7625	1.8578
feb-13	12	2.81826	0.27174	2.2706	3.3659
may-12	12	1.48910	0.27174	0.9414	2.0368
nov-12	12	1.69262	0.27174	1.1450	2.2403

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 50.- Comparación de medias para el magnesio utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
		q*	Alpha		
		2.67001	0.05		
Abs(Dif)-LSD					
		feb-13	nov-12	may-12	ene-12
feb-13		-1.02608	0.09956	0.303076	0.481993
nov-12		0.09956	-1.02608	-0.82257	-0.64365
may-12		0.303076	-0.82257	-1.02608	-0.84717
ene-12		0.481993	-0.64365	-0.84717	-1.02608

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	2.8182583
nov-12 B	1.6926167
may-12 B	1.4891000
ene-12 B	1.3101833

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 51.- ANOVA para Sodio en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	9.74329	3.24776	1.4461	0.2423
Error	44	98.81673	2.24583		
C. Total	47	108.56002			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	2.12715	0.43261	1.2553	2.9990
feb-13	12	3.31173	0.43261	2.4399	4.1836
may-12	12	3.03840	0.43261	2.1665	3.9103
nov-12	12	2.58769	0.43261	1.7158	3.4596

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 52.- Comparación de medias para el sodio utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
		q*	Alpha		
		2.67001	0.05		
Abs(Dif)-LSD					
		feb-13	may-12	nov-12	ene-12
feb-13		-1.63352	-1.3602	-0.90949	-0.44895
may-12		-1.3602	-1.63352	-1.18282	-0.72227
nov-12		-0.90949	-1.18282	-1.63352	-1.17298
ene-12		-0.44895	-0.72227	-1.17298	-1.63352

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	3.3117250
may-12 A	3.0384000
nov-12 A	2.5876917
ene-12 A	2.1271500

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 53.- ANOVA para sulfatos en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	4339.622	1446.54	2.4158	0.0791
Error	44	26346.797	598.79		
C. Total	47	30686.418			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	39.5280	7.0639	25.292	53.764
feb-13	12	64.3165	7.0639	50.080	78.553
may-12	12	49.4665	7.0639	35.230	63.703
nov-12	12	42.9078	7.0639	28.671	57.144

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 54.- Comparación de medias para sulfatos utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	may-12	nov-12	ene-12	
feb-13	-26.6731	-11.8231	-5.26439	-1.88464	
may-12	-11.8231	-26.6731	-20.1144	-16.7346	
nov-12	-5.26439	-20.1144	-26.6731	-23.2934	
ene-12	-1.88464	-16.7346	-23.2934	-26.6731	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	64.316500
may-12 A	49.466500
nov-12 A	42.907750
ene-12 A	39.528000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 55.-ANOVA para bicarbonatos en agua

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	126466.50	42155.5	6.8913	0.0007*
Error	44	269157.50	6117.2		
C. Total	47	395624.00			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	153.500	22.578	108.00	199.00
feb-13	12	297.000	22.578	251.50	342.50
may-12	12	206.250	22.578	160.75	251.75
nov-12	12	217.250	22.578	171.75	262.75

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 56.- Comparación de medias para bicarbonatos utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	nov-12	may-12	ene-12	
feb-13	-85.2538	-5.50375	5.496247	58.24625	
nov-12	-5.50375	-85.2538	-74.2538	-21.5038	
may-12	5.496247	-74.2538	-85.2538	-32.5038	
ene-12	58.24625	-21.5038	-32.5038	-85.2538	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13	A 297.00000
nov-12	A B 217.25000
may-12	B 206.25000
ene-12	B 153.50000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 57.-ANOVA para cloruros en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	619.543	206.514	0.2960	0.8281
Error	44	30695.949	697.635		
C. Total	47	31315.492			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	53.9158	7.6247	38.549	69.282
feb-13	12	55.9183	7.6247	40.552	71.285
may-12	12	50.2142	7.6247	34.848	65.581
nov-12	12	46.5300	7.6247	31.163	61.897

