

**Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología**

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**UNAM**  
**POSGRADO**  
Ciencias del Mar y  
Limnología

***Estudio Sedimentológico del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**Maestro en Ciencias**

Presenta

**Ricardo Antonio Villanueva Pérez**

**DIRECTOR DE TESIS**

*Dr Arturo Carranza Edwards*

**COMITE TUTORAL**

*Dra Isabel Israde Alcántara*

*Dra Leticia Rosales Hoz*

*Dr Liberto De Pablo Galán*

*Dr Juan Kasper Zubillaga*

México D.F. 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES**

Guadalupe y Francisco  
Por darme la vida y la educación para ser un hombre de bien

### **A MIS HERMANOS**

Alma Rosa, María y Andrés

Reconociendo su paciencia y consejos en el transcurso de mi educación

### **A MI ESPOSA**

Alejandra

Valorando todo el amor y el apoyo incondicional en todas las todas las empresas que realizamos juntos y en lo individual

### **A MI SUEGRA**

Guadalupe

Por abrirme las puertas de su hogar y de su familia

### **A MI HIJO**

Beto

Como un ejemplo de realización en la vida

### **A MI CUÑADO**

Eliseo por la confianza y la amistad que me ha brindado

### **A MIS AMIGOS**

Lalo Morales, Miguel Vera, Everardo Miranda, Eliseo Reyes, Juan Antonio Belmont, Fernando Rosique, Arturo Tapia, Juan José Medina, Héctor Macias y a todos aquellos con los que he convivido en mi vida personal y profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

**AL DIRECTOR DE MI TESIS:  
DR. ARTURO CARRANZA EDWARDS**

Por su invaluable apoyo en lo académico y moral para la realización de este importante proyecto personal, por siempre mi eterno agradecimiento. Por ser pilar en la culminación de este trabajo.

**A MIS TUTORES:**  
Dra. Isabel Israde Alcántara  
Dra. Leticia Rosales Hoz  
Dr. Liberto de Pablo Galán  
Dr. Juan Kasper Zubillaga

Por sus valiosos consejos a lo largo del desarrollo de mi tesis de maestría. Por su decidida colaboración en lo académico y lo logístico, gracias mil.

**A MI ASESOR EXTERNO:**  
Raúl Gío Argáez

Por sus inteligentes palabras para la realización de este importante proyecto académico en mi vida.

**A LOS TECNICOS ACADEMICOS:**

MC Eduardo Morales de la Garza  
QFB Susana Santiago  
QFB Rufino Lozano

Un agradecimiento especial por el apoyo en lo logístico del que fui objeto cada vez que lo solicité, haciéndoles saber mi gratitud por apoyarme en todo momento.

También deseo reconocer a los CC.  
Geógrafo Germán Gómez Rocha  
MC. Omar Celis Hernández  
Sr. Adán Castro  
QA Adriana Vega

Por su cercana colaboración en el desarrollo de mi tesis porque gracias a sus apoyo fue posible el enriquecimiento de mi trabajo de titulación.

A las autoridades del Instituto en Ciencias del Mar y Limnología, por el apoyo brindado a través de los laboratorios de Sedimentología y Química Marina.  
Esta tesis es parte del proyecto: Sedimentología del Litoral y del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo bajo la responsabilidad del Dr Arturo Carranza Edwards.

## **ESTUDIO SEDIMENTOLÓGICO DEL VASO PONIENTE DEL LAGO DE CUITZEO**

	Página
<b>ÍNDICE</b>	
<b>RESUMEN</b>	
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
OBJETIVO GENERAL	
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>4</b>
<b>3. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>13</b>
LOCALIZACIÓN	
CLIMA	
HIDROGRAFÍA	
GEOLOGÍA	
FISIOGRAFÍA	
GEOMORFOLOGÍA	
EDAFOLOGÍA	
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>26</b>
ACTIVIDADES DE CAMPO	
ACTIVIDADES DE LABORATORIO	
<b>5. FISICOQUÍMICA DEL AGUA</b>	<b>31</b>
QUÍMICA DEL AGUA	
NUTRIENTES	
ELEMENTOS MAYORES Y SULFATOS	
ELEMENTOS TRAZA	
BATIMETRÍA	

VALORACIÓN DEL pH	
TEMPERATURA	
CONDUCTIVIDAD	
TRANSPARENCIA	
SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS	
<b>6. QUÍMICA DE SEDIMENTOS</b>	<b>47</b>
VALORACIÓN DEL pH	
MATERIA ORGÁNICA	
CARBONATOS	
ELEMENTOS MAYORES	
ELEMENTOS TRAZA	
ÍNDICE DE ALTERACION QUÍMICA	
<b>7. ANÁLISIS TEXTURAL</b>	<b>71</b>
PARÁMETROS TEXTURALES	
MECANISMOS DE TRANSPORTE	
<b>8. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS</b>	<b>94</b>
INDICE DE PROCEDENCIA	
INDICE DE MADUREZ MINERALÓGICA	
COMPOSICIÓN DE ARCILLAS	
<b>9. CONCLUSIONES</b>	<b>104</b>
<b>10. LITERATURA CITADA</b>	<b>107</b>
<b>11. ANEXOS</b>	<b>112</b>

## INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Localización del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	16
Figura 2	Fisiografía de la Cuenca de Cuitzeo	17
Figura 3	Geología de la Cuenca de Cuitzeo	18
Figura 4	Distribución de la precipitación de la Cuenca de Cuitzeo	19
Figura 5	Distribución de la temperatura de la Cuenca de Cuitzeo	20
Figura 6	Hidrografía de la Cuenca de Cuitzeo	22
Figura 7	Localización del muestreo del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	26
Figura 8	Distribución de fósforo (mg/l) en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	32
Figura 9	Distribución de nitrógeno (mg/l) en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	32
Figura 10	Distribución de silicio en (mg/l) en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	33
Figura 11	Localización geográfica de manantiales analizados que aportan sus aguas al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	34
Figura 12	Comparación de cantidades de fosfatos (mg/l) entre manantiales	35
Figura 13	Comparación de silicio (Si-SiO <sub>2</sub> ) de manantiales (mg/l) en las inmediaciones del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	35
Figura 14	Comparación de N <sub>total</sub> entre los manantiales analizados en las inmediaciones del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	36
Figura 15	Comparación de promedios entre nutrientes del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (mg/l) y nutrientes de los manantiales (mg/l)	37
Figura 16	Resultados de elementos mayores y sulfatos en manantiales que desembocan al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	38
Figura 17	Comparación de promedios de elementos mayores y sulfatos	39
Figura 18	Promedios de elementos traza en agua (ppb) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	40
Figura 19	Comparativo entre elementos traza, en agua vs metales traza en sedimento	41
Figura 20	Batimetría del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	42
Figura 21	Distribución del pH en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	43
Figura 22	Distribución de la temperatura del agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	44
Figura 23	Distribución de la conductividad (mS) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	44
Figura 24	Distribución de la transparencia en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	45
Figura 25	Distribución del pH en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	47
Figura 26	Distribución de materia orgánica (%) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	48
Figura 27	Distribución de carbonatos (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	49
Figura 28	Concentraciones en sedimentos de SiO <sub>2</sub> (%) obtenido por FRX, del Vaso	50
Figura 29	Distribución de las concentraciones de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%), determinadas por FRX del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	50

Figura 30	Distribución de las concentraciones de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%) determinadas por FRX del Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo	52
Figura 31	Concentraciones de $\text{TiO}_2$ (%) determinadas por FRX en el Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo	52
Figura 32	Concentraciones de $\text{CaO}$ (%) determinadas por FRX del Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo	53
Figura 33	Concentraciones de $\text{Na}_2\text{O}$ (%) determinadas por FRX del Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo	55
Figura 34	Concentraciones de $\text{K}_2\text{O}$ (%) determinadas por FRX del Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo	56
Figura 35	Estaciones del análisis geoquímico de sedimentos de arroyos de Cuenca de Cuitzeo, realizadas por el Servicio Geológico Mexicano	57
Figura 36	Comparación entre los promedios de metales en sedimentos de arroyos de la Cuenca de Cuitzeo	58
Figura 37	Distribución de cromo (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	59
Figura 38	Distribución de estroncio (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.	61
Figura 39	Distribución de bario (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	62
Figura 40	Distribución de vanadio (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	63
Figura 41	Distribución de cobalto (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	64
Figura 42	Distribución de Níquel (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	65
Figura 43	Distribución de Cobre (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	66
Figura 44	Distribución de zinc (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	67
Figura 45	Distribución de plomo (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	68
Figura 46	Distribución de los valores del IAQ del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	69
Figura 47	Porcentajes del tamaño promedio gráfico ( $Mz\emptyset$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	72
Figura 48	Distribución del tamaño promedio gráfico ( $Mz\emptyset$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	73
Figura 49	Desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_1\emptyset$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	74
Figura 50	Distribución de la desviación Estándar Gráfica Inclusiva ( $\sigma_1\emptyset$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	75
Figura 51	Grado de Asimetría Gráfica Inclusiva ( $SK_1$ ) en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	78

Figura 52	Distribución del Grado de Asimetría Gráfica Inclusiva ( $SK_I$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	78
Figura 53	Curtosis Gráfica del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	79
Figura 54	Distribución de la Curtosis Gráfica del Vaso Poniente del lago de Cuitzeo	80
Figura 55	Correlación entre curtosis ( $K_G$ ) y simetría ( $SK_I$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	81
Figura 56	Distribución de arenas (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	81
Figura 57	Distribución de Limos (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	82
Figura 58	Distribución de arcillas (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	82
Figura 59	Distribución de lodos (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	83
Figura 60	Comparativo entre los porcentajes de arena original y arena dispersada con ultrasonido del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	84
Figura 61	Comparativo entre los porcentajes de limo original y el limo dispersado con ultrasonido del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	84
Figura 62	Diagrama comparativo entre los porcentajes de arcilla original y la arcilla dispersada con ultrasonido del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	85
Figura 63	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-4	86
Figura 64	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-5	86
Figura 65	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-16	87
Figura 66	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-18	87
Figura 67	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-33	88
Figura 68	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-36	88
Figura 69	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-47	89
Figura 70	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-59	89
Figura 71	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-66	90
Figura 72	Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-43	90
Figura 73	Transporte por tracción del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	91
Figura 74	Transporte por saltación del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	91
Figura 75	Transporte por suspensión del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	92
Figura 76	Mecanismos de transporte en el triángulo propuesto por Lecuanda	93
Figura 77	Mecanismos de transporte en un triángulo modificado de Lecuanda	93
Figura 78	Ubicación de la composición mineralogía de los puntos de muestreo en un diagrama ternario	95
Figura 79	Relación de elementos mayores. $TiO_2$ vs $Fe_2O_3 + MgO$	96
Figura 80	Relación de elementos mayores. $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ vs $Fe_2O_3$	96
Figura 81	Relación de elementos mayores. $Al_2O_3/SiO_2$ vs $Fe_2O_3 + MgO$	97
Figura 82	Relación de elementos mayores. $K_2O/Na_2O$ vs $Fe_2O_3 + MgO$	97
Figura 83	Distribución del índice de madurez mineralógica del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	100
Figura 84	Ubicación de las estaciones en las que se determinaron los tipos de arcillas en el área de estudio	102

## LISTA DE TABLAS

		Página
Tabla 1	Valores límites para la clasificación trófica	31
Tabla 2	Nutrientes y parámetros fisicoquímicos determinados en los manantiales	34
Tabla 3	Correlación de Pearson entre elementos traza, elementos mayores, pH, conductividad y material suspendido del agua	40
Tabla 4	Comparativo de elementos traza en agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo vs límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales	41
Tabla 5	Correlación de Pearson entre la conductividad, el pH y los iones disueltos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	44
Tabla 6	Correlación de Pearson entre el material suspendido y la Transparencia del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	45
Tabla 7	Límites de transparencia	46
Tabla 8	Relación de Pearson entre Los carbonatos, biógenos y arenas de lodo	49
Tabla 9	Correlación de Pearson entre elementos traza, materia orgánica y los resultados petrográficos de la fracción arenosa	60
Tabla 10	Correlación entre $Fe_2O_3$ y MnO con los metales traza, del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	60
Tabla 11	Correlaciones de Pearson de estroncio y bario, con elementos del sedimento del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	63
Tabla 12.	Comparación de valores de elementos traza del sedimento del Vaso Poniente del lago de Cuitzeo vs valores de la normatividad holandesa	68
Tabla 13	Valores de clasificación de sedimentos ( $\sigma_1\emptyset$ )	73
Tabla 14	Valores del grado de simetría ( $SK_1$ )	77
Tabla 15	Curtosis gráfica ( $K_G$ )	79
Tabla 16	Composición modal de la fracción arenosa del sedimento del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	99
Tabla 17	Determinación de arcillas por DRX en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo	102

## RESUMEN

El Lago de Cuitzeo se localiza en el Estado de Michoacán, ocupa el segundo lugar en la República Mexicana por sus dimensiones y pertenece a la provincia fisiográfica del Arco Volcánico Transmexicano, la cual se caracteriza por ser una región con gran actividad volcánica e hidrotermal. Los manantiales que se encuentran dentro de la Cuenca Hidrológica de Cuitzeo aportan cantidades importantes de sílice, sodio, cloruros, sulfatos, fósforo y calcio entre otros. La mezcla de esta agua con la que procede de ríos, las descargas urbanas, industriales y los desechos agrícolas proporcionan al agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo una composición química muy compleja. Los patrones de circulación del agua, el viento y la evaporación, dan lugar a que los valores de los parámetros fisicoquímicos sean más altos en el sector occidental del área de estudio. Los parámetros texturales de los sedimentos reflejan las características del ambiente lacustre. Se determinó una amplia distribución de tamaños de arena, la mayoría de ésta es producto del aglutinamiento de lodos y su posterior cementación con carbonatos y bicarbonatos, produciendo (arenas de lodo). En el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo existe una gran suspensión y disolución de arcilla, ocasionada por el pH mayor que 9 y que está ampliamente distribuido en el área de estudio. Los aportes de tamaños tan variados de las rocas fuente y las mezclas de energía del viento con la de las corrientes de agua dan por resultado una mala clasificación de los sedimentos con una marcada asimetría hacia los finos. Los principales mecanismos de transporte imperantes son la saltación en el sector occidental y la suspensión en el lado oriental del área estudiada. La procedencia de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo sugiere que tectónicamente está asociada al Arco Circunpacífico. Con los resultados de los análisis por fluorescencia de rayos X se obtuvo el índice de alteración química, así como la composición química del sedimento. Se determinó que el  $\text{SiO}_2$  es el más abundante en los sedimentos del área de estudio, seguida por el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ . Respecto a los metales traza el orden de abundancia en los sedimentos es zinc, vanadio, cromo, níquel, cobre y plomo. Los carbonatos en los sedimentos se encuentran principalmente en las conchas de ostrácodos, en el cementante de las arcillas y en las plagioclasas. La materia orgánica en los sedimentos tiene su principal fuente en las descargas de aguas negras. Se encontró que la arcilla dominante es la montmorillonita. La alta conductividad observada la proporcionan principalmente los iones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . La zona de estudio tiene grandes cantidades de material suspendido, lo que le confiere poca transparencia.

Los elementos traza analizados en agua en orden de abundancia fueron: cobre, cromo, plomo y níquel. Las cantidades de estos elementos indican como fuente principal los valores de fondo de la litología de la Cuenca de Cuitzeo. Los manantiales aportan cantidades elevadas de silicio, las fuentes de fósforo y nitrógeno llegan principalmente por las descargas de aguas negras y los altos consumos de fertilizantes en la región. Los elementos mayores encontrados en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo son Na, Cl,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Ca y Mg. Los aportes de estos elementos proceden de los manantiales y de la disolución de minerales de la litología presente en la cuenca. La abundancia de nutrientes y la escasa transparencia del Lago de Cuitzeo, permiten considerarlo como un lago hipertrófico.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua de los lagos es aprovechada principalmente en: potabilización, riego, pesca, ganadería, agricultura y turismo; sin embargo, estos ecosistemas son también receptores del agua contaminada por el uso urbano e industrial, que gradualmente los han convertido en cuerpos de agua insalubres, almacenadoras de elementos contaminantes, desechos fecales, exceso de nutrientes etc., que deterioran su calidad ambiental.

Ante esta perspectiva, es imprescindible desarrollar estrategias para caracterizar el impacto de los daños y proceder a la restauración y preservación de estos cuerpos de agua, así mismo es vital fomentar en la sociedad el conocimiento del funcionamiento y manejo adecuado de los recursos de estos ecosistemas a través de proyectos que permitan su explotación racional.

Los humedales son sistemas muy dinámicos y presentan características diversas, razones por las que es complejo marcar los límites entre ellos y clasificarlos.

Una de las primeras definiciones del concepto de humedal se atribuye a Shaw y Fredine (1956), quienes definieron como humedal: “a las tierras bajas cubiertas por aguas someras, temporales o intermitentes, nombrados de diferentes maneras; por ejemplo, pantanos, marismas, ciénegas, fangales, turberas, esteros”.

Bacón (1966) considera que las condiciones acuáticas y terrestres que caracterizan a los humedales los sitúan entre los ecosistemas más complejos del planeta.

En 1971 la Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza firmó en Ramsar, Irán, el tratado intergubernamental que entró en vigor en 1975, el cual manifiesta que los “humedales son extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de 6 metros” (Carrera y De La Fuente, 2003).

Cowardin, *et al.* (1979) definen a los humedales como “áreas donde la saturación de agua es el factor dominante que determina la naturaleza del desarrollo del suelo y del tipo de comunidades de plantas y animales que viven en él o en su superficie”. Establecen que la característica que todos los humedales comparten es que el suelo o sustrato están al menos periódicamente saturados o cubiertos con agua. Los humedales son áreas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres cuyo nivel freático usualmente está sobre la superficie o cerca de ella, o bien, ésta se encuentra cubierto por aguas someras.