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 58.- Comparación de medias para cloruros utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	ene-12	may-12	nov-12	
feb-13	-28.7906	-26.7881	-23.0864	-19.4023	
ene-12	-26.7881	-28.7906	-25.0889	-21.4048	
may-12	-23.0864	-25.0889	-28.7906	-25.1064	
nov-12	-19.4023	-21.4048	-25.1064	-28.7906	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13	A 55.918333
ene-12	A 53.915833
may-12	A 50.214167
nov-12	A 46.530000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 59.- ANOVA para nitrógeno amoniacal en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	211.6472	70.5491	3.6897	0.0187*
Error	44	841.2929	19.1203		
C. Total	47	1052.9401			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	1.90800	1.2623	-0.636	4.4520
feb-13	12	4.12400	1.2623	1.580	6.6680
may-12	12	7.11800	1.2623	4.574	9.6620
nov-12	12	6.68242	1.2623	4.138	9.2264

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 60.- Comparación de medias para nitrógeno amoniacal utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
		may-12	nov-12	feb-13	ene-12
may-12	-4.76633	-4.33074	-1.77233	0.443673	
nov-12	-4.33074	-4.76633	-2.20791	0.008089	
feb-13	-1.77233	-2.20791	-4.76633	-2.55033	
ene-12	0.443673	0.008089	-2.55033	-4.76633	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	7.1180000
nov-12 A	6.6824167
feb-13 A B	4.1240000
ene-12 B	1.9080000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 61.- ANOVA para los sólidos sedimentables en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	1.820625	0.606875	0.8741	0.4618
Error	44	30.549167	0.694299		
C. Total	47	32.369792			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	0.49167	0.24054	0.00690	0.9764
feb-13	12	0.71667	0.24054	0.23190	1.2014
may-12	12	1.03333	0.24054	0.54856	1.5181
nov-12	12	0.81667	0.24054	0.33190	1.3014

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 62.- Comparación de medias para los sólidos sedimentables utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
		may-12	nov-12	feb-13	ene-12
may-12	-0.90826	-0.69159	-0.59159	-0.36659	
nov-12	-0.69159	-0.90826	-0.80826	-0.58326	
feb-13	-0.59159	-0.80826	-0.90826	-0.68326	
ene-12	-0.36659	-0.58326	-0.68326	-0.90826	
Positive values show pairs of means that are significantly different.					
Level	Mean				
may-12 A	1.0333333				
nov-12 A	0.8166667				
feb-13 A	0.7166667				
ene-12 A	0.4916667				
Levels not connected by same letter are significantly different.					

Cuadro 63.- ANOVA para sólidos totales en agua.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	
Muestras	3	219585.0	73195.0	1.4728	0.2350	
Error	44	2186646.7	49696.5			
C. Total	47	2406231.7				

Means for Oneway Anova						
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%	
ene-12	12	442.833	64.354	313.14	572.53	
feb-13	12	627.167	64.354	497.47	756.86	
may-12	12	516.833	64.354	387.14	646.53	
nov-12	12	490.833	64.354	361.14	620.53	

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 64.- Comparación de medias para sólidos totales utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
		feb-13	may-12	nov-12	ene-12
feb-13	-242.996	-132.663	-106.663	-58.6629	
may-12	-132.663	-242.996	-216.996	-168.996	
nov-12	-106.663	-216.996	-242.996	-194.996	
ene-12	-58.6629	-168.996	-194.996	-242.996	
Positive values show pairs of means that are significantly different.					
Level	Mean				
feb-13 A	627.16667				
may-12 A	516.83333				
nov-12 A	490.83333				
ene-12 A	442.83333				
Levels not connected by same letter are significantly different.					