Mitsch y Gosselink (2000) definen a los humedales por la presencia de agua sobre la superficie o en la zona de las raíces vegetales de suelos hidromórficos y por la existencia de vegetación adaptada a condiciones de humedad.

Los humedales interactúan con los acuíferos, ayudan a regular las inundaciones y la erosión, proporcionan agua para fines diversos, definen microclimas, retienen y exportan tanto sedimentos como nutrientes, son sumideros de CO<sub>2</sub> y refugios de biodiversidad. La distribución de humedales es muy amplia; los hay desde los lagos cráteres de volcanes extintos en Alaska, hasta las pozas que forman los atolones arrecifales en el Pacífico Sur, o bien, desde los oasis en los inmensos desiertos hasta los pantanos tropicales de la Amazonia (Cervantes, 1999).

Los humedales son polos de desarrollo económico en el mundo, la fuente principal de ingresos que brindan es la producción pesquera y el turismo ecológico. Humedales como el Kakadu National Park en Australia, Okavango en Botswana y el Pantanal en América del Sur son visitados por miles de turistas, con grandes beneficios para la economía local. En muchos países el aprovechamiento de juncales en los humedales para papel y artículos de cestería es muy importante en su crecimiento económico. La protección de los humedales tiene repercusiones mundiales en la problemática del agua. Se estima que aproximadamente 8.6 millones de km<sup>2</sup> (el 6.4% de la superficie terrestre) están cubiertos por humedales, los hay en todos los continentes excepto en el Antártico, así como en todos los climas; desde los trópicos hasta la tundra. Los porcentajes corresponden a turberas altas (30%), turberas bajas (26%), pantanos (20%) y llanuras aluviales (15%). Los suelos turbosos ocupan en conjunto más de 2.3 millones km<sup>2</sup>. Pese a su importancia, desde 1990 más de la mitad de los humedales del mundo han sido destruidos. La regulación de los sistemas hidrológicos y su desecación en beneficio de la agricultura y del desarrollo urbano han sido las causas principales de la pérdida de más del 50% de los humedales (Lum, 1999).

El altiplano central mexicano se caracteriza por la presencia de depresiones naturales; en algunas de ellas se forman humedales epicontinentales de importancia, como son: Cuitzeo, Zacapu, Pátzcuaro, Chapala, Languillo, Sayula y Yuriria localizados en los Estados de: Michoacán, Jalisco y Guanajuato, estos funcionan como zonas de hibernación de aves residentes y migratorias. El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS) en 2003 realizó conteos de las aves migratorias y residentes en esta zona y determinó que su número ha disminuido a consecuencia de las actividades de deforestación, malas prácticas agrícolas, incremento de las descargas de aguas

negras e industriales, así como la construcción de carreteras que cruzan estos humedales que han alterado su ciclo hidrológico (Carrera y De La Fuente, 2003).

En este proyecto se definirán las características granulométricas del depósito sedimentario del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, como aporte al conocimiento básico de los sedimentos, que permita conocer la distribución de elementos contaminantes y la degradación ocasionada por la sedimentación, para integrar en estudios subsecuentes la interacción entre los sedimentos, los metales y la materia orgánica, que forman parte de este sistema receptor, así como planear las estrategias para remediar las afectaciones a su comunidad biótica, reactivar las actividades pesqueras y optimizar el aprovechamiento del agua en sus diversos usos en beneficio de las poblaciones que interactúan con él.

### **Objetivo general**

El objetivo general de esta tesis es determinar la distribución textural y mineralógica de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, para estimar su potencial como receptor de contaminantes en función de sus características granulométricas y mineralógicas; así como, establecer su procedencia e implicaciones ambientales.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar la composición química del agua y su relación con las fuentes naturales y antrópicas
2. Realizar el análisis textural de los sedimentos superficiales del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (tamaño promedio gráfico, clasificación gráfica inclusiva, simetría y curtosis).
3. Definir la distribución granulométrica de los sedimentos.
4. Analizar la composición mineralógica y química de los sedimentos.
5. Establecer zonas potenciales alojadoras de contaminantes con base en la distribución granulométrica obtenida.

## 2. ANTECEDENTES

Las Ciencias de la Tierra constituyen un área muy importante en los estudios para remediar los sistemas acuáticos continentales contaminados.

Los estudios geológicos de los lagos son indispensables para comprender su funcionamiento. Actualmente en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo no se conocen con precisión la distribución granulométrica, la asociación de ésta con los metales traza y la materia orgánica presente en los sedimentos, ni sus efectos en la calidad ambiental del lago.

Las fuentes principales esperadas del contenido de metales del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo son: el producto de la lixiviación de la litología por la que transitan los arroyos que drenan al lago, el aporte industrial, las aguas domésticas, los desechos agrícolas y las descargas de las granjas.

El Río Grande de Morelia y el Dren Querendaro desembocan en la zona central del lago, por lo que se espera la mayor concentración de metales pesados en esta área, ya que la circulación del agua hacia el vaso poniente ha sido parcialmente incomunicada por la carretera Morelia-Salamanca y la autopista Morelia-Salamanca construida en 2005.

En el vaso poniente descargan las aguas residuales de los poblados de: Huandacareo, Capacho, Dr. Miguel Silva, Jeruco, Copándaro y Chucándiro, así como una serie de pequeñas comunidades que vierten sus desechos al lago, también drenan al lago los residuos agrícolas y los desperdicios de las granjas porcícolas.

Los datos sedimentológicos tales como el análisis de la distribución del tamaño de partículas son fundamentales en el manejo de sitios potencialmente contaminados (Bradley y McConchie, 1993). Los sedimentos terrígenos de grano grueso suelen tener un significado completamente diferente que los de partículas finas. Las diferencias granulométricas y su distribución están definidas por la litología del área fuente, la distancia de transporte y la energía del sitio de depósito. Es común que las fracciones finas se relacionen con el contenido de metales pesados; en los ambientes de depósito, esta asociación es característica de las zonas de baja energía. Existen diversas metodologías para la elaboración de mapas granulométricos en el desarrollo de estudios geoquímicos y ambientales (Carranza-Edwards, 1997).

La distribución granulométrica es útil en la determinación de los 3 mecanismos de transporte: la tracción, la saltación y la suspensión, en este tipo de estudios es conveniente considerar poblaciones granulométricas independientes a través de curvas de probabilidad, cada población se localiza por medio de los puntos de inflexión en la curva, de esta manera en cada representación textural de

sedimentos se debe encontrar el segmento de la recta y el punto de inflexión de cada población, este hecho es fácilmente observable en las curvas logarítmicas de probabilidad que permiten caracterizar la distribución granulométrica para cada tipo de transporte. En general la suspensión por flujo turbulento incluye sedimentos desde 0.1 mm, aunque el tamaño de grano depende de la intensidad de la turbulencia. También se ha definido que en la saltación los granos de 0.75 a 1.0 mm se mueven dentro de los 5 cm del piso y se ha demostrado que los granos de este tamaño son el fin abrupto de una población en saltación. En la tracción se presentan poblaciones de tamaño de grano muy variado. En el transporte por suspensión existe una asociación cerrada entre una alta concentración de material suspendido en el fluido y altos valores de sedimentación, la clasificación de este tipo de poblaciones y sus mezclas con las poblaciones en saltación son ambiguas y ambas reflejan turbulencia. La fuerte mezcla entre las poblaciones de suspensión y saltación está relacionada aparentemente con la alta variabilidad en las condiciones de energía. Sedimentos con una buena clasificación de una población en saltación pueden reflejar retrabajo por el oleaje, la marea, la velocidad de las corrientes de retorno y la lenta sedimentación. Cuando hay alta energía que produzca turbulencia la inflexión es abrupta. En el transporte por tracción, la pendiente refleja la competencia de las corrientes (Visher, 1969).

Lecuanda (1993) considera que definir el significado de la distribución del tamaño de grano en los sedimentos detríticos en función de los procesos dinámicos que la originan es aún uno de los problemas centrales de la sedimentología. Mediante un diagrama triangular en cuyos vértices superior, derecho e izquierdo se representan los porcentajes correspondientes a las poblaciones en suspensión, saltación y tracción, este triángulo es útil para discriminar, comparar y visualizar gráficamente las similitudes o diferencias que ocurren en la granulometría de los ambientes sedimentarios, por lo que son una interpretación cualitativa en la jerarquización de los medios de transporte y permite establecer una relación entre ambientes y tipo de transporte dominante.

Rosales-Hoz *et al.* (2000) resaltan la importancia de los lagos como ecosistemas abiertos porque reflejan las características químicas del agua, la climatología, la fisiografía, el substrato, la vegetación, la actividad urbana e industrial y la contaminación. “Uno de los grandes riesgos de verter metales a los cuerpos naturales de agua es su disponibilidad biológica o toxicidad. Los análisis químicos de sedimentos son utilizados en la determinación de la contaminación antropogénica”.

La importancia de elaborar un mapa granulométrico consiste en definir las áreas de alta energía asociadas con fracciones arenosas y los espacios de baja energía enriquecidos en lodos, para encontrar la asociación de la granulometría con elementos potencialmente contaminantes.

El efecto dañino de los metales traza depende de la concentración, la forma en que se presenten y la exposición a ellos. En los sistemas acuáticos los metales se encuentran como iones, coloides, sólidos en suspensión y sólidos en sedimentos. La concentración de estos iones metálicos es muy dependiente de los procesos biológicos, el potencial redox y el pH, entre otros. Un estudio de este tipo se realizó en el Lago de Chapala, que se localiza en el Arco Volcánico Transmexicano (AVTM), este lago es uno de los sistemas lacustres turbios más estudiados desde 1940, en el se desarrolla actividad pesquera y abastece de agua a la Ciudad de Guadalajara, segunda en importancia demográfica de México. El principal aporte de agua es por el Río Lerma, que se origina en el altiplano del AVTM en el Estado de México. En la Cuenca del Lerma hay gran desarrollo de la industria química, petroquímica, de procesamiento de alimento y granjas de cerdos que aportan material orgánico muy significativo a los sedimentos de este río, esta cuenca tiene un drenaje de 52,500 Km<sup>2</sup>. El Lago de Chapala presenta grandes cantidades de materiales arcillosos, enriquecidos con materia orgánica (1.58 %) y elementos traza (Rosales-Hoz *et al.*, 2000).

El estudio sedimentológico del Lago de Catemaco (Pérez-Rojas *et al.*, 1994) muestra la relevancia de este tipo de estudios, en él se define que las partículas que se depositan en un lago están determinadas por numerosos factores, entre los que destacan: la geografía, la geología, el grado de influencia humana, las características hidrológicas e hidrodinámicas, las entradas alóctonas, la producción autóctona, la tasa de sedimentación y la dinámica del fondo, la interacción de estos factores no sólo determina el tipo y cantidad de sedimentos, sino también las diferencias espacio-temporales en su distribución horizontal y vertical, en su composición físico-química y en el tipo de biota que soportan. El reconocimiento de este campo de la sedimentología implica un trabajo inicial básico que comprende el análisis de la textura y composición de los sedimentos. Se concluye que las variaciones espaciales en la textura de los sedimentos del Lago de Catemaco son controladas por tres factores principales: a) Las diferencias litológicas de la roca madre en distintos segmentos de la costa, b) la distancia de transporte y la pérdida de capacidad de los escurrimientos que penetran al lago y c) el comportamiento hidrodinámico del mismo.

La secuencia lacustre en el actual Lago de Cuitzeo sobreyace a rocas volcánicas desarrolladas en 20 km de ancho y 200 m de profundidad en un sistema de semigraben, el cual incluye la Subcuenca

Charo-Morelia que está desarrollada al sur del actual Lago de Cuitzeo a 1,880 msnm. Esta subcuenca resulta de la actividad de un segmento del sistema de fallas Morelia-Acambay, que causó la inclinación y el hundimiento del bloque (Suter *et al.*, 1992). Los bloques se encuentran basculados hacia el sur y están principalmente constituidos de ignimbritas y andesitas (Israde y Garduño, 1999).

Ferrari (2000) explica que el AVTM es muy complejo y variado en la región sur-occidental de la Placa Norteamericana, como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la Trinchera de Acapulco. En el sector central del AVTM se ubica el campo volcánico Michoacán-Guanajuato constituido de volcanes de composición basáltica y basáltica-andesítica.

Quintero-Legorreta (2002) divide al AVTM en tres segmentos: 1) El oriental, en el que se encuentra el graben de Acambay; 2) El central, donde se localiza la falla Venta de Bravo; 3) El sector occidental, que comprende la zona entre Morelia y los Azufres, que se caracteriza por fallas normales de orientación general E-W pertenecientes al sistema Morelia-Maravatío-Acambay algunas de estas fallas rebasan los 25 km de longitud, la altura promedio de los escarpes es menor que 100 m. Las fallas definen: 1) una depresión central que forma el graben de Cuitzeo, la cual puede ser trazada desde la región oriental del Lago de Cuitzeo hasta la región situada al sur de la Presa Solís y 2) un alto estructural localizado al norte del Lago de Cuitzeo, que corresponde al horst de Santa Ana Amaya que tiene un relieve topográfico de más de 850 m sobre el nivel del Lago de Cuitzeo.

Al sur del lago se observan tres bloques, el primero en la zona de Morelia que conforma el escarpe de falla de la Paloma, el segundo bloque basculado se ubica en la región de Tarimbaro y el tercero en Santa Ana Maya (Israde y Garduño, 1999).

Los sistemas geotérmicos (SG) son el resultado de un flujo anómalo en la corteza terrestre que está asociado a fenómenos de vulcanismo y tectonismo. Un rasgo común de los SG es la presencia y circulación natural de agua caliente o actividad hidrotermal. También se caracterizan por la presencia de depósitos tipo Sinter ricos en sílice y carbonatos, formados por precipitación química de aguas termales mineralizadas (Zárate-del Valle y Simoneit, 2005).

Israde-Alcántara (2001) señala que Cuitzeo es un lago de origen natural que se formó a partir de un antiguo rift que ocasionó la apertura del lago; este rasgo tectónico ha evolucionado desde hace 8 millones de años hasta la actualidad. En el Estado de Michoacán se reconoce la existencia de aproximadamente 500 cuerpos de agua dulce mayores de una hectárea; sin embargo, el

envejecimiento prematuro de los lagos, su extinción, desecación y desertificación se está incrementando.

Israde-Alcántara *et al.* (2002) definen que el Lago de Cuitzeo se encuentra limitado por una serie de semigrabens con dirección NE-SW y E-W, basculados hacia el sur que han desarrollado dos sistemas lacustres que han migrado en el tiempo y en el espacio. Los fechamientos del basamento andesítico y flujos piroclásticos en la cima de los depósitos lacustres al sur del lago, sugieren que el paleolago de Cuitzeo evolucionó en el periodo de 7 a 2 millones de años. En la cuenca tectónica subsidente del Lago de Cuitzeo se han acumulado más de 1,200 m de depósitos aluviales y vulcano-sedimentarios, lo que sugiere una elevada tasa de subsidencia sucesiva al basculamiento plio-pleistoceno. La cuenca del sistema Cuitzeo está envuelta en un intenso fallamiento, algunas de estas fallas controlan la sedimentación lacustre, los depósitos y flujos piroclásticos desde el Mioceno Superior.

Las cuencas de Cuitzeo y Chapala están vinculadas a la tectónica del suroeste de México a partir del Mioceno Medio se caracterizan por intenso volcanismo así como fallamiento transtensivo y normal lo cual ha favorecido el sucesivo entrampamiento de los lagos de ese sector (Bourgois *et al.*, 1988; De Mets y Stein, 1990).

Lafragua *et al.* (2003) realizaron un estudio para conocer el funcionamiento hidráulico en la zona de la carretera Copándaro-La Cinta efectuaron ajustes en los bancos de nivel, calcularon la elevación histórica y actual y definieron una tasa anual aproximada de sedimentación en el Lago de Cuitzeo de 1,296,461 toneladas.

Galindo-Obarrio (2005) realizó un análisis espacial con sensores ópticos multiespectrales de la calidad del agua en el Lago de Cuitzeo y su vínculo con la vegetación y los niveles eutróficos. También efectuó un estudio de flujos de corrientes con el método velocidad-área en las descargas de los ríos Viejo de Morelia, Grande de Morelia y el Dren Querendaro con los siguientes resultados: En el canal del Río Viejo de Morelia la velocidad promedio es de 0.25 m/seg y la descarga 7.4 m<sup>3</sup>/seg. En el canal Grande de Morelia la velocidad promedio fue de 0.92 m/seg y las descargas de 29.1 m<sup>3</sup>/seg. En el Dren Querendaro se tienen dos promedios de velocidad, 0.37 m/seg y 0.65 m/seg y dos para las descargas 3.6 m<sup>3</sup>/seg y 12 m<sup>3</sup>/seg.

Martínez-López (2004) estudio las tendencias de la distribución de aluminio, cobre, cromo, manganeso, níquel, plomo, zinc, pH, conductividad eléctrica y contenido de materia orgánica en 13 núcleos y una muestra superficial del Lago de Cuitzeo. Concluye que el plomo muestreado tiene su

origen en fuentes locales de emisión de contaminantes asociado con motores de combustión interna, a los drenajes urbanos y a los escurrimientos de agua sobre las carreteras. El enriquecimiento con plomo de los sedimentos superficiales es notable solo si se comparan los valores contra segmentos más profundos del mismo sitio, el valor más alto fue de 21.9 mg/kg (peso seco) y el valor mínimo fue de 4.1 mg/kg (peso seco), el zinc está relacionado con la asociación Fe/Mn, lo que sugiere que se está concentrando debido a un proceso de absorción en los hidróxidos de estos metales. Con respecto al contenido de materia orgánica se considera que se encuentra adsorbida en la arcilla. El Ni y el Cu tienen una fuerte interrelación en su acumulación, existe la posibilidad de que su precipitación sea debido a valores altos de pH, que van de 8.4 a 10.7. Hay una tendencia muy débil al enriquecimiento de sedimentos con Cu, Zn y Ni. Martínez-López (2004) considera que el análisis de grupos no mostró asociación entre éstos y el Pb, así que las tasas de emisión de las actividades humanas en los sitios muestreados no han superado las tasas con las que los procesos de salinización e intemperismo enriquecen los metales en estos lugares.