Cuadro 65.- ANOVA sólidos suspendidos totales en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	29880.50	9960.2	0.9025	0.4476
Error	44	485589.17	11036.1		
C. Total	47	515469.67			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	73.167	30.326	12.05	134.29
feb-13	12	32.250	30.326	-28.87	93.37
may-12	12	102.500	30.326	41.38	163.62
nov-12	12	69.750	30.326	8.63	130.87

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 66.- Comparación de medias para sólidos suspendidos totales utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
	q*	Alpha			
	2.67001	0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	may-12	ene-12	nov-12	feb-13	
may-12	-114.51	-85.177	-81.7604	-44.2604	
ene-12	-85.177	-114.51	-111.094	-73.5937	
nov-12	-81.7604	-111.094	-114.51	-77.0104	
feb-13	-44.2604	-73.5937	-77.0104	-114.51	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	102.50000
ene-12 A	73.16667
nov-12 A	69.75000
feb-13 A	32.25000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 67.- ANOVA para coliformes fecales en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	2.2464e+13	7.488e+12	13.5778	<.0001*
Error	44	2.4265e+13	5.515e+11		
C. Total	47	4.6729e+13			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	506123	214375	74079.169	938167.5
feb-13	12	20158	214375	-411885.8	452202.5
may-12	12	1815833	214375	1383789.2	2247877.5
nov-12	12	1222892	214375	790847.5	1654935.8

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 68.- Comparación de medias para coliformes fecales utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD				
q*		Alpha		
2.67001		0.05		
Abs(Dif)-LSD				
	may-12	nov-12	ene-12	feb-13
may-12	-809471	-216529	500239.4	986204.4
nov-12	-216529	-809471	-92702.3	393262.7
ene-12	500239.4	-92702.3	-809471	-323506
feb-13	986204.4	393262.7	-323506	-809471
Positive values show pairs of means that are significantly different.				
Level	Mean			
may-12 A	1815833.3			
nov-12 A B	1222891.7			
ene-12 B C	506123.3			
feb-13 C	20158.3			
Levels not connected by same letter are significantly different.				

Cuadro 69.- ANOVA para hierro en agua.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestreos	3	65.68411	21.8947	1.3353	0.2754
Error	43	705.05930	16.3967		
C. Total	46	770.74342			
Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	2.38942	1.1689	0.0320	4.7468
feb-13	11	5.47718	1.2209	3.0150	7.9394
may-12	12	4.00192	1.1689	1.6445	6.3593
nov-12	12	2.81233	1.1689	0.4550	5.1697
Std Error uses a pooled estimate of error variance					

Cuadro 70.- Comparación de medias para hierro utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD				
q*		Alpha		
2.67242		0.05		
Abs(Dif)-LSD				
	feb-13	may-12	nov-12	ene-12
feb-13	-4.61426	-3.04184	-1.85226	-1.42934
may-12	-3.04184	-4.41782	-3.22824	-2.80532
nov-12	-1.85226	-3.22824	-4.41782	-3.9949
ene-12	-1.42934	-2.80532	-3.9949	-4.41782
Positive values show pairs of means that are significantly different.				
Level	Mean			
feb-13 A	5.4771818			
may-12 A	4.0019167			
nov-12 A	2.8123333			
ene-12 A	2.3894167			
Levels not connected by same letter are significantly different.				

Cuadro 71.- ANOVA para zinc en agua.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	
Muestras	3	0.00358306	0.001194	0.1591	0.9232	
Error	44	0.33024375	0.007506			
C. Total	47	0.33382681				

Means for Oneway Anova						
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%	
ene-12	12	0.040083	0.02501	-0.0103	0.09049	
feb-13	12	0.063833	0.02501	0.0134	0.11424	
may-12	12	0.056583	0.02501	0.0062	0.10699	
nov-12	12	0.051750	0.02501	0.0013	0.10215	

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 72.- Comparación de medias para zinc utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	feb-13	may-12	nov-12	ene-12	
feb-13	-0.09443	-0.08718	-0.08235	-0.07068	
may-12	-0.08718	-0.09443	-0.0896	-0.07793	
nov-12	-0.08235	-0.0896	-0.09443	-0.08277	
ene-12	-0.07068	-0.07793	-0.08277	-0.09443	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
feb-13 A	0.06383333
may-12 A	0.05658333
nov-12 A	0.05175000
ene-12 A	0.04008333

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 73.- ANOVA para arsénico en agua.

Analysis of Variance						
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F	
Muestras	3	0.00001913	6.3772e-6	1.3664	0.2655	
Error	44	0.00020536	4.6672e-6			
C. Total	47	0.00022449				

Means for Oneway Anova						
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%	
ene-12	12	0.000303	0.00062	-0.001	0.00156	
feb-13	12	0.001233	0.00062	-2.4e-5	0.00249	
may-12	12	0.002048	0.00062	0.00079	0.00330	
nov-12	12	0.000892	0.00062	-0.0004	0.00215	

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 74.- Comparación de medias para arsénico utilizando Tukey-Kramer en agua.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	may-12	feb-13	nov-12	ene-12	
may-12	-0.00235	-0.00154	-0.0012	-0.00061	
feb-13	-0.00154	-0.00235	-0.00201	-0.00142	
nov-12	-0.0012	-0.00201	-0.00235	-0.00177	
ene-12	-0.00061	-0.00142	-0.00177	-0.00235	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	0.00204792
feb-13 A	0.00123333
nov-12 A	0.00089167
ene-12 A	0.00030250

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadros de ANOVA y Tukey para sedimentos

Cuadro 75.- ANOVA para hierro en sedimentos.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestréos	3	2660655956	886885319	0.0561	0.9823
Error	44	6.9583e+11	1.581e+10		
C. Total	47	6.9849e+11			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	108812	36302	35649	181974
feb-13	12	90768	36302	17605	163931
may-12	12	105705	36302	32542	178868
nov-12	12	108652	36302	35490	181815

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 76.- Comparación de medias para hierro utilizando Tukey_kramer en sedimentos.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	ene-12	nov-12	may-12	feb-13	
ene-12	-137076	-136917	-133970	-119033	
nov-12	-136917	-137076	-134129	-119192	
may-12	-133970	-134129	-137076	-122139	
feb-13	-119033	-119192	-122139	-137076	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
ene-12 A	108811.50
nov-12 A	108652.17
may-12 A	105704.92
feb-13 A	90768.00

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 77.- ANOVA para zinc en sedimentos.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	75796.92	25265.6	2.3818	0.0823
Error	44	466734.41	10607.6		
C. Total	47	542531.33			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	148.225	29.732	88.30	208.15
feb-13	12	121.367	29.732	61.45	181.29
may-12	12	226.875	29.732	166.95	286.80
nov-12	12	185.600	29.732	125.68	245.52

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 78.- Comparación de medias para zinc utilizando Tukey-Kramer en sedimentos.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*	Alpha				
2.67001	0.05				
Abs(Dif)-LSD					
	may-12	nov-12	ene-12	feb-13	
may-12	-112.265	-70.9902	-33.6152	-6.75687	
nov-12	-70.9902	-112.265	-74.8902	-48.0319	
ene-12	-33.6152	-74.8902	-112.265	-85.4069	
feb-13	-6.75687	-48.0319	-85.4069	-112.265	

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	226.87500
nov-12 A	185.60000
ene-12 A	148.22500
feb-13 A	121.36667

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 79.- ANOVA para níquel en sedimentos.

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	922.324	307.441	0.5559	0.6470
Error	44	24336.396	553.100		
C. Total	47	25258.720			

Means for Oneway Anova					
Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	44.4667	6.7891	30.784	58.149
feb-13	12	38.6667	6.7891	24.984	52.349
may-12	12	50.5250	6.7891	36.843	64.207
nov-12	12	41.6000	6.7891	27.918	55.282

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 80.- Comparación de medias para níquel utilizando Tukey-Kramer en sedimentos.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

	q*	Alpha		
	2.67001	0.05		
Abs(Dif)-LSD				
	may-12	ene-12	nov-12	feb-13
may-12	-25.6353	-19.577	-16.7103	-13.777
ene-12	-19.577	-25.6353	-22.7686	-19.8353
nov-12	-16.7103	-22.7686	-25.6353	-22.702
feb-13	-13.777	-19.8353	-22.702	-25.6353

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	50.525000
ene-12 A	44.466667
nov-12 A	41.600000
feb-13 A	38.666667

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 81.- ANOVA para cobre en sedimentos.