Ávila-Figueroa (1979) menciona que el natrón ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) presente en los lagos, también se encuentra como monohidrato ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), o bien en cristales de sesquicarbonato ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) conocido como trona. La sosa se origina por diversas causas, algunos ejemplos de su formación son los siguientes: 1) la descomposición de las rocas por la acción de los agentes naturales, como es el caso del Lago Lahotan en Nevada (EUA), 2) la acción volcánica y la subsiguiente solución de las cenizas en el agua que da como resultado la salmuera de sosa, este tipo de depósito existe en el lago de Owens California (EUA), 3) las algas se descomponen con el  $\text{CO}_2$  atmosférico para formar carbonatos, depósitos de este tipo ocurren en el lago Natrón en Egipto y 4) existen sales de sodio en forma natural con las siguientes composiciones ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CO}_3\text{Ca} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), en Hungría, Lagunillas Venezuela y en ciertos lagos en el desierto de Nebraska. En el Lago de Cuitzeo los análisis cuantitativos de la sosa natural demuestran que la mayor parte de ésta proviene de los manantiales minerales.

En la regionalización geomorfológica de la Cuenca de Cuitzeo se estudió la erosión de la cuenca para los años 1975 y 2000, se determinó que ésta tiene su mayor incidencia en las subcuencas de Arroyo Colorado, Atécuaro y San Lucas Pío, así como en los municipios de Huarimba y Morelia. También se definió que la cuenca es una unidad hidrológica de baja amplitud de relieve y se desarrolla desde los 1,830 hasta los 3,420 msnm; sin embargo, el 90% de la cuenca se ubica por debajo de los 2,500 msnm. El 90 % de la densidad de la disección es de nula a moderada lo que

tiene implicaciones importantes en los procesos de erosión de los sedimentos por lo que las características morfométricas de la cuenca no favorecen los procesos erosivos y por lo tanto no hay un fuerte aporte de sedimentos hacia las partes bajas de la cuenca y por ende al Lago de Cuitzeo. La erosión se presenta preferentemente sobre depósitos superficiales (41%), ignimbritas (13%), volcanes monogenéticos (10%) y conos andesíticos (9%). Las formas del relieve donde más incide la erosión son las colinas con laderas muy suaves convexas, lomeríos bajos con laderas suaves. En general el 85% de las zonas erosionadas se localiza por debajo de los 2100 msnm (Mendoza-Cantú, 2002).

López-Granados y Mendoza-Cantú (2002) presentan resultados que demuestran que la disminución de la superficie del Vaso del Lago de Cuitzeo está ligada principalmente con una reducción del volumen de agua en los cauces que llegan a este cuerpo acuático debido al incremento en el consumo de agua, tanto para uso urbano como para riego e industrial. Así mismo, existe un incremento de la cobertura vegetal acuática y subacuática que prácticamente ha cerrado la comunicación entre el vaso oriental y el resto del lago.

Silva-Corona y Steinich Birgit (2005) proponen una subdivisión del sistema acuífero del Valle Morelia-Querendaro, que se localiza en la porción noreste del Estado de Michoacán y forma parte de la Cuenca de Cuitzeo. Describe la zona de recarga en los bordes del valle y la zona de interconexión hidráulica entre el acuífero y el lago. Por otro lado se identificaron dos zonas con diferentes tipos de agua, una de ellas en la parte este-noreste y la otra en el oeste-sudoeste, en ambas se tienen manifestaciones claras de hidrotermalismo. La tectónica de la región propicia el movimiento de aguas termales hacia el acuífero, que a su vez resulta en zonas de mezcla de agua con calidades muy contrastantes.

Semperregui (2006) interpretó en el periodo 2000 a 2005 un mosaico de imágenes de reflectancia en el Lago de Cuitzeo para caracterizar los tipos de vegetación, definió tres especies de vegetación:

*Typha diminguis*, *Eichhornia crassipes* y *Potamogeton pectinatus*.

Alfaro *et al.* (2002) determinaron los elementos mayores, traza y  $^{222}\text{Rd}$  en pozos, manantiales, zonas agrícolas y urbanas alrededor del Lago de Cuitzeo. Las concentraciones de  $^{222}\text{Rd}$  oscilan entre 0.88 y 3.66 Bq/L e indican un tránsito rápido entre la zona de recarga y el afloramiento de los manantiales. En la zona del Salitre se encontraron valores altos de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ . En Jerúco los valores significativos son de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y cantidades menores de  $\text{Na}^+$ . En la zona de Cuitzeo sobresalen los valores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$ .

Bayern (2002) considera que los límites químicos en la regulación de la calidad del agua en los lagos son pH de 7.5-9, sulfatos por debajo de 1 mg/l, fosfatos menor que 0.005 mg/l, nitratos 0.02 mg/l, cloruros 5 mg/l, calcio 2 mg/l y magnesio 1 mg/l.

La eutrofización de un lago se produce como consecuencia de su enriquecimiento con fosfatos y nitrógeno que favorecen: el crecimiento de las plantas, desarrollo microbiano, descomposición y escasez de oxígeno, mortandad de peces, liberación de gases corrosivos y abundancia de sustancias tóxicas (Vollenweider, 1989).

Kasper y Zolezzi (2007) realizaron estudios granulométricos y geoquímicos de las dunas del desierto El Vizcaíno en Baja California México, concluyen que los vientos hacia la costa generan sedimentos del tamaño de las arenas finas bien clasificadas, casi simétricas con distribuciones mesocúrticas heredadas de las arenas de playa de la Bahía del Vizcaíno. Las dunas costeras y continentales derivan de fuentes cercanas como las playas y depósitos aluviales. El índice de alteración química, sugiere que el clima seco del área es importante en la preservación de minerales inestables.

Rosales-Hoz *et al.* (2008) estudiaron el impacto temporal de las descargas naturales en los alrededores de la Isla Sacrificios, localizada al sureste del Golfo de México, definieron las características químicas y texturales de los sedimentos, determinaron que el tamaño de las partículas está en función de las condiciones de energía prevalecientes en la zona. El grado de influencia de los sedimentos terrígenos se determinó por el contenido de  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  y  $K_2O$ . Las características sedimentológicas y geoquímicas de los sedimentos varían estacionalmente. La correlación entre  $Al_2O_3$  y  $Na_2O_3$ ,  $P_2O_5$  y  $Fe_2O_3$  y carbón orgánico sugiere que estos compuestos químicos tienen fuentes terrígenas.

Kasper *et al.* (2008) analizaron el contenido de tierras raras de las dunas del Desierto de Altar y de las arenas costeras del noroeste de México. Concluyeron que los bajos contenidos de tierras raras se asocian con distancias bajas de transporte eólico, mientras que los altos contenidos de tierras raras se relacionan con grandes distancias de transporte eólico.

Kasper y Dickinson (2001) estudiaron la composición de playas modernas, dunas y arenas fluviales de las costas del Golfo de México y las costas de Kapiti-Foxton, Nueva Zelanda, determinaron que las arenas del Golfo de México son de cuarzo-feldespáticas a feldespato-líticas. Las arenas de las costas de Kapiti son feldespato-líticas y las arenas de Foxton son lito-feldespáticas.

Kasper *et al.* (2007) estudiaron la procedencia de los sedimentos del desierto de Altar en Sonora México. Las dunas del desierto son ricas en cuarzo proveniente de sedimentos del delta del Río Colorado y líticos procedentes de rocas sedimentarias. Los desiertos de arena están muy influenciados por procedencia sedimentaria y granítica, apoyado en las concentraciones de bario y estroncio de los sedimentos ricos en cuarzo del Río Colorado. Los valores de estroncio están asociados a las rocas sedimentarias y al contenido de minerales pesados. La comparación de los parámetros estudiados muestra que las dunas de arena están controladas por fuentes sedimentarias.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

El Lago de Cuitzeo está catalogado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad como Área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) por ser una zona importante de llegada de aves migratorias procedentes de Estados Unidos de América y Canadá (GPPVEM, 2005a), sin embargo, en él descargan todo tipo de desechos tales como el aporte continuo de nitratos, fosfatos (derivados principalmente de detergentes), los desechos industriales y urbanos, que inhiben la recuperación del ciclo biológico del lago.

El Lago de Cuitzeo recibe entre 500 y 700 toneladas anuales de fósforo, producto seco de la excreción humana (Chacón-Torres, 2006).

La diversidad florística del Lago de Cuitzeo está representada por 40 familias, 70 géneros y 92 especies, esta diversidad está asociada con la amplia extensión del lago y los aportes importantes de los manantiales. Las hidrófitas enraizadas emergentes más abundantes son: la *Typha scirpus* y *Cyperus eleocharis*; de las enraizadas sumergidas, la *Potamogeton pectinatus* es la más prolifera y cubre más de la mitad oriental del lago. La parte occidental-central está más restringida en vegetación, debido al largo periodo de sequía, la excesiva evaporación y la concentración de sales, este factor pone en evidente riesgo el futuro del lago, así como el de la flora y fauna que lo habitan (Rojas-Moreno y Novelo-Retana, 1994).

En el Lago de Cuitzeo ha existido gran interés por los procesos de eutrofización-hipereutrofización que intervienen en el desarrollo de las algas. En 1985 se determinó que las algas verdes constituyeron el grupo con mayor diversidad. Los nutrientes más importantes en el crecimiento del fitoplancton, fueron los nitratos y los fosfatos aportados por los afluentes del lago. En este periodo se determinó alta concentración iónica y materia orgánica, con abundancia de la diatomea *Stephanocyclus meneghinian*. Estas características sugieren que el lago estaba en un proceso de eutrofización (Ortega *et al.*, 2008).

En 1994 se analizaron los efectos de la desecación en el lago. Se encontró que hacia la zona este, donde descargan el Dren Querendaro y el Río Grande de Morelia, habitaron comunidades constituidas principalmente por algas verde-azules y diatomeas en un medio poco profundo y transparente con gran aporte de nutrientes al cuerpo de agua: En los años 1996 y 1997 se determinó que la especie fitoplanctónica más abundante fue *Nitzschia palea*, la cual es resistente a la contaminación orgánica, su abundancia se localizó al ingreso de los afluentes, mientras que *Surirella capronii*, que es característica de aguas salinas, dominó en sitios con alta conductividad.

Se concluye que a fines de los años 70's y principios de los 80's comenzó el proceso de hipertrofia en el vaso oeste del Lago de Cuitzeo, con el enriquecimiento de nutrimentos, circulación de la masa de agua limitada, resuspensión de sólidos, cambios de la salinidad, altas concentraciones y fluctuaciones del oxígeno, así como el deterioro ambiental y la sobreexplotación de sus afluentes, sus especies nativas y floraciones algales, principalmente conformadas por algas azul-verde o diatomeas (Ortega *et al.*, 2008).

El incremento en las demandas de agua en los sectores: urbano, industrial, agrícola y pecuario, han propiciado el abatimiento del nivel del lago (Acosta, 2002).

El Lago de Cuitzeo presenta variaciones en el nivel del agua, la zona occidental tiene fluctuaciones más significativas, sobre todo cuando se trata de periodos de sequía; sin embargo, se debe señalar que nunca se ha secado por completo, esto ha sido comprobado a través de los estudios paleoclimatológicos que se han llevado a cabo en el lago (GPPOVEM, 2005b).

El registro más antiguo que se tiene del nivel del Lago de Cuitzeo data de 1920 y fue de 1,820.15 msnm, la lectura máxima en 2003 estuvo en 1,820.11 msnm y la mínima en 1.818.17 msnm. En 2004, el nivel máximo alcanzó 1.820.35 y en 2005 el nivel máximo llegó a los 1819.98 msnm (Vallejo-Domínguez, 2005).

Se ha recalado mucho sobre las afectaciones que ha ocasionado la construcción de la carretera que seccionó al lago en dos vasos (oriental y occidental). El primer puente calzada que cortó la comunicación natural del Lago de Cuitzeo, se terminó de construir el 4 de febrero de 1882 y fue inaugurado por el presidente municipal Don Miguel Ballesteros y el gobernador del Estado, Don Prudenciano Dorantes (POGCEM, 2005).

Los pobladores que viven en las inmediaciones del lago han manifestado su inconformidad por la contaminación y el deterioro del mismo, los campesinos y pescadores han realizado movilizaciones en protesta por los problemas ambientales originados por las actividades urbanas e industriales que se realizan en la parte media de la cuenca. El carácter de estas movilizaciones ha ido más allá de la conservación ambiental, ya que plantean una cuestión de supervivencia para ellos, pues dependen de las actividades productivas del lago. En la actualidad son 10 las uniones de pescadores en el municipio de Cuitzeo con un total de 388 socios, cantidad que va en aumento. Los principales productos de la pesca son: charal, carpa, chehua, mosco, tepocata, tilapia, y rana. La actividad industrial del Municipio de Cuitzeo, consiste de una fábrica de tejidos y algunos talleres dedicados

a la elaboración y confección de ropa, herrerías, carpinterías, una productora de hielo y una fábrica pequeña de productos cerámicos (POGCEM, 2005).

En 2004 se inició la construcción de la autopista Morelia-Salamanca, misma que se inauguró en diciembre del 2006, aún está por determinarse el impacto que causará esta obra, ya que corta parcialmente la comunicación del vaso oeste con el resto del lago.

Los desechos contaminantes son aportados principalmente por las descargas urbanas e industriales de la ciudad de Morelia y poblaciones aledañas que vierten sus aguas al lago a través del Río Grande de Morelia y el Dren Querendaro, de igual forma se impacta el lago con los residuos agrícolas del distrito de riego Morelia-Querendaro y las actividades ganaderas de la zona (Ávila, 1998).

Cuitzeo se caracteriza por ser un lago extenso (más de 40 km) y somero (profundidad menor que 2 m). La sobreexplotación a que está sometido, ha provocado la disminución de su volumen, que lo hace propenso a una eventual desecación, principalmente en el vaso poniente. Esta reducción de volumen y la contaminación han reducido el número de especies y el potencial pesquero a gran escala, que han propiciado que paulatinamente se pierda la vocación pesquera de la región. (Hernández y Arellano, 2002).

El Lago de Cuitzeo se localiza en la parte septentrional de la subcuenca de Cuitzeo, a 34 km al norte de la ciudad de Morelia, entre los paralelos 19°53' y 20°00' de latitud norte y los meridianos 101°00' y 101°20'' de longitud oeste, con una altitud de 1,840 msnm (Fig. 1).

En México, el Lago de Cuitzeo ocupa el segundo lugar en dimensiones (Chacón-Torres *et al.*, 2002). El área de la Cuenca de Cuitzeo determinada con el programa ILWIS (1998) es de 3,999.6 km<sup>2</sup>. Los municipios que colindan con el son: Huandacareo, Chucándiro, Copándaro, Cuitzeo, Santa Ana Maya, Zinapécuaro, Álvaro Obregón y Acámbaro, sin embargo, hay otros 10 municipios que aunque no limitan con el lago, tienen influencia en él.

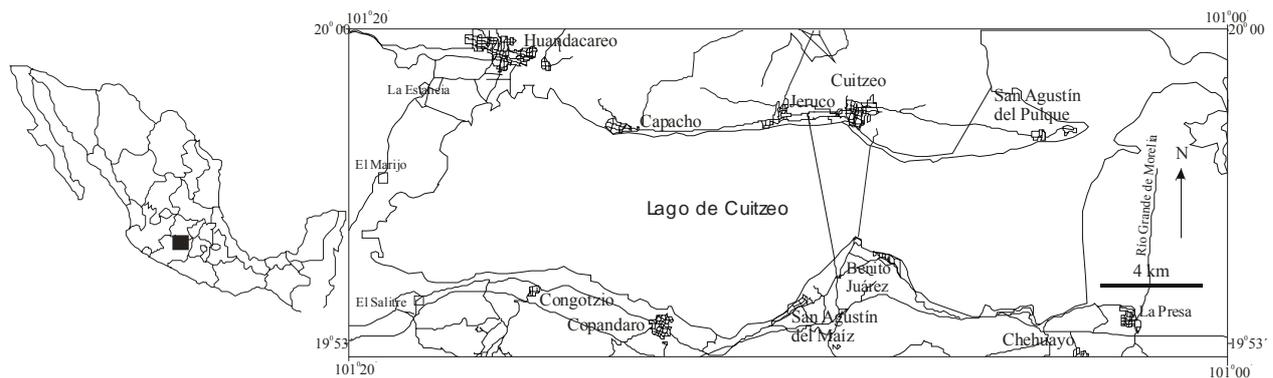


Figura 1. Localización del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Modificado de INEGI, 2005).

La Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza, en la convención de Ramsar, Irán, 1971, definió que los humedales incluyen las áreas de pantanos, zonas palustres y turberas, naturales o artificiales, permanentes o temporales, con aguas estáticas o fluyentes, dulces o salinas, que pueden incluir aguas marinas y que no excedan los 6 metros de profundidad (Carrera y De la Fuente, 2003). Cowardin, *et al.* (1979) consideran que los humedales tienen como factor dominante la saturación del agua, por lo que el suelo periódicamente se encuentra saturado o cubierto de ésta y su nivel freático es próximo a la superficie, característica que determina su desarrollo, así como el tipo de plantas y animales que habitan en él.

Los humedales son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, Cuitzeo es un ecosistema acuático muy dinámico, cuya extensión rebasa los 40 km de largo, es un cuerpo somero ya que su profundidad máxima no rebasa los 2 metros. Su superficie está saturada con agua la mayor parte del año, sostiene una cantidad importante de vegetación hidrofita y es el habitat de aves migratorias y residentes, particularidades que permiten considerarlo como un humedal. La CONABIO (2004) clasifica al Lago de Cuitzeo como hipertrófico.

La Cuenca de Cuitzeo forma parte de las subprovincias de Mil Cumbres, Sierras y Bajíos Michoacanos y Neovolcánica Tarasca (Fig. 2) que a su vez pertenecen a la Provincia Fisiográfica del Arco Volcánico Transmexicano (AVTM), la cual está compuesta por una gran variedad de rocas volcánicas, producto de innumerables y sucesivos episodios volcánicos cuyo origen abarca desde mediados del Terciario (hace 35 millones de años) hasta el presente, así como amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como lo son: los de Pátzcuaro y Cuitzeo entre otros (INEGI, 2006).

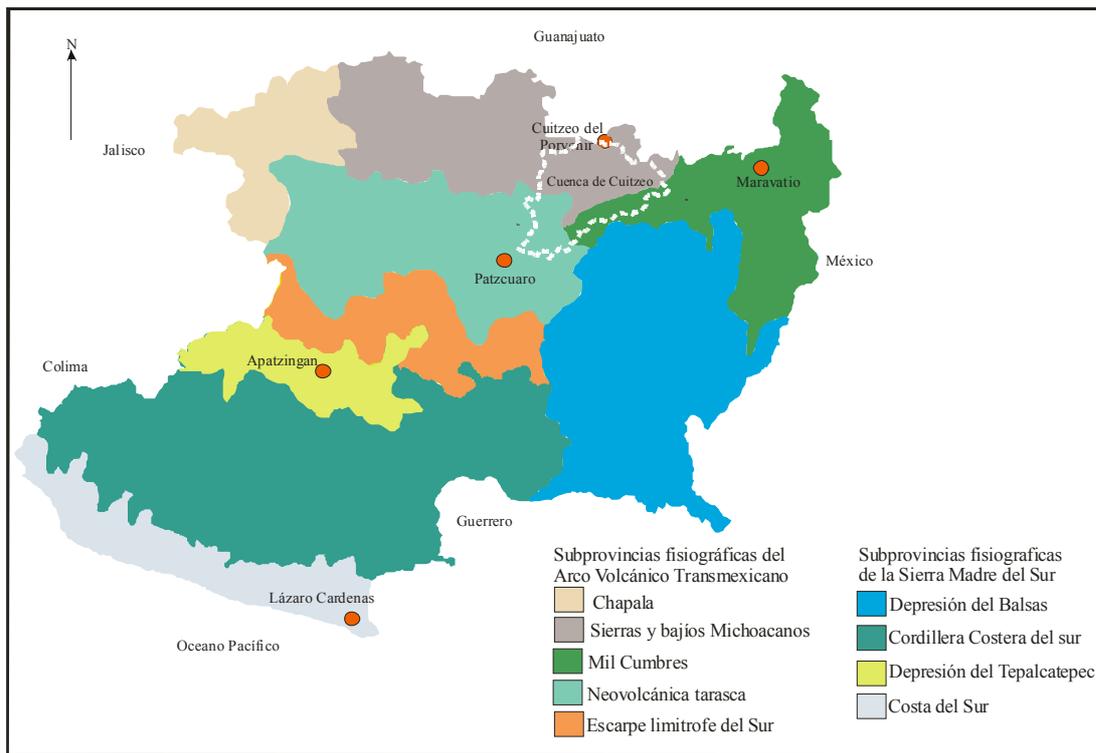


Figura 2. Fisiografía de la Cuenca de Cuitzeo (Modificado de INEGI, 2006).

La litología de la Cuenca de Cuitzeo está conformada por una gran variedad de rocas volcánicas, incluyendo: riolitas, andesitas, basaltos, tobas, ignimbritas, depósitos de ceniza, productos piroclásticos, dacitas, aluviones y lahares (Fig. 3). El sector norte de la Cuenca de Cuitzeo lo constituyen una serie de conos cineríticos, aluviones del Holoceno y productos piroclásticos, andesitas y basaltos del Pleistoceno, basaltos y riolitas del Plioceno, riolitas e ignimbritas del Mioceno Superior, así como andesitas y basaltos del Mioceno Medio (SGM, 1999). Al este de la Cuenca de Cuitzeo se aprecian: lahares y aluviones del Holoceno (0.01 Ma), basaltos del Pleistoceno (1.68-.01 Ma), ignimbritas riolíticas, andesitas y basaltos del Plioceno (2.8-1.7 Ma.); así como andesitas y dacitas (5.1 Ma). Hacia el límite sur-sureste de la cuenca se encuentra la Sierra de Mil Cumbres orientada este-oeste, sobresalen los cerros La Leonera, El Águila y Cerro las Ventanas. En esta zona se presentan depósitos aluviales y basaltos (Holoceno), andesitas del Cuaternario y dacitas del Plioceno (5.1 Ma), dacitas del Mioceno Superior (6 Ma), andesitas y tobas andesíticas del Mioceno (16.2-14.1 Ma), basaltos del Pleistoceno, tobas riolíticas del Mioceno (18-16 Ma aprox.), tobas riolíticas e ignimbritas del Plioceno (2.8-1.7 Ma), andesitas del Mioceno (7-8 Ma).

En la región oeste afloran basaltos del Holoceno y del Pleistoceno, ignimbritas y riolitas del Plioceno (2.8-1 Ma), andesitas y basaltos del Mioceno (6.5-5.6 Ma) (SGM 1998).

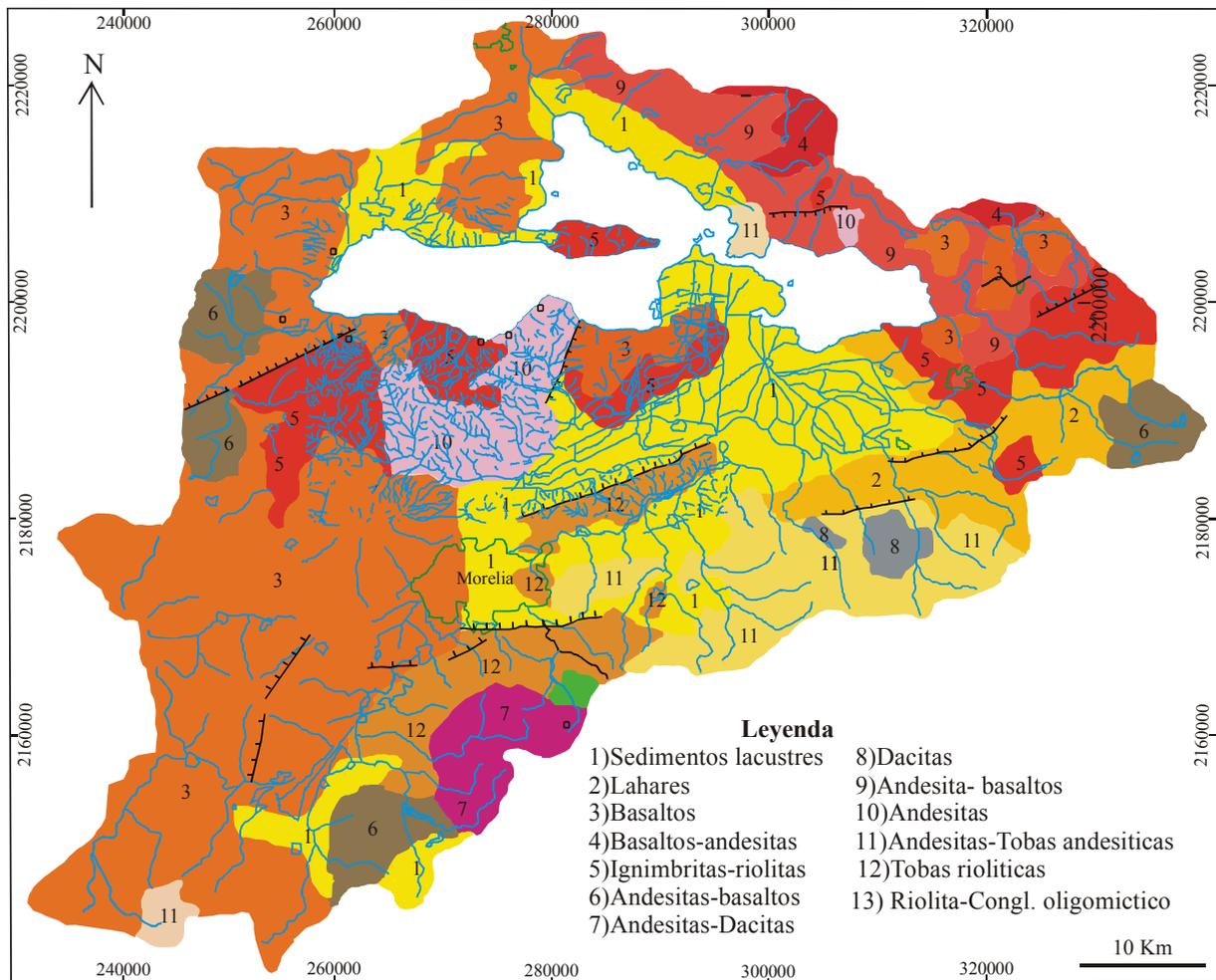


Figura 3. Geología de la Cuenca de Cuitzeo (Modificado de SGM, 1998 y 1999).

El Clima en la Cuenca de Cuitzeo es subhúmedo (714-925 mm anuales) (Fig. 4). La temperatura media registrada es de 17.7 °, la media mensual más alta es de 21° C, registrada en el mes de mayo y la mínima en enero con 14.2° C (Fig. 5) (INEGI 1985). Dentro de la cuenca se identifican tres subtipos de climas de acuerdo con la humedad. El primero corresponde al  $C(w_2)(w)$ , templado subhúmedo, con lluvias en verano, temperaturas medias anuales de 12.5°C a 17.4° C y precipitación de 790 a 1343 mm anuales, que se presenta en la parte sur de la cuenca (Velásquez-Durán, 1998). Hacia la parte central de la cuenca se pierde humedad (791-959 mm anuales), este clima es el intermedio en humedad  $C(w_1)(w)$  y tiene temperaturas que van de 14.8°C a 18°C y se manifiesta

tanto en la Ciudad de Morelia, como en la rivera suroeste del lago. En la parte centro-norte de la cuenca ocurren menos lluvias (649 a 730 mm) y queda clasificado como C<sub>(wo)</sub>(w) (Pompa-I, 1995).

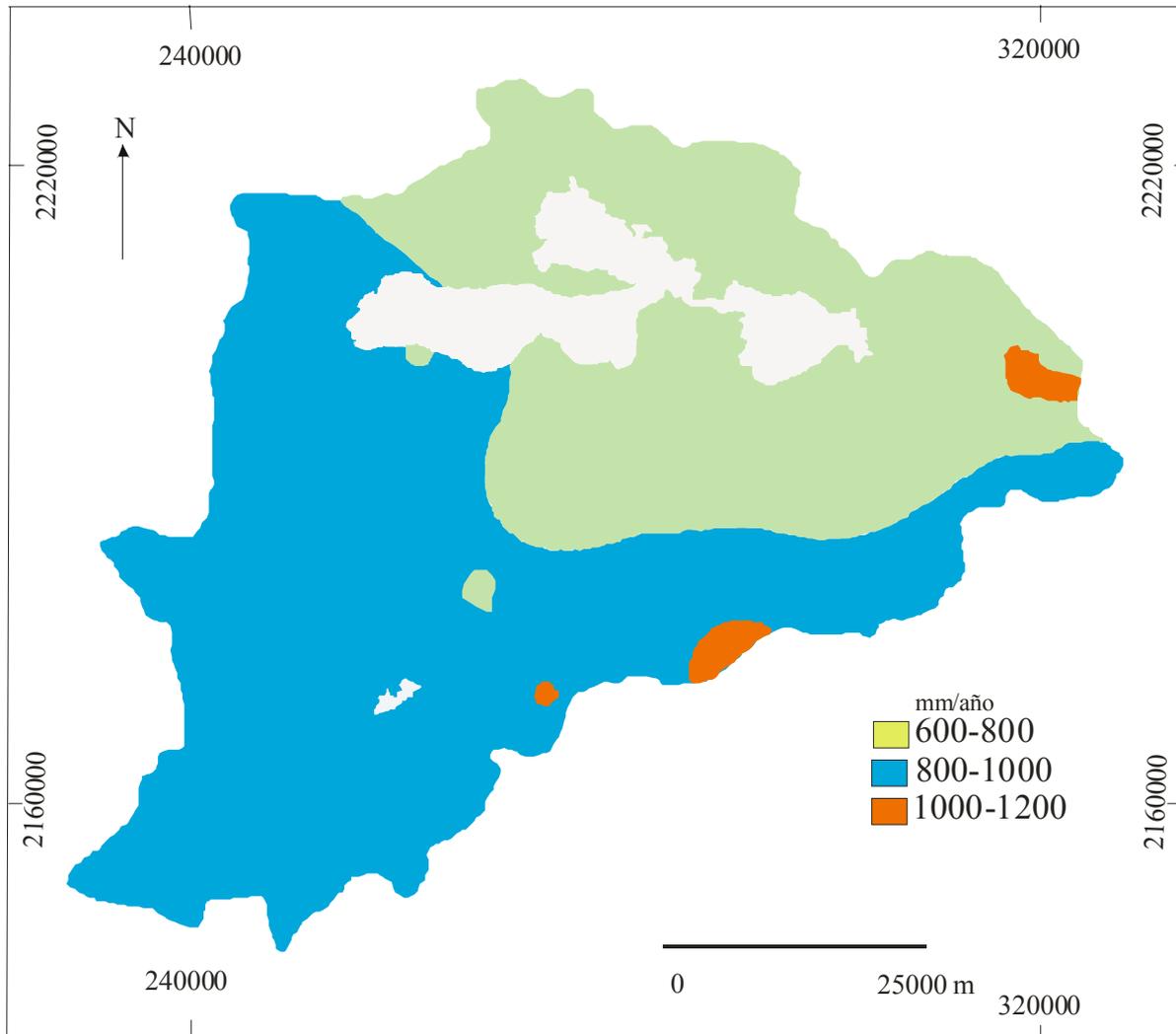


Figura 4. Distribución de la precipitación en la Cuenca de Cuitzeo (Modificado de Mendoza-Cantú, 2002).

Velásquez-Durán (1998) cataloga a Cuitzeo como un lago tropical extenso (420 km<sup>2</sup>) muy somero, por lo que el nivel de agua fluctúa fácilmente por el desequilibrio evaporación-precipitación, este efecto se ha manifestado a lo largo de la historia del lago; por ejemplo, desde 1941 suceden periodos recurrentes de desecación parcial, hasta en un 70% de su superficie original.

El Lago de Cuitzeo pertenece a la región hidrológica #12 Lerma-Chapala-Santiago y a la subcuenca #12G que comprende los lagos de Pátzcuaro, Cuitzeo y Yuriria (INEGI, 1985).

La Subcuenca de Cuitzeo tiene forma oval oblonga con pendientes moderadas, su respuesta a las lluvias no es inmediata, tiene una sensibilidad regular a las lluvias intensas y su tiempo de concentración es bajo, por lo que el agua de lluvia tarda en llegar al lago (Pompa, 1995).

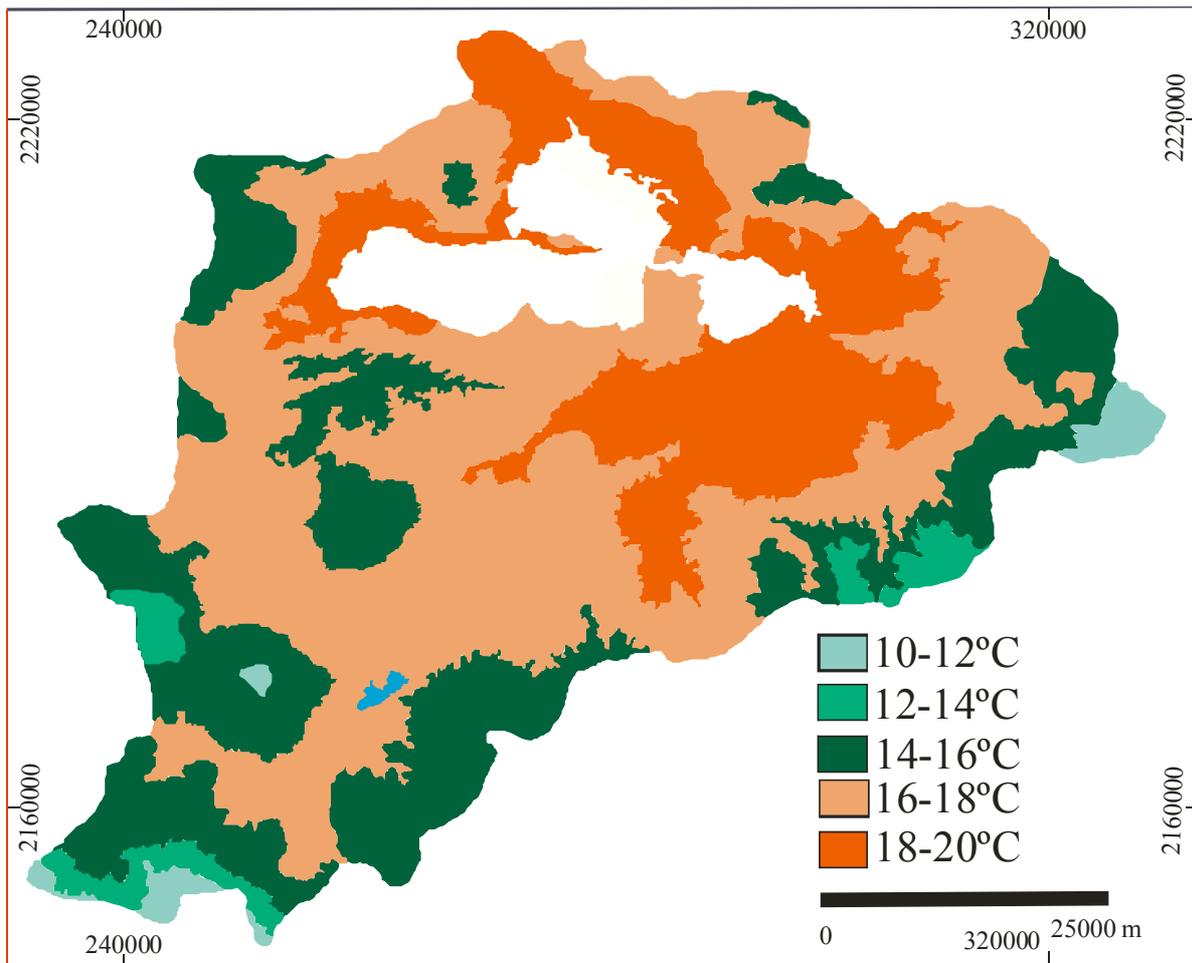


Figura 5. Distribución de la temperatura en la Cuenca de Cuitzeo (Modificado de Mendoza-Cantú, 2002).