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	13300.542	4433.51	3.7190	0.0181*
Error	44	52453.948	1192.14		
C. Total	47	65754.490			

Means for Oneway Anova

Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	14.0583	9.9672	-6.03	34.146
feb-13	12	0.0000	9.9672	-20.09	20.088
may-12	12	43.6917	9.9672	23.60	63.779
nov-12	12	6.9500	9.9672	-13.14	27.038

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 82.- Comparación de medias para cobre utilizando Tukey-Kramer en sedimentos.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD

	q*	Alpha		
	2.67001	0.05		
Abs(Dif)-LSD				
	may-12	ene-12	nov-12	feb-13
may-12	-37.6356	-8.00231	-0.89398	6.056022
ene-12	-8.00231	-37.6356	-30.5273	-23.5773
nov-12	-0.89398	-30.5273	-37.6356	-30.6856
feb-13	6.056022	-23.5773	-30.6856	-37.6356

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	43.691667
ene-12 A B	14.058333
nov-12 A B	6.950000
feb-13 B	0.000000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 83.- ANOVA para plomo en sedimentos.

▼ **Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	1356.628	452.209	1.2875	0.2905
Error	44	15454.378	351.236		
C. Total	47	16811.007			

▼ **Means for Oneway Anova**

Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	5.2000	5.4101	-5.70	16.103
feb-13	12	0.0000	5.4101	-10.90	10.903
may-12	12	14.7583	5.4101	3.85	25.662
nov-12	12	5.5083	5.4101	-5.40	16.412

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 84.- Comparación de medias para plomo utilizando Tukey-Kramer en sedimentos.

▼ **Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD**

	q*	Alpha
	2.67001	0.05

Abs(Dif)-LSD

	may-12	nov-12	ene-12	feb-13
may-12	-20.4285	-11.1785	-10.8701	-5.67015
nov-12	-11.1785	-20.4285	-20.1201	-14.9201
ene-12	-10.8701	-20.1201	-20.4285	-15.2285
feb-13	-5.67015	-14.9201	-15.2285	-20.4285

Positive values show pairs of means that are significantly different.

Level	Mean
may-12 A	14.758333
nov-12 A	5.508333
ene-12 A	5.200000
feb-13 A	0.000000

Levels not connected by same letter are significantly different.

Cuadro 85.- ANOVA para arsénico en sedimentos.

▼ **Analysis of Variance**

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Muestras	3	6.720700	2.24023	1.6187	0.1987
Error	44	60.896196	1.38400		
C. Total	47	67.616897			

▼ **Means for Oneway Anova**

Level	Number	Mean	Std Error	Lower 95%	Upper 95%
ene-12	12	1.34245	0.33961	0.6580	2.0269
feb-13	12	1.60395	0.33961	0.9195	2.2884
may-12	12	1.59378	0.33961	0.9093	2.2782
nov-12	12	2.34299	0.33961	1.6586	3.0274

Std Error uses a pooled estimate of error variance

Cuadro 86.- Comparación de medias para arsénico utilizando Tukey-Kramer en sedimentos.

Comparisons for all pairs using Tukey-Kramer HSD					
q*		Alpha			
2.67001		0.05			
Abs(Dif)-LSD					
	nov-12	feb-13	may-12	ene-12	
nov-12	-1.28235	-0.5433	-0.53314	-0.2818	
feb-13	-0.5433	-1.28235	-1.27218	-1.02085	
may-12	-0.53314	-1.27218	-1.28235	-1.03101	
ene-12	-0.2818	-1.02085	-1.03101	-1.28235	
Positive values show pairs of means that are significantly different.					
Level	Mean				
nov-12 A	2.3429917				
feb-13 A	1.6039500				
may-12 A	1.5937833				
ene-12 A	1.3424500				
Levels not connected by same letter are significantly different.					

ANEXO E.- Métodos de digestión ácida de agua y sedimentos.