Arias (1996), divide a la cuenca de Cuitzeo en cuatro subcuencas de acuerdo a su conformación hidrológica:

- 1) Subcuenca de Cointzio, en ella se encuentra la presa del mismo nombre, construida en los años treinta con una capacidad de  $85 \text{ Mm}^3$ , también se observan manantiales, entre los que destacan los de La Mintzita, 2) Subcuenca de la Presa de Malpaís que recibe las aguas del Río Querendaro, el uso

principal de ésta es para riego, 3) Subcuenca del Río Zinapécuaro, recibe los aportes de 20 manantiales, que finalmente se mezclan con las descargas urbanas del municipio de Zinapécuaro, 4) Subcuenca del Lago de Cuitzeo, ésta recibe la mayor cantidad de descargas urbanas, la Ciudad de Morelia queda dentro de ella.

La Cuenca de Cuitzeo es de naturaleza endorreica (Ceballos-Corona *et al.*, 1994) característica que fue modificada con la construcción del Dren la Cinta, que trasvasa agua hacia la Laguna de Yuriria. El drenaje dominante en la Cuenca de Cuitzeo es de tipo dendrítico, el cual refleja las características homogéneas de la secuencia volcánica (Fig. 6).

Los cerros que limitan el parteaguas de la Cuenca de Cuitzeo son siguientes : El Frijol, San Andrés, Viejo, El Pejo, El Varal, Pico Azul, Rancho Grande, Las Ventanas, Lagunillas, Volcán EL Melón, Zirate, Gavilán, Prieto y Ancho (Velásquez-Durán, 1998).

Los ríos principales que drenan al Lago son: El Río Grande de Morelia y el Río Querendaro, así como pequeños manantiales e innumerables arroyos propios de la cuenca (Pompa, 1995).

El Río Grande de Morelia nace en las inmediaciones de la Subcuenca de Pátzcuaro, corre de sureste a noreste, sus principales formadores son los ríos Tirillo y Tiripetío, alimenta a la Presa de Cointzio. También recibe los flujos del Río Chiquito, Río San Marcos de Chiquimitío y los manantiales de La Mintzita, Los Itzicuaros y La Quemada, finalmente desemboca en la margen sur del Lago de Cuitzeo. El Río Querendaro, es el segundo afluente en importancia, nace en el Cerro de la Guajolota (Sierra de Oztumatlán), en su curso pasa por la ciudad de que lleva su nombre, recibe las aguas de los ríos Frío y Caliente, drena a la Presa de Malpaís, cerca de su desembocadura se le integra el Río Zinapécuaro.

Otros aportes importantes de agua al lago se realizan a través de los manantiales ubicados en las islas de Tecuela y Las Palmas; así como las aguas termales de la Isla de Los Puercos, los poblados de Araró, Huandacareo, Copándaro y San Juan Tararamero entre otros (Ceballos-Corona *et al.*, 1994).

El Río Chiquito, es un afluente importante del Río Morelia, tiene drenaje de tipo dendrítico con ramificaciones de tercer orden, recorre las poblaciones de San Miguel del Monte, Jesús del Monte, San José de las Torres, Jaripeo, Las Mesas y Lázaro Cárdenas entre otros. Algunos cerros conspicuos son: Loma larga, De En medio, Mesa el Pinito, Coronilla Grande, Coronilla Chica y El Gigante. En la parte alta los arroyos corren por riolitas, andesitas, dacitas y tobas riolíticas.



Silo y Copándaro. Es de mencionarse que el agua de los manantiales del lugar llamado las Albercas que es un sitio turístico de aguas termales, es canalizada hacia el Lago de Cuitzeo.

En el extremo poniente del Lago de Cuitzeo aflora el Cerro las Ventanas que es un aparato volcánico de composición basáltica, los arroyos formados en esta área muestra un patrón de drenaje radial y abastecen al Lago de Cuitzeo, en la región de los poblados del Marijo, San Cristóbal y La Estancia. En San Cristóbal existe un manantial que abastece de agua a la población de Huandacareo. Hacia el lado NW del lago se observan basaltos, andesitas, riolitas e ignimbritas, sobre todas estas rocas circulan arroyos de tipo dendrítico de tercer y cuarto orden, el más importante de ellos es el Arroyo Blanco (Fig. 6) que se inicia a una altitud cercana a los 2500 metros en la Mesa de los Lirios, cuyo cauce entra al lago por el flanco este de la población de Huandacareo y es canalizado a la altura de la zona arqueológica La Nopalera. Otro arroyo importante nace en el Cerro Manuna a más de 2400 msnm, al cual se le incorporan otros dos arroyos, uno de ellos nace en el Cerro La Loma y el otro en la parte alta del Cerro el Pico. En San José Cuaro se unen varios arroyos que descienden del Cerro Manuna por las barrancas de Los Coyotes y los Tejocotes, su recorrido es por andesitas y basáltos, con drenaje radial, arroyos con características similares cruzan los poblados de Capacho y Dr. Miguel Silva, finalmente desembocan al Lago de Cuitzeo. En la margen sur del vaso oriente del lago, llegan arroyos de poca longitud que bajan del Cerro Palo Dulce y desembocan al lago por el pueblo de San Juan Tarameo, estos arroyos corren por ignimbritas y riolitas. Hacia el oriente de esta zona, existen escorrentías incipientes que son paralelas entre si y corren en sentido noreste, su longitud máxima es de 2 km y su entrada al lago es por el poblado de Chehuayito. Hacia el este, sobre la línea de costa del lago se llega a una planicie donde derivan varios canales del Río Grande de Morelia cuya entrada al lago es en sentido norte. Toda esta zona que incluye los poblados de La Presa, Felipe Ángeles, Mariano Escobedo, Ruiz Cortines y Belisario Domínguez, estos constituyen los aportes más importantes de agua al lago, ya que ahí desembocan todas las canalizaciones de los Ríos Grandes de Morelia y Queréndaro. Otro sector donde drenan arroyos pequeños al lago, es el que comprende La Mesa del Palillo, El Cerro San Martín y Puerto el Caracol, estas geoformas son de composición basáltica e ignimbrítica, los cauces principales de estos arroyos son casi paralelos, las corrientes secundarias de ellos son perpendiculares y dendríticas, la población más grande de esta zona es San Bartolo de Coro. En el sector este del lago sobresalen los cerros: Las Doncellas, La Colorada, La Zorra, Loma el Comalio,

con drenaje dendrítico de segundo orden, estas corrientes se localizan en las inmediaciones de la población de Araró (Fig. 6).

Al noreste del lago se observan depósitos aluviales del Cuaternario algunos cerros de composición basáltica-andesítica y tobas andesíticas que conforman los cerros de San Andrés, Ancho, Gordo, La Cruz y Grande entre otros, la red de drenaje es de forma dendrítica de tercer orden.

Hacia el norte se ubican las poblaciones de Santa Ana Amaya, La Lobera y San Rafael del Carrizal, con una franja de depósitos lacustres, sobre la que hay una serie de canales para riego, que finalmente drenan al Lago de Cuitzeo, estos depósitos limitan al norte con cerros de composición andesítica, del Neógeno y Cuaternario, por el intenso fracturamiento de estas rocas existe mucha permeabilidad y por lo tanto la red de drenaje es muy incipiente. El agua infiltrada en esta zona aflora en los depósitos lacustres.

En el límite septentrional del lago se localiza la salida del Dren La Cinta cuya función es trasvasar agua hacia la Laguna de Yuriria, la compuerta de este dren tiene una altitud de 1820 msnm, cuando el nivel del lago llega a esta altitud, el agua pasa por encima de la compuerta y fluye hacia la Laguna de Yuriria, esto indica que el nivel máximo posible del lago es la cota 1820 msnm.

Mendoza Cantú (2002) estipula que el impacto de la red de drenaje de la Cuenca de Cuitzeo en la erosión actúa principalmente en orden de magnitud: en los depósitos lacustres y aluviales, las ignimbritas, los volcanes monogenéticos y los conos andesíticos. Los municipios más afectados por la erosión son: Huarimba, Morelia, Indarapeo, Tarímbaro, Zinapécuaro, Lagunillas y Acuitzio del Canje. La ubicación geográfica de estos municipios indica que las zonas más erosionadas se encuentran al sur de la cuenca.

El relieve en la Cuenca de Cuitzeo se caracteriza por la presencia de planicies, piedemontes, colinas, lomeríos y sierras. Las planicies cubren 727 Km<sup>2</sup> (18.6% de la cuenca) se localizan en altitudes inferiores a los 1900 msnm, sus pendientes no rebasan los 3°, están constituidas principalmente por depósitos aluviales. Los piedemontes cubren 449 km<sup>2</sup> (1.2 %) observándose entre los 1900 y 2500 msnm, con pendientes inferiores a los 10°, formados por conos de lava y cenizas. Las colinas abarcan 943 km<sup>2</sup> (23.6 %) ocurren por debajo de los 2300 msnm, sus pendientes oscilan desde los 3 hasta los 20°, se originan a partir de volcanes monogenéticos.

Los lomeríos bajos tienen una superficie de 393 km<sup>2</sup> (9.7%) se aprecian desde los 1900 hasta los 2700 msnm, con pendientes que van de los 6 a los 20°, se desarrollan sobre conos de ceniza y lava andesíticos, derrames basálticos, domos dacíticos y riolitas. Los lomeríos altos tienen 899 km<sup>2</sup> de

área (22.5%) se localizan entre los 2100 y 2500 msnm, con un rango de pendientes desde los 6 hasta los 20°, se forman sobre cenizas, ignimbritas, conos andesíticos, derrames andesíticos y basálticos. Las sierras tienen una superficie de 286 km<sup>2</sup> (7.2%), su altitud es de los 2100 a los 2900 msnm y sus pendientes rebasan los 30°, están formadas por derrames de basaltos, andesitas y conos de cenizas (Mendoza-Cantú, 2002).

Los suelos presentes en la Cuenca de Cuitzeo son predominantemente vertisoles y feozems, presentan un fuerte intercambio iónico. Los feosems se encuentran en las llanuras y sierras con pendientes suaves intercalados con los vertisoles. En los tulares se desarrollan los solonchaks. En las partes altas de la cuenca son comunes los luvisoles, acrisoles y andosoles (Martínez-López, 2004).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### Actividades de campo

Las actividades de campo se presentan a continuación:

- a) Recorrido preliminar del Lago de Cuitzeo para conocer sus características generales, accesos y entorno social.
- b) Preparación del itinerario de muestreo.
- c) Realización de la toma de 78 muestras de sedimentos, de las cuales 31 se hicieron en la zona litoral y 47 del interior del lago. Se colectaron 47 muestras de agua superficial del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 7). El muestreo se efectuó en el mes de agosto de 2006.
- d).- Lectura de parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y conductividad) con instrumentos de medición marca Hanna.
- e).- La batimetría del lago se elaboró con una regla graduada cada cm, la transparencia con un disco de secchi, adaptado en la base de la regla diseñada y construida *ex profeso*.
- f).- Localización de las estaciones con un GPS (Global Position System) Garmin eTrex series en coordenadas UTM (Anexo I).
- g).-Registro de datos del muestreo en hojas de control.

Los sedimentos de litoral se tomaron con una cuchara de plástico, los del interior del lago se colectaron con una draga Van Veen con capacidad de 5 litros, en ambos casos se colectaron los 2 cms superficiales de sedimentos y se guardaron en bolsas de plástico debidamente etiquetadas.

Las muestras de agua superficial se tomaron con envases de plástico de un litro.

El total de muestras se refrigeraron a 4°C.

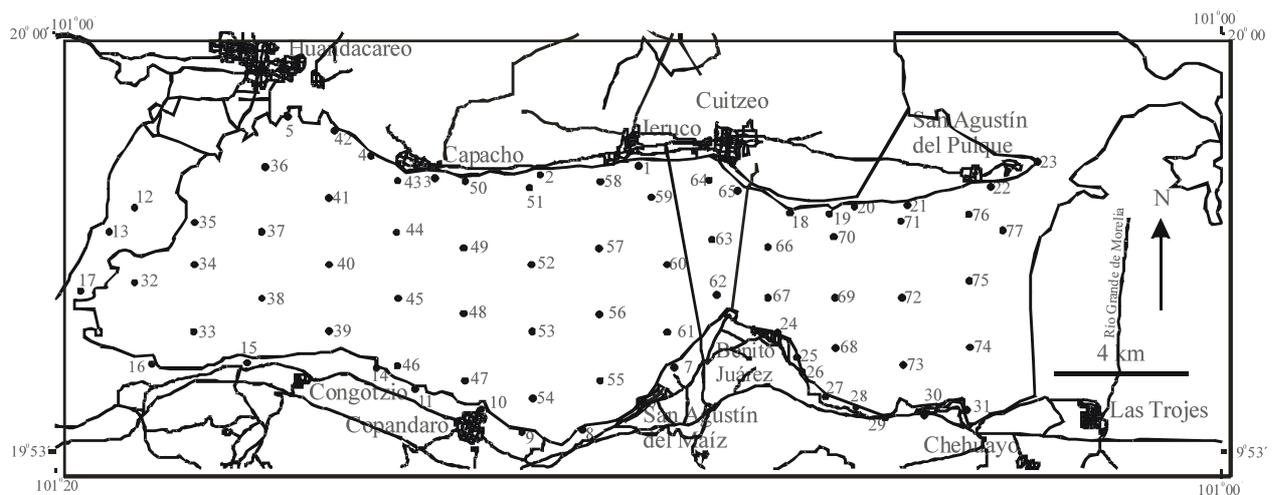


Figura 7. Localización del muestreo del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

## **Actividades de laboratorio**

Los análisis químicos de agua por metales traza, elementos mayores, así como los de carbonatos y materia orgánica en sedimento se realizaron en el Laboratorio de Química Acuática del ICMYL. Los controles de calidad químicos utilizados fueron: blancos, muestras para precisión y estándares certificados.

La valoración de nutrientes se hizo en el Laboratorio de Biogeoquímica Acuática del ICMYL.

Los análisis de elementos mayores y traza en sedimentos por Fluorescencia de Rayos X se elaboraron en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM. La determinación de arcillas por Difracción de Rayos X se realizó en el Instituto de Geología y la clasificación de ostrácodos en el ICMYL.

Los estudios de los parámetros texturales de los sedimentos se efectuaron en el laboratorio de Sedimentología del ICMYL, con un analizador de partículas por difracción de un haz de luz láser Coulter Modelo LS230, este equipo mide el tamaño de las partículas por difracción del haz de luz láser, que es usada como analizador y todas las partículas que lo atraviesan difractan la luz. La capacidad de lectura de tamaño de partícula va de 0.4  $\mu\text{m}$  (arcillas) hasta 2000  $\mu\text{m}$  (arena).

Para la determinación del pH de los sedimentos en el laboratorio, se molieron y se les agregó agua destilada, se dejaron reposar dos horas y se tomaron las lecturas con el medidor de pH.

## **Análisis químico del agua**

### Determinación de metales traza por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (cobre, níquel, cromo, plomo).

#### a) Fundamento.

En la espectrofotometría por flama se requiere que todos los elementos contenidos en la muestra se conviertan en átomos en estado iónico por medio de un procedimiento de nebulización y atomización. En el caso del horno de grafito se realizan tres etapas (secado, calcinado y atomizado). Esta técnica implica la absorción de luz de una longitud de onda específica para cada átomo, el cual debe encontrarse en estado de mínima energía (Skoog-Douglas, 2003).

Un espectrofotómetro de absorción atómica realiza el análisis de la concentración de metales en rangos que van desde ppb hasta niveles porcentuales.

### Determinación de sodio y calcio por absorción atómica con flama.

La preparación de muestras y la metodología de análisis es similar a la seguida en la determinación de metales traza (Varian, 1989). El equipo empleado es VARIAN Spectra A10 PLUS.

### Determinación de cloruros

#### a) Fundamento.

La valoración argentométrica de los cloruros se basa en la formación de cromato de plata color rojizo, que ocurre cuando se adiciona a la muestra iones de cromato como indicador precipitante de iones de plata,  $2\text{Ag}^+ + \text{CrO}_4 \longrightarrow \text{Ag}_2\text{CrO}_4$ .

Con una solución valorada de nitrato de plata se determina la cantidad necesaria para precipitar todos los iones cloruros como cloruros de plata e inmediatamente se observa el cromato de plata de color rojizo, en ese momento se anota el volumen gastado de nitrato de plata y se calcula la concentración de cloruros en el agua (Cox *et al.*, 1967).