Digestión ácida para agua

Material y Equipo

- Recipientes de digestión (vaso precipitado)
- Vidrios de reloj
- Matraz aforado
- Embudos
- Papel filtro
- Probeta
- Parrilla eléctrica (ajustable 90 a 95 °C)

Reactivos

- Agua desionizada
- Ácido nítrico (HNO₃) de alta pureza
- Ácido Clorhídrico (HCl) de alta pureza

Procedimiento

1. Transferir una alícuota de 100 mL de muestra bien mezclada a un recipiente (Vaso de precipitado).
2. Agregar 2 ML de HNO₃ de alta pureza y 5 mL de HCl de alta pureza, cubrir con un vidrio de reloj y calentar a una temperatura de 90 a 95 °C, evaporar la muestra hasta reducir el volumen a 15 – 20 mL. *Precaución:* cuidar que no ebulle.
3. Retirar el vaso de precipitado y dejar enfriar. Vaciar el digerido en un matraz aforado de 100 mL. Si es necesario, filtrar o centrifugar. Lavar las paredes del recipiente y el vidrio de reloj con agua desionizada.
4. Ajustar el volumen final con agua desionizada.

Digestión ácida para sedimentos

Material y reactivos

- Recipientes de digestión (vaso de precipitado)
- Matraz aforado
- Matraz de bola
- Refrigerante
- Mangueras
- Bomba para agua
- Horno de secado
- Termómetro
- Papel filtro Whatman No. 40
- Balanza analítica
- Manta de calentamiento
- Embudo de vidrio
- Probeta
- Pipetas volumétricas
- Soporte universal
- Espátula
- Reactivos
- Agua desionizada
- HNO_3 de alta pureza
- H_2O_2 al 30%
- HCl de alta pureza

Procedimiento

1. Pesar 1 g de sedimento seco y transferirlo al recipiente de digestión.
2. Preparar ácido nítrico 1:1 (5 mL de agua desionizada y 5 mL de HNO_3), añadir 10 mL de ácido nítrico 1:1, mezclar ligeramente el sedimento y cubrir con el aparato de reflujo.
3. Calentar la muestra a 95 ± 5 °C en reflujo y una vez controlada la temperatura esperar 10 min sin permitir ebullición. Dejar que se enfríe la muestra.
4. Una vez enfriada la muestra, añadir 5 mL de HNO_3 , calentar en reflujo por 30 min, si se generan humos color café, se debe repetir este paso las veces que sean necesarias hasta no generar humos cafés.
5. Evaporar la solución hasta aproximadamente 5 mL sin ebullición o calentar a 95 ± 5 °C sin ebullición por 2 h. Mantener siempre cubierta la muestra con solución en el recipiente.
6. Terminado el paso anterior dejar enfriar, y añadir 2 mL de agua desionizada y 3 mL de H_2O_2 al 30 %, calentar en reflujo, teniendo cuidado de no calentar demasiado para evitar efervescencia excesiva para de esta manera disminuir pérdidas. Calentar hasta que no haya efervescencia y enfriar el recipiente.
7. Una vez enfriado el recipiente, continuar añadiendo H_2O_2 al 30 % en alícuotas de 1 mL con calentamiento hasta que la efervescencia sea mínima y la apariencia no cambie.

Nota: No añadir más de 10 mL de H₂O₂ al 30%.

8. Terminado el paso anterior dejar enfriar, añadir 10 mL de HCl y calentar en reflujo por 15 min.
9. Después del paso anterior, enfriar la muestra, filtrarla con papel whatman No. 440 recibiendo el líquido en un matraz aforado de 100 mL y llevar al volumen con agua desionizada.

ANEXOF.- Métodos para la determinación de parámetros fisicoquímicos en sedimentos

Determinación de color en sedimento

Se determina mediante el método de la tabla Munsell para color de los suelos. La determinación se basa en el igualamiento del color observado en el sedimento tanto en seco como en húmedo respecto al color registrado en las tarjetas de color, ubicadas en cada una de las páginas de la Tabla Munsell, donde se manejan los parámetros de matiz (Hue), Brillo (Value) e Intensidad (Chroma).