### Determinación de sulfatos

#### a) Fundamento

La técnica consiste en precipitar iones sulfato en medio ácido con cloruro de bario para formar cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. Se mide la absorbancia de la suspensión de sulfato de bario por medio de un espectrofotómetro y se determina su concentración interpolando el resultado con una curva de regresión lineal (Clesceri *et al.*, 1989). El equipo requerido es un espectrofotómetro HASD DR/2010, un agitador magnético y un cronómetro

### Determinación de nutrientes

#### a) Fundamento.

La valoración de nitrógeno amoniacal se basó en la técnica descrita por Solórzano (1969), los nitratos se obtuvieron mediante su reducción a nitritos, empleando el método modificado de Treguer y Le Corre (1974) usando como agente reductor una columna empacada con limaduras de cadmio recubiertas con cobre acondicionado con cloruro de amonio. El análisis de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) se realizó de acuerdo con la descripción de Strickland y Pearson (1972), fundamentado en la formación del ácido 12-molibdofosfórico y su posterior reducción a fosfomolibdeno azul con ácido ascórbico. La determinación de silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) se efectuó mediante la metodología propuesta por Brewer y Riley

(1966) y Koroleff's (1971) que se apoya en la conversión del ácido silico a ácido B-silicomolibdico y su reducción a molibdeno azul con un reductor como el ácido ascórbico (estos fundamentos los proporcionó el Laboratorio de Biogeoquímica Acuática del ICMYL).

El equipo utilizado es un autoanalizador de flujo segmentado Skalar San Plus Sistem, que cuenta con canales para la determinación simultánea de  $\text{NO}^{3-}$ ,  $\text{NO}^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SiO}_2$ .

### **Análisis de elementos mayores por fluorescencia de rayos X.**

La espectrografía de rayos X son muy utilizados para la determinación cualitativa y cuantitativa de todos los elementos con números atómicos superiores al del sodio y es útil para determinar tanto elementos mayores como elementos traza (Skoog, 2003).

### **Determinación de materia orgánica en sedimentos.**

#### a) Fundamento

El método utilizado es el propuesto por Walkey (1934), que consiste en el calentamiento exotérmico y oxidación de la materia orgánica de los sedimentos con dicromato de potasio  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , 1N y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado, el exceso de dicromato de potasio es titulado con  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ , 0.5 N.

#### b) Estandarización

Para estandarizar el método, se evalúa la exactitud y precisión con dextrosa  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ .

Para la exactitud, se pesaron 10 mg de dextrosa 10 veces y se siguió la misma metodología que para las muestras. En el cálculo se considera el valor teórico reportado de 39.99% de carbón orgánico para 10 mg (Rosales-Hoz, 1980).

### **Determinación del contenido de carbonatos en sedimentos**

#### a) Fundamento

La determinación del carbonato de calcio en sedimentos se efectuó con titulación por retroceso este procedimiento consiste en agregar a la muestra un cierto volumen en exceso de ácido clorhídrico de concentración conocida y el ácido que no reacciona con los carbonatos se titula con hidróxido de sodio (Flashka, 1975).

Al restar el volumen de ácido que no reacciona de la cantidad total, se obtiene la cantidad de ácido que fue consumido por los carbonatos existentes en la muestra de sedimentos.

#### b) Estandarización.

La precisión y exactitud se determinó pesando 10 veces 0.2 gr de carbonato de calcio previamente secados a 110 °C durante una hora, con el mismo procedimiento que para las muestras.

## 5. FISICOQUÍMICA DEL AGUA

### Química del agua

#### Nutrientes

Los análisis de nutrientes en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se realizaron para los elementos siguientes: fósforo, nitrógeno y silicio, estos estudios se efectuaron en todas las estaciones de muestreo, así como en un grupo representativo de manantiales que drenan al lago.

#### Fósforo (P)

Este elemento es uno de los principales nutrientes limitantes, sin embargo, su aporte en exceso por abonos y detergentes propician que pierda este efecto y sea fuertemente consumido por los organismos, condiciones que aceleran los procesos de eutrofización, estimulando el crecimiento del fitoplancton y la vegetación acuática. Por estas razones el fósforo es considerado un indicador del grado de eutrofización en los lagos (Tabla 1).

Tabla1. Valores límites según la OCDE, para la clasificación trófica (Tomada de Olmos, 2000)

Estado trófico	Media anual P (mg/l)
Ultraoligotrófico	<.0.004
Oligotrófico	< 0.01
Mesotrófico	0.01-0.035
Eutrófico	0.035-0.1
Hipertrófico	>0.1

En el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo el promedio de fósforo en forma de fosfatos fue de 4.26 mg/l, el máximo se obtuvo en el lado oeste de la carretera (9.5 mg/l) los porcentajes disminuyen significativamente hacia la parte oriental de la zona de estudio, el mínimo fue de 0.2 mg/l (Fig.8). El marcado contraste de valores entre estas dos áreas puede deberse al intenso uso agrícola y desechos fecales intensos en el lado occidental, así como a la circulación este-oeste y la evaporación que concentran los fosfatos fuertemente en el sector occidental del área de estudio. De acuerdo con el contenido de fósforo el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se puede clasificar como hipertrófico.

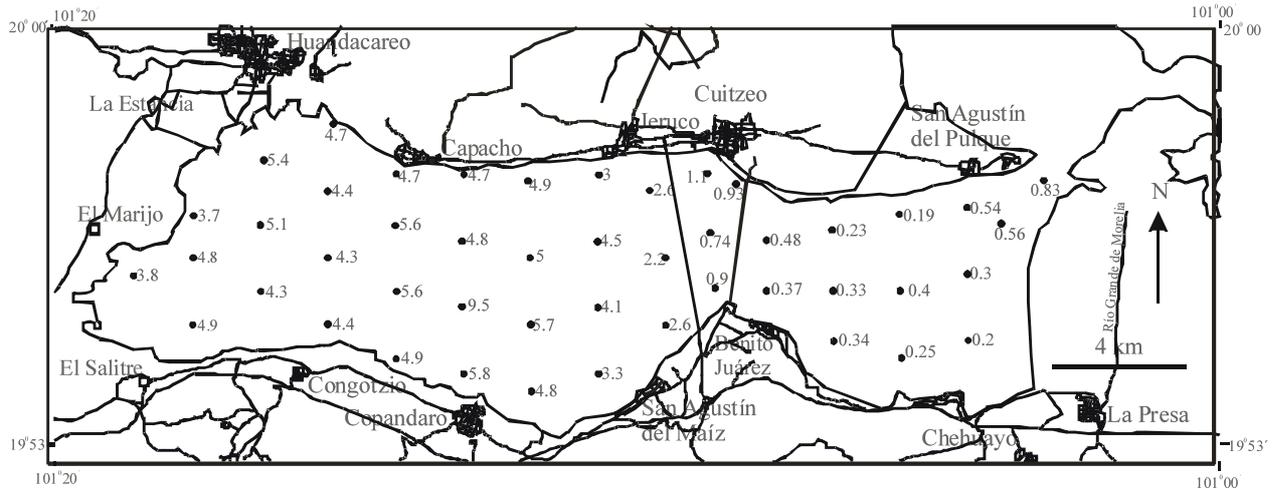


Figura 8. Distribución de fósforo (mg/l) en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Nitrógeno (N)

Los resultados de N obtenidos son la suma de N en forma de  $\text{NH}_4$  (amonio) +  $\text{NO}_2$  (nitrito) +  $\text{NO}_3$  (nitratos) (Fig. 9). El ion más abundante es el  $\text{NH}_4$  (0.18 mg/l en promedio), el  $\text{NO}_3$  (0.08 mg/l) y el  $\text{NO}_2$  (0.01 mg/l).

La urea  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  (sulfato de amonio) ha sido muy utilizada como fertilizante en las zonas agrícolas que circundan toda la margen litoral del área de estudio, la urea se hidroliza fácilmente en amonio constituyendo una fuente importante al agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, la otra fuente substancial de nitrógeno proviene de las descargas de aguas negras.

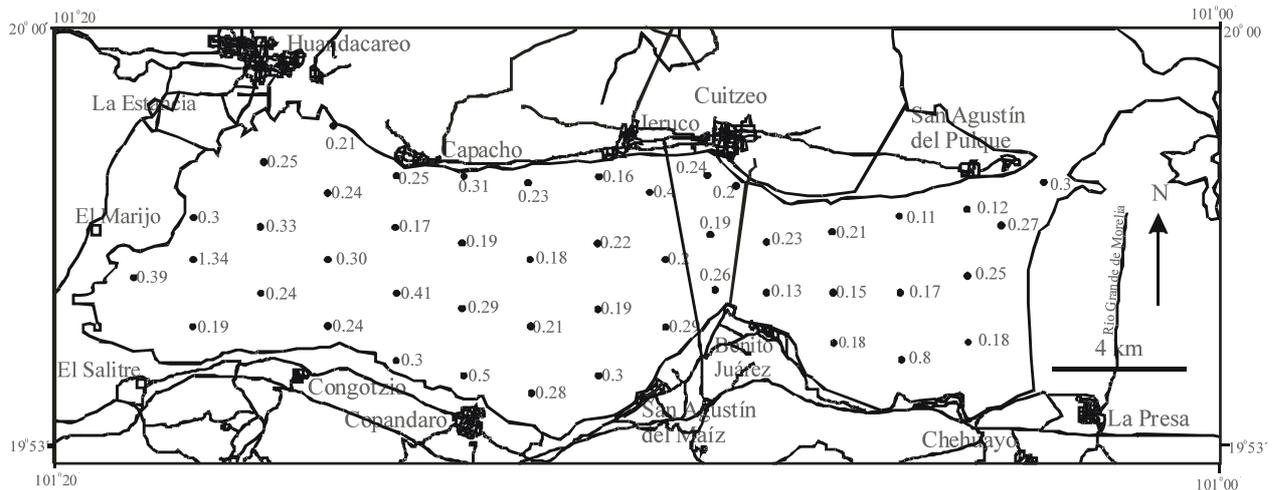


Figura 9. Distribución de nitrógeno (mg/l) del agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Silicio (Si)

En la Cuenca de Cuitzeo existen muchas rocas de composición ácida que llegan al lago a través de los arroyos. Las condiciones de pH en el Lago de Cuitzeo contribuyen a disolver el  $\text{SiO}_2$ . De igual manera el agua que llega a través de los manantiales al lago contiene silicio en solución, el cual muestra una distribución muy homogénea (Fig. 10), el promedio encontrado fue de 33.1 mg/l.

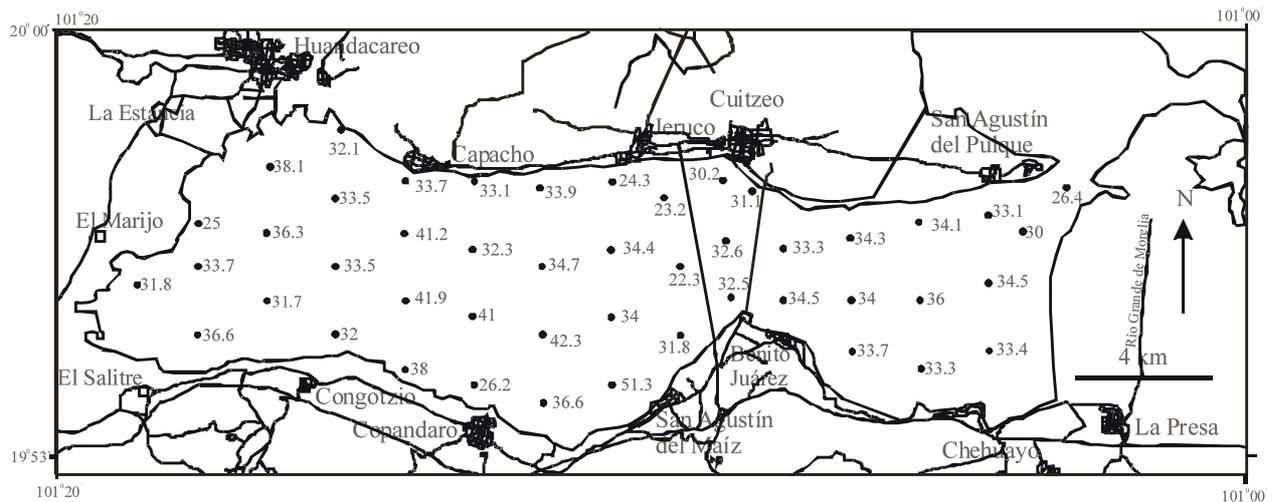


Figura 10. Distribución de silicio (mg/l) del agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Nutrientes en manantiales.

Los manantiales son una fuente importante de agua al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, para conocer sus contenidos y aportes de nutrientes al vaso, se analizaron 6 muestras representativas de ellos (Fig. 11).

Las variaciones de valores en los nutrientes indican diversos orígenes del agua analizada en los manantiales, estas diferentes calidades de agua se mezclan en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Tabla 2).

Tabla 2. Nutrientes y Parámetros fisicoquímicos determinados en los manantiales.

Muestra	P-PO <sub>4</sub> (mg/l)	Si-SiO <sub>2</sub> (mg/l)	N <sub>Total</sub> (mg/l)	Temperatura °C	pH	Conductividad (mS)
CM-1	0.54	63.24	2.08	20.00	7.80	0.14
CM-2	0.24	63.10	0.33	36.50	8.12	0.47
CM-3	0.21	68.61	0.10	39.80	8.13	1.00
CM-4	0.22	70.67	0.32	33.50	8.50	0.25
CM-6	0.21	69.60	0.60	36.00	8.20	0.30
CM-7	0.29	70.64	0.21	87.00	8.70	0.50

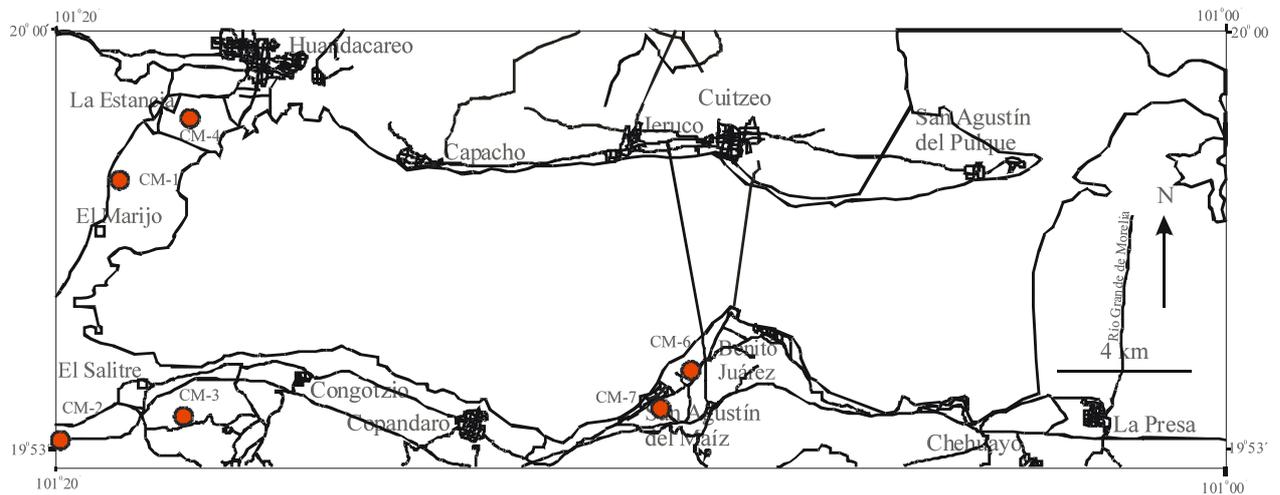


Figura 11. Localización geográfica de manantiales analizados que aportan sus aguas al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

El manantial localizado al poniente del área de estudio (CM-1) es el que más aporta fosfatos al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 12).

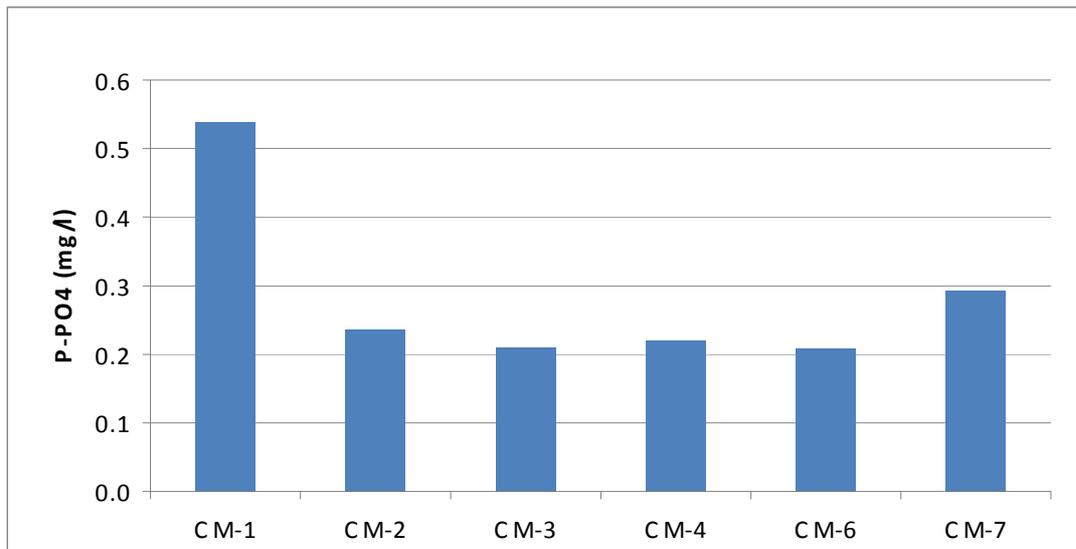


Figura 12. Comparación de cantidades de fosfatos (mg/l) entre manantiales.

Los manantiales que contribuyen con la mayor cantidad de Si-SiO<sub>2</sub>, corresponden con las muestras CM-4 y CM-7 (Fig.13) ubicadas en las inmediaciones de los poblados de Huandacareo y San Agustín del Maíz respectivamente. Estos aportes son notorios en el interior del lago ya que en los sitios cercanos a estos manantiales el Si es más elevado.

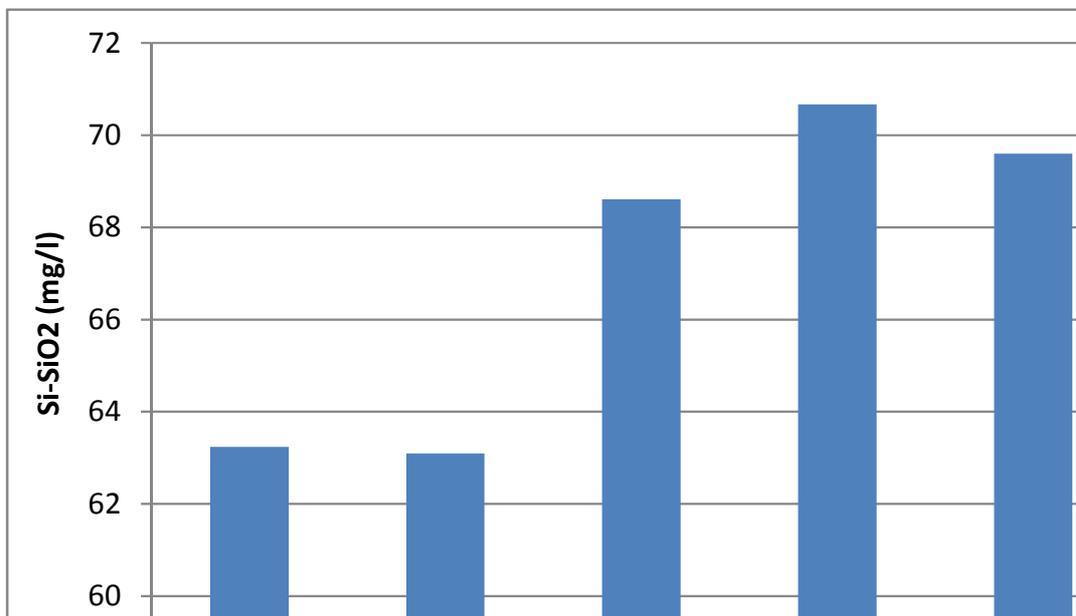


Figura 13. Comparación de silicio (Si-SiO<sub>2</sub>) en manantiales (mg/l) en las inmediaciones del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

El manantial CM-1 presentó los valores más altos de  $N_{total}$ , en la zona de descarga de este manantial al lago se observan las cantidades más elevadas dentro del mismo (Fig. 14).

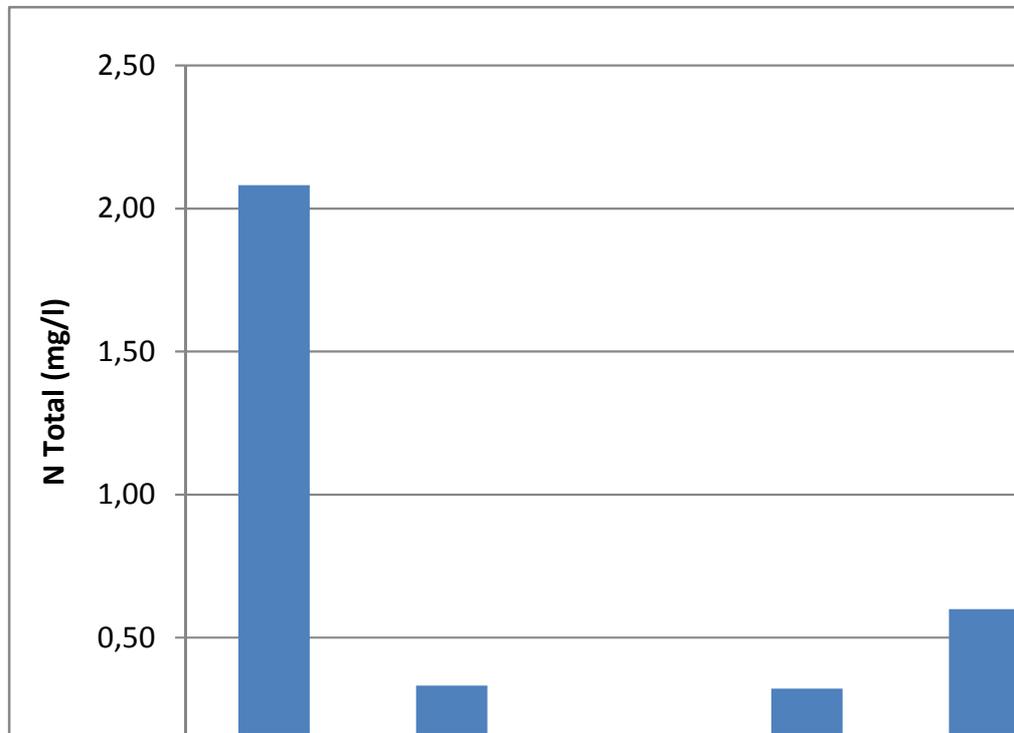


Figura 14. Comparación de  $N_{total}$  entre los manantiales analizados en las inmediaciones del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

El fósforo aportado por los manantiales es menor que el promedio del lago, por lo que se considera que el aporte antrópico es muy significativo. El silicio que llega al lago por los manantiales es mayor que el existente en el mismo, esto sugiere que la contribución mayor de este elemento es a través de los manantiales y que las mezclas de agua hacen que disminuya su contenido. El nitrógeno que entra a través de los manantiales es superior al encontrado en el lago, también existen entradas de este elemento por el uso de fertilizantes y por las descargas de aguas negras, esto conduce a pensar en un alto consumo de nitrógeno por los organismos (Fig. 15).

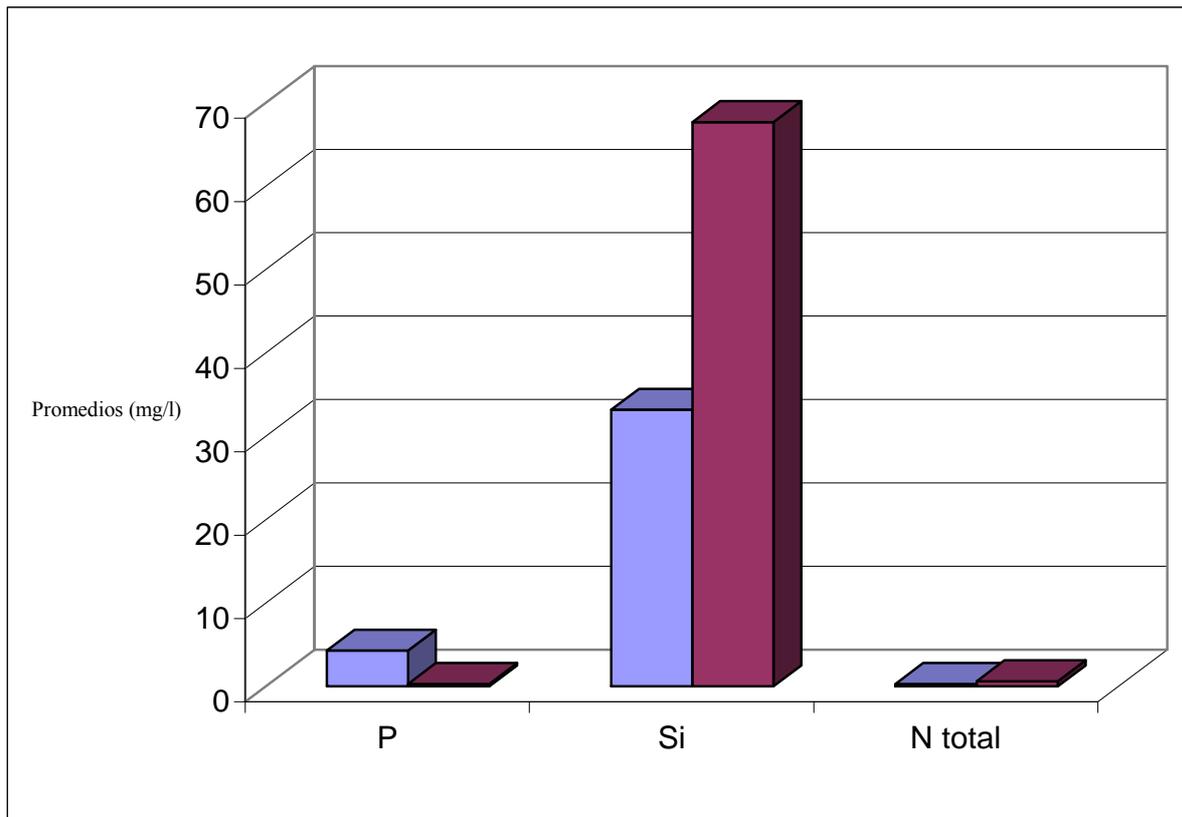


Figura 15. ■ Promedio de nutrientes en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (mg/l). ■ Promedio de nutrientes en los manantiales (mg/l).

### Elementos mayores y sulfatos en manantiales

En su recorrido las aguas termales de los manantiales solubilizan elementos de los minerales. Los elementos más abundantes en los análisis de estos cuerpos de agua, son los cloruros y el sodio (Fig. 16) esto indica la fuerte actividad hidrotermal que actúa sobre la litología de la Cuenca de Cuitzeo. Por la abundancia relativa de los elementos, se infiere que la acción hidrotermal actúa con más intensidad a las rocas de composición riolítica.

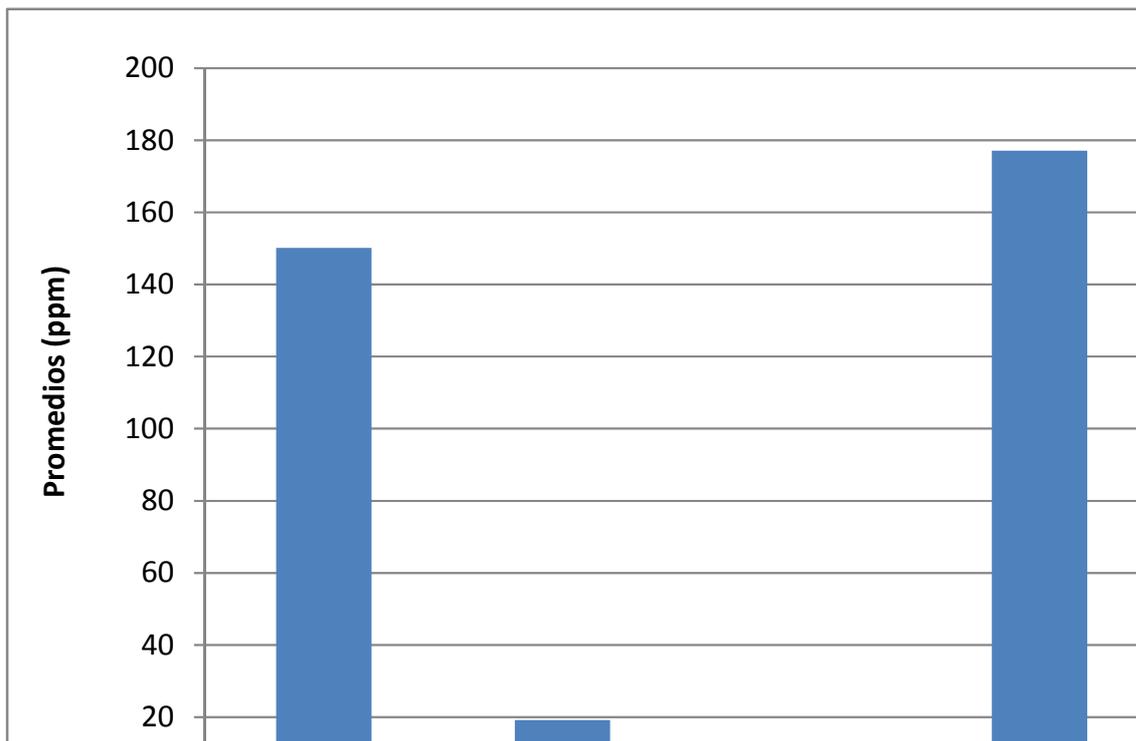


Figura 16. Resultados de elementos mayores y sulfatos en los manantiales que desembocan al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Los valores altos de sodio y cloro rebasan las 200 ppm y corresponden a las muestras CM-3, CM-6 y CM-7, localizadas en el litoral sur del área de estudio, los demás elementos analizados no alcanzan las 100 ppm.

Los valores de sodio son mayores en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 17); sin embargo, los manantiales son una fuente muy importante de este elemento, ya que la alta evaporación ha incrementado sustancialmente la concentración de sodio en este cuerpo de agua.

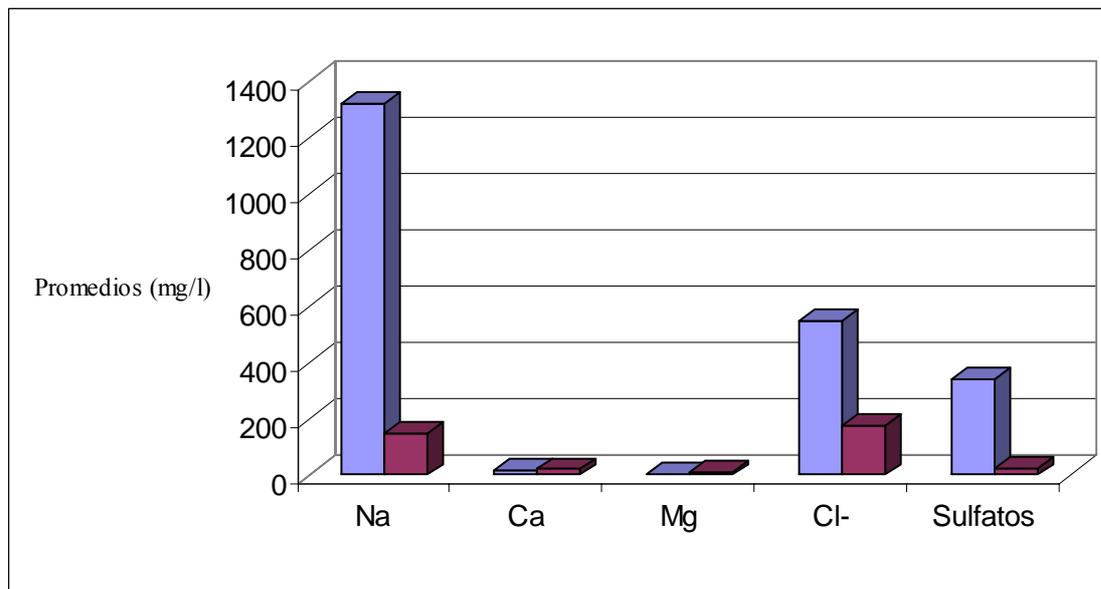


Figura 17. Promedios de elementos mayores y sulfatos: ■ En el Lago. ■ En los manantiales

### Elementos traza en agua.

El elemento traza más abundante fue el cobre y el que presentó niveles de concentración más bajos fue el níquel (Fig. 18). Los valores máximos para los elementos analizados en ppb son: Cu = 59.55 (estación 57); Ni = 14.15 (estación 73); Cr = 190.22 (estación 54); Pb = 17.31 (estación 45). Las cantidades mínimas en ppb son: Cu = 1.63 (estación 78); Ni = 0 (estación 32); Cr = 0.49 (estación 76); Pb = 0 (estación 64).

El cobre tiende a absorberse en el material suspendido, sin embargo este no es el caso, ya que entre el cobre y el material suspendido no existe correlación positiva alguna.

El cobre, níquel, cromo y plomo, se encuentran en el agua en menor cantidad que en los sedimentos del lago y los arroyos de la Cuenca de Cuitzeo (Fig. 19), lo que refleja que en las condiciones fisicoquímicas presentes en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, la movilidad y la solubilidad de estos elementos traza son bajas.

El cobre solo tiene correlación en el agua con el plomo, ambos elementos son comunes en rocas ácidas (Tabla 3).