Material y equipo

- Tabla de color Munsell (Munsell soil color charts)
- Placa de porcelana con huecos
- Piceta
- Tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro

Procedimiento

Determinación en seco

1. Tome aproximadamente 100 g del suelo previamente secado al aire y páselo por el tamiz de abertura de 2mm.
2. De la muestra de suelo tamizado tome una pequeña cantidad, suficiente para enrasar uno de los huecos de la placa de porcelana.
3. Tome la cápsula de porcelana y colóquela debajo de la página de la Tabla Munsell, ubicando la muestra de suelo por debajo de cada orificio de la carta junto al cual se tiene la tarjeta con el color.
4. Recorre las páginas que considere tiene una mayor similitud entre el color que presenta el suelo y el color de las tarjetas, hasta encontrar el color que más se parezca al del suelo.
5. Una vez ubicada el color registre el valor de Hue que encuentra en la parte superior derecha de la página, asimismo registre el valor del Value ubicado en el eje vertical de la página y el valor de chroma ubicado en el eje "x" de la página.

Determinación en húmedo

Para la determinación en húmedo se sigue el mismo procedimiento anterior con la diferencia que una vez colocada el suelo en la placa de porcelana se humedece sin saturarlo, teniendo cuidado de no exceder el agua, para evitar que brille.

Determinación del tamaño de partículas para sedimento

Se determina por el método de la pipeta para el tamaño de las partículas de los suelos. El método de la pipeta es un procedimiento de muestreo directo. El método consiste en tomar una submuestra (alícuota) de una suspensión de sedimento en agua donde se está llevando a cabo un proceso de sedimentación. La submuestra es tomada a una profundidad h y a un tiempo t , en el que todas las partículas con diámetro mayor o igual a 0.002mm han sedimentado, teniéndose en las alícuotas únicamente partículas pertenecientes a la fracción arcillosa. El método se basa en la Ley de Stokes.

Reactivos

- Hexametafosfato de sodio 1N
- Agua destilada
- Agua oxigenada al 6%

Material y equipo

- Pipeta lowy
- Botellas de 250 mL
- Tamices de 300 mallas
- Cápsula de porcelana
- Estufa de aire forzado
- Balanza analítica
- Agitador de vidrio
- Probetas graduadas de 1L
- Sedimento sin materia orgánica
-

Procedimiento

1. Pese 20 g de suelo el cual debe estar seco, sin materia orgánica, molido y tamizado a través de la malla de $<2\text{mm}$.
2. Coloque la muestra en una botella de 250 mL.
3. Agregue a la botella con suelo 10 mL del dispersante hexametafosfato de sodio.
4. Una vez agregado el dispersante a la botella, colocar agua destilada hasta casi llenarla, dejando un espacio de 4 cm para que se pueda agitar.
5. Se pone agitar la botella con los reactivos durante 16 h.
6. Al día siguiente la solución de la botella se pasa por un tamiz N. 105 con diámetro de 0.105 mm , se parando así las arenas de los limos y arcillas.
7. Una vez separados los limos y arcillas por el tamiz, las arenas son lavadas con agua de la llave (eliminando la materia orgánica de las arenas) y se colocan en frascos para después ponerlas a secar.
8. Los limos y arcillas se pasan a una probeta de 1 L, se afora con agua destilada, se deja reposar toda la noche.
9. Al día siguiente se agitan durante 1 min todas las probetas, se toma una alícuota de limo grueso y se esperan 10 min para tomas dos alícuotas de limo fino con la

pipeta de lowy, las alícuotas se colocan en frascos y se ponen a secar. (Con base a la temperatura es la profundidad a la que se toma la muestra de limo grueso, cuadro 28; para limos finos se toma la muestra a la mitad de la solución que quede en la probeta).