Tabla 3. Correlación de Pearson entre metales traza, elementos mayores, pH, conductividad y material suspendido en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

	pH	Material Suspendido	Conductividad	Cu	Ni	Cr	Pb	SO <sub>4</sub>	Mg	Cl-	Ca	Na
pH	1.00	-0.07	<b>0.65</b>	0.17	-0.09	0.10	<b>0.50</b>	<b>-0.34</b>	<b>-0.82</b>	<b>-0.73</b>	<b>-0.72</b>	<b>-0.74</b>
Material suspendido		1.00	0.11	-0.06	0.09	0.01	-0.04	-0.20	-0.07	-0.14	-0.13	-0.10
Conductividad			1.00	0.01	-0.03	0.09	0.22	<b>-0.41</b>	<b>-0.77</b>	<b>-0.88</b>	<b>-0.86</b>	<b>-0.86</b>
Cu				1.00	0.01	-0.03	0.28	0.00	0.03	0.06	0.05	0.03
Ni					1.00	-0.02	-0.17	0.10	0.09	0.07	0.04	0.06
Cr						1.00	0.09	-0.04	-0.10	-0.07	-0.20	-0.07
Plomo							1.00	-0.12	<b>-0.41</b>	<b>-0.34</b>	<b>-0.36</b>	<b>-0.32</b>
SO <sub>4</sub>								1.00	<b>0.43</b>	<b>0.45</b>	<b>0.44</b>	<b>0.46</b>
Mg									1.00	<b>0.89</b>	<b>0.88</b>	<b>0.90</b>
Cl-										1.00	<b>0.95</b>	<b>0.92</b>
Ca											1.00	<b>0.93</b>
Na												1.00

N=47, con certeza mayor que 95% : 0.294

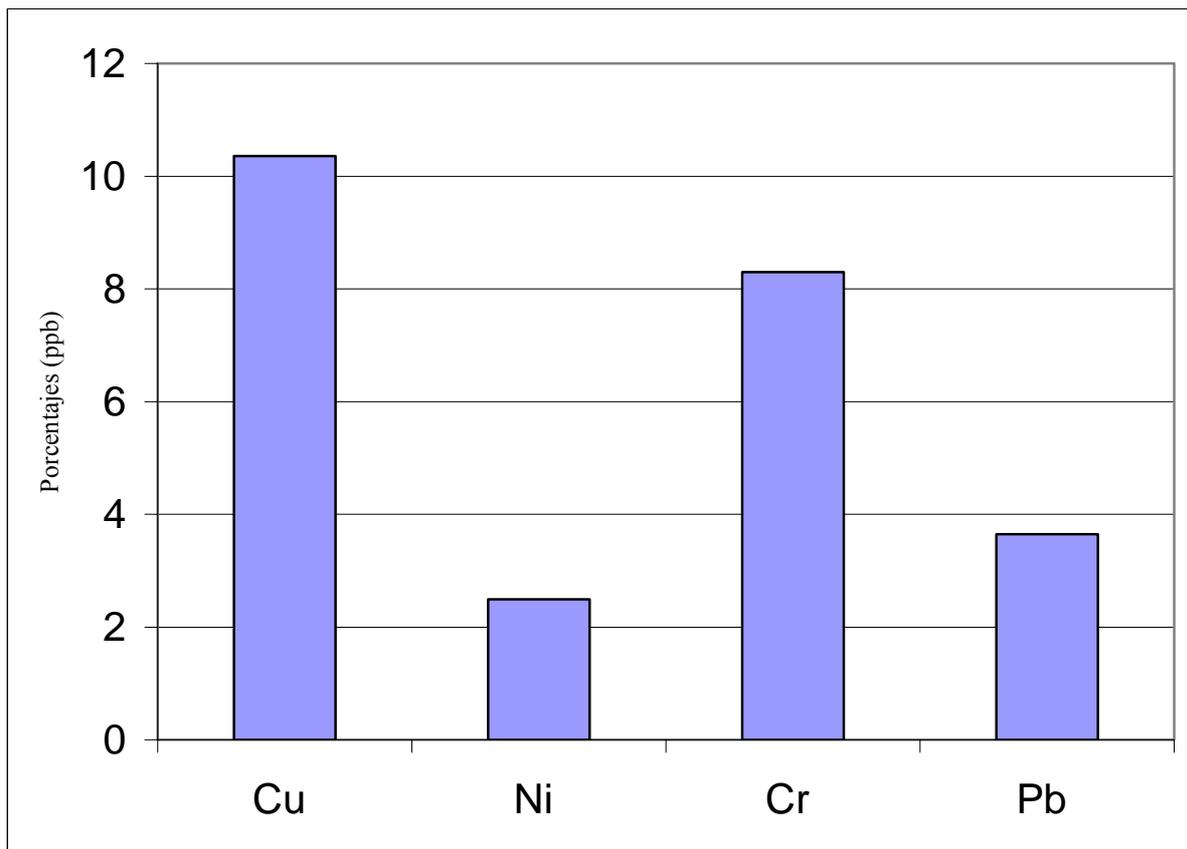


Figura 18. Promedios de elementos traza (ppb) en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

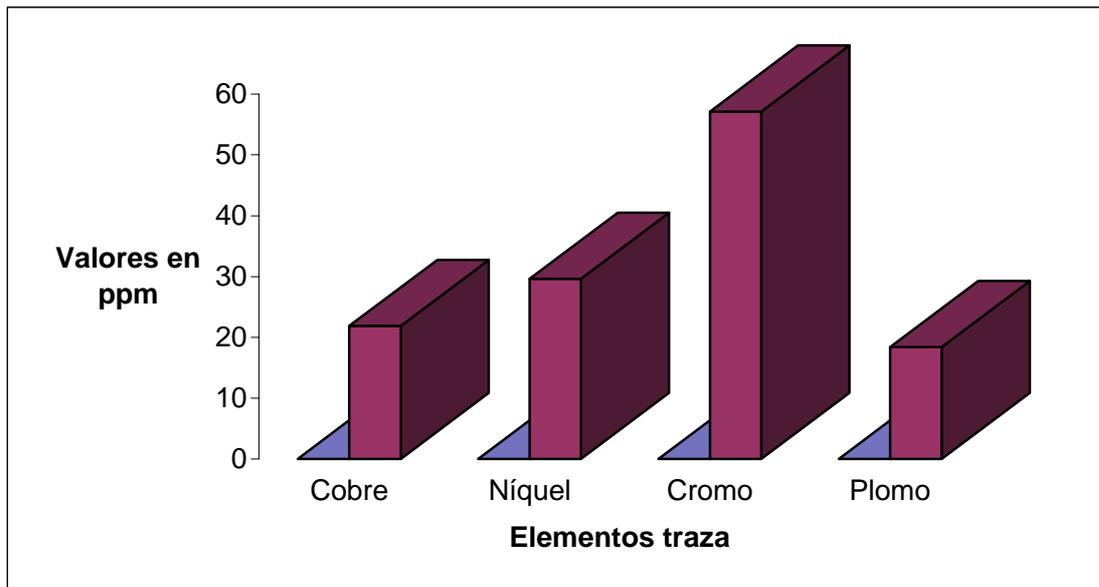


Figura 19. Comparativo entre elementos traza en agua ■ vs metales traza en sedimentos ■.

La tabla 4 compara los valores de elementos traza en agua vs los límites máximos permisibles, los valores indican que dichos elementos aún se encuentran por debajo de los permitidos

Tabla 4. Comparativo de elementos traza en agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo vs límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales\*

Elemento	Cr	Ni	Cu	Pb
Promedio del agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (mg/l)	0.083	0.00249	0.036	0.00365
Límites máximos permisibles mg/l, en humedales naturales	1	4	6	0.2

\*Ver anexo XVIII

### Batimetría.

El Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es extenso y somero. La profundidad máxima determinada en el lado occidental de la carretera fue de 1.12 metros y en la porción oriental del área de estudio fue de 1.52 metros (Fig. 20).

La carretera Morelia-Salamanca, solo cuenta con una compuerta de 3 metros de ancho para la circulación del agua del sector este hacia el oeste del área de estudio, esto da lugar a un desnivel que

varía de acuerdo al caudal del agua que esté pasando. Cuando el caudal se incrementa el desnivel es mayor. A la toma de las muestras el desnivel osciló entre 2 y 5 cm.

El Dren La Cinta se construyó para extraer el agua del Lago de Cuitzeo hacia la Laguna de Yuriria, el funcionamiento del mismo solo permite un nivel máximo de 1820 msnm, a partir de esta altura el agua circula a través del dren hacia la Laguna de Yuriria.

La combinación de la circulación del agua (este-oeste), con la alta evaporación ha propiciado que el sector occidental tenga las concentraciones más altas de sales, con el subsecuente incremento de la conductividad y el pH, características que inciden en una mayor precipitación de bicarbonatos y por lo tanto en la cementación de arcilla.

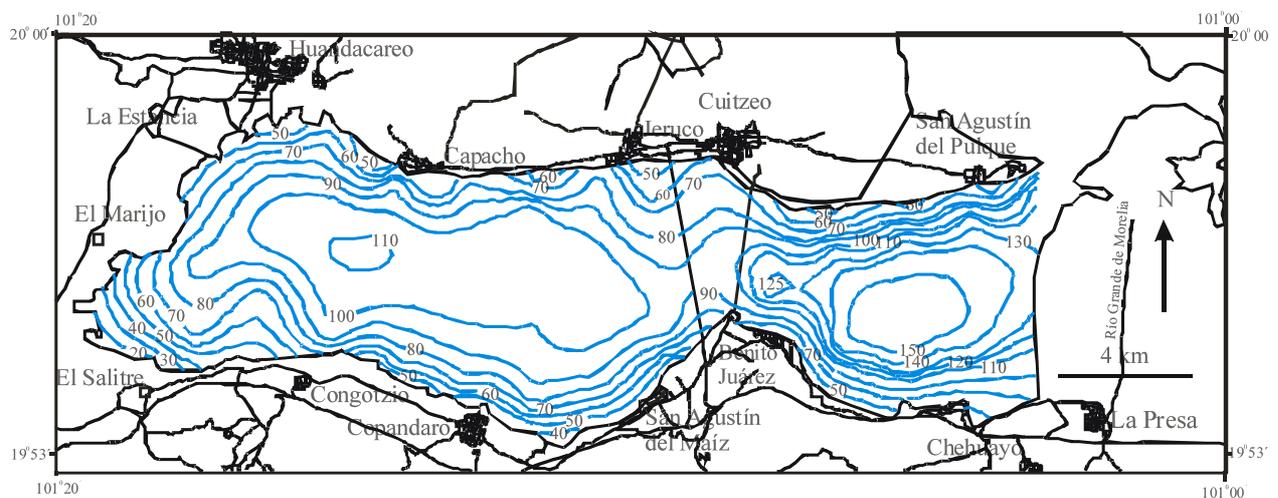


Figura 20. Batimetría del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Valoración del pH en el agua

En el lago de Cuitzeo el pH es básico, su promedio es de 9.45, este valor incide en la disolución de arcilla, así como en la precipitación de bicarbonatos y carbonatos que cementan a la arcilla en la formación de arenas de lodo.

El pH máximo se observó en la parte central del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (10.1) y el mínimo (8.9) se obtuvo al noreste cerca del litoral de San Agustín del Pulque (Fig. 21).

La razón por la que la región central del lado oeste de la carretera presenta los valores más altos se debe a una mayor concentración de sales, ya que al ser la parte más profunda de este sector, es la última en secarse con la subsecuente concentración de sales. El pH disminuye gradualmente hacia el oriente a causa de la mezcla del agua del lago con la que entra por los ríos Morelia y Querendaro, cuyos valores de pH son inferiores.

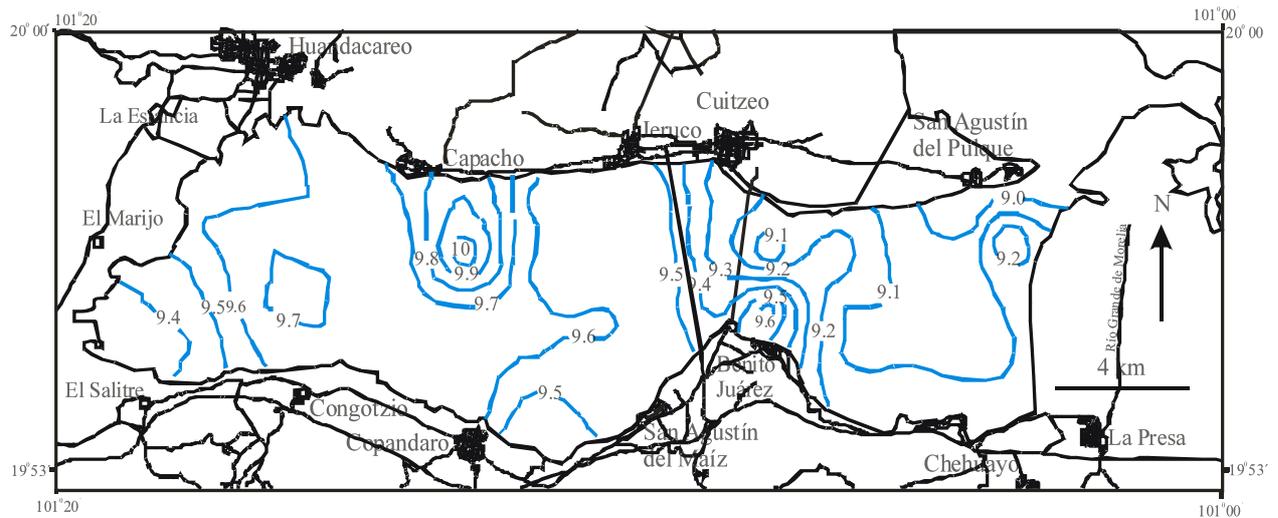


Figura 21. Distribución del pH en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Temperatura

Existe una interdependencia entre los parámetros fisicoquímicos del agua de tal manera que con el aumento de la temperatura se incrementa el pH y la solubilidad y se modifican los niveles de saturación de oxígeno. En el Lago de Cuitzeo la temperatura promedio fue de 27.6°C, la máxima de 34.4°C determinada hacia el oriente del lago (Fig. 22) y la mínima de 21°C en el área poniente.

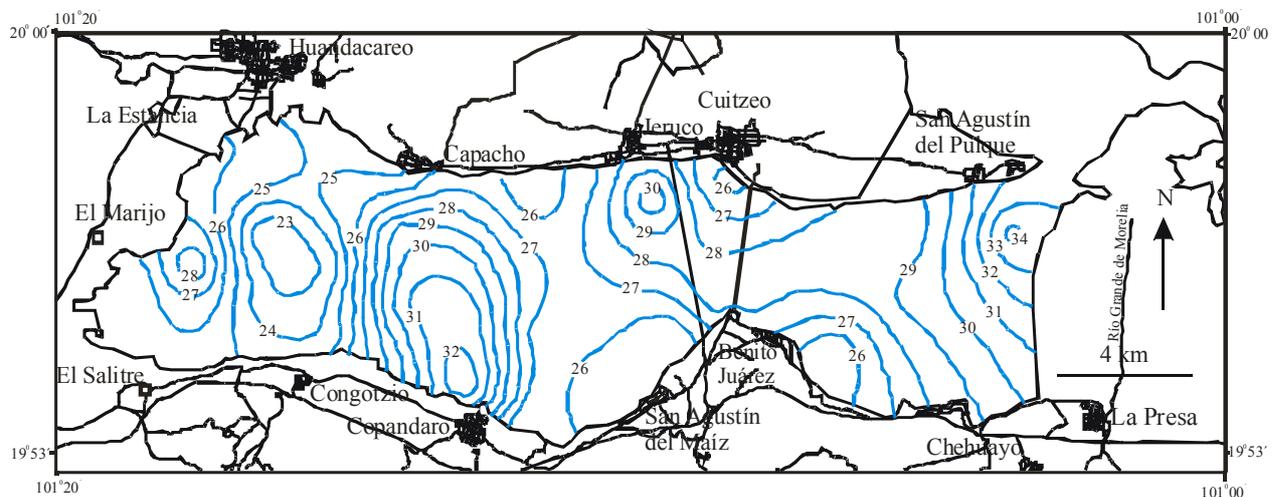


Figura 22. Distribución de la temperatura en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

La temperatura presenta valores elevados en la parte central del lago lo cual incrementa la evaporación, justo en esta zona coinciden la evaporación, pH y conductividad con valores altos, así como la mayor formación de arenas de lodo. Los valores máximos de temperatura se obtuvieron en el límite oriental del lago.

### Conductividad

La conductividad en el agua está relacionada con la presencia de sales en solución, es decir, depende del número de iones disueltos por unidad de volumen. En el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo los aniones en solución que favorecen la conductividad en el agua fueron  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . La correlación de estos iones con la conductividad es positiva y significativa (Tabla 5).

La zona con mayor conductividad (cerca de 6 mS) se localiza entre Capacho y Copándaro y decrece gradualmente hacia la parte oriental del lago donde hay mayor mezcla con el agua que llega de los ríos, la cual tiene menor contenido de sales y por lo tanto la conductividad disminuye (Fig. 23).

Tabla 5. Correlación de Pearson entre la conductividad, el pH y los iones disueltos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

	Conductividad	pH	Sulfatos	Magnesio	Cloruros	Calcio	Sodio
Conductividad	1.00	<b>0.65</b>	<b>0.68</b>	<b>-0.61</b>	<b>0.76</b>	<b>-0.66</b>	<b>0.70</b>
pH		1.00	<b>0.81</b>	<b>-0.70</b>	<b>0.82</b>	<b>-0.45</b>	<b>0.78</b>
Sulfatos			1.00	<b>-0.73</b>	<b>0.96</b>	<b>-0.60</b>	<b>0.89</b>
Magnesio				1.00	<b>-0.76</b>	<b>0.33</b>	<b>-0.72</b>
Cloruros					1.00	<b>-0.70</b>	<b>0.91</b>
Calcio						1.00	<b>-0.59</b>
Sodio							1.00

N=47, con certeza mayor que 95% : 0.294

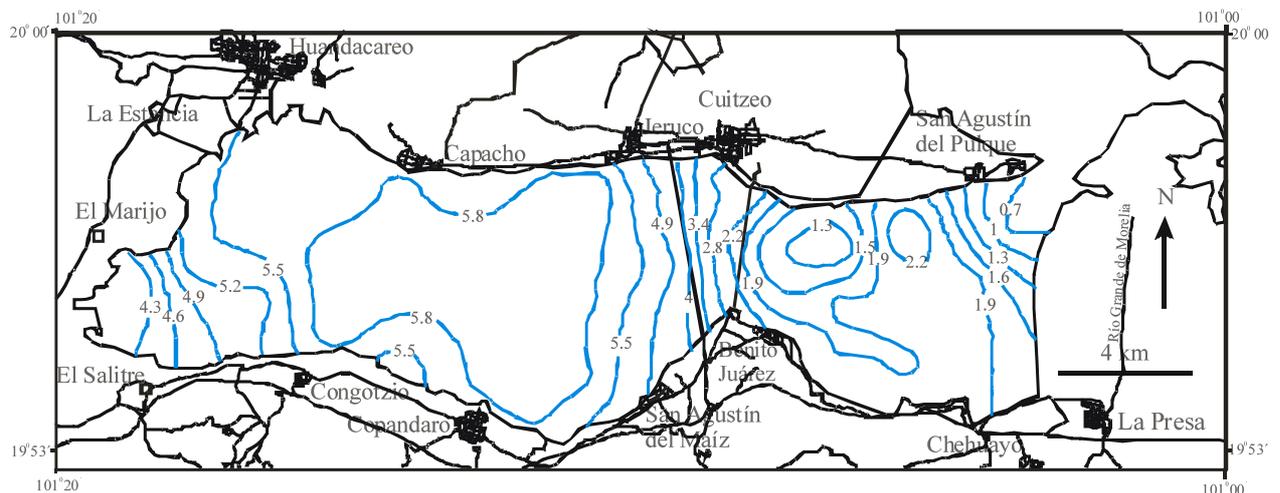


Figura 23. Distribución de la conductividad (mS) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Transparencia

La transparencia está definida por la cantidad de sólidos totales suspendidos, los cuales son mayores en las áreas donde la transparencia es menor, por lo que la correlación de Pearson entre ambas