10. Se dejan reposar las probetas durante 4.5 h, se extraen cada media alícuotas de arcilla hasta llegar a cinco alícuotas, se colocan en frascos y se ponen a secar. (Con base a la temperatura es la profundidad a la que se toma la muestra, cuadro 28).
11. Se deja reposar la solución en la probeta toda la noche, y al día siguiente se toma la una alícuota de arcillas finas, se coloca en frascos y se ponen a secar. (La alícuota se toma a la mitad de la solución que quede en la probeta).
12. Una vez seca todas las muestras se pesan y se realizan los cálculos para determinar la cantidad que se tienen en el suelo de cada una de las texturas.

Cuadro 87.- Profundidad de pipeta en cm en función de la temperatura y tiempo de sedimentación.

T °C	Profundidad	
	Limo grueso <20 μm	Arcilla <2 μm
19	10.5	6.9
20	10.8	7.1
21	11	7.2
22	11.3	7.4
23	11.6	7.6
24	11.9	7.8
25	12.1	8
26	12.4	8.2
27	12.7	8.4
28	13	8.6
29	13.3	8.8

Cálculos:

A= peso de la muestra

B= peso de las arenas

$$\% \text{ Arenas} = (B / A) \times 100$$

C= peso de arcilla + limo = (A – B)

D= Peso del suelo en la alícuota (partículas < 0.002 mm)

E= peso de la arcilla= D x 8

$$\% \text{ de arcilla} = (E / A) \times 100$$

$$F = \text{Peso de limo} = A - B - E$$

$$\% \text{ de limo} = (F / A) \times 100$$

Con los porcentajes de arena, limo y arcilla y mediante el uso del triángulo de texturas se determina la clasificación textural del suelo.

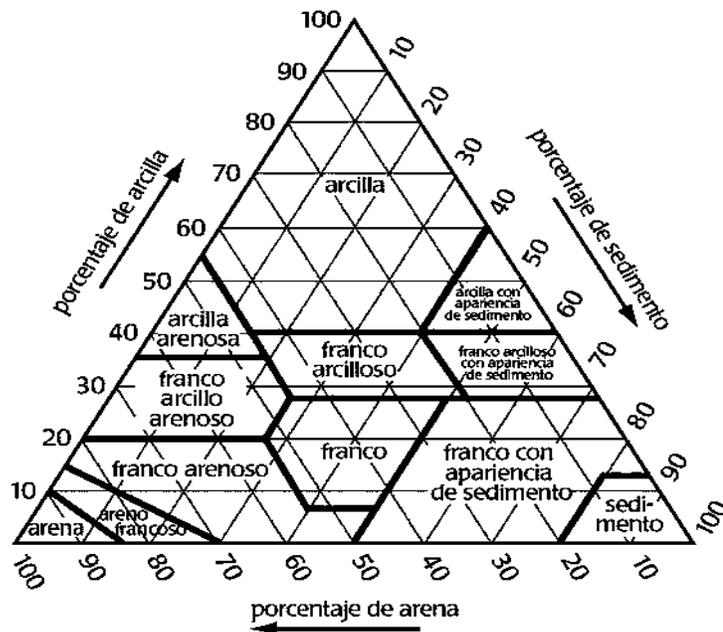


Figura 6.- Triángulo de texturas de suelo.

Determinación de pH en sedimento

Se determina mediante el método 9045 de la EPA, el cual indica el procedimiento electrométrico para medir el pH en suelos y muestras de sedimento, pueden ser sólidos, lodos, o líquidos no acuosos. Si el agua está presente, debe constituir menos del 20% del volumen total de la muestra.

Inmediatamente después de la colecta, la muestra se mezcla con agua desionizada, y el pH de la solución acuosa que resulte se mide.

Material

- Frascos de 50 mL
- Termómetro
- Potenciómetro

Reactivos

- Agua destilada

Procedimiento

1. A 20 gr de sedimento en un frasco de 50 mL añadir 20 mL de agua destilada, cubrir y agitar continuamente la suspensión durante 5 min.
2. Permitir que la suspensión de sedimento repose por una hora para que la mayor parte de la arcilla suspendida sedimente, si es necesario filtrar o centrifugar la fase acuosa para la medición del pH.
3. Tomar la temperatura de la solución.
4. Reportar los resultados como "pH de sedimento medido en agua a – T °C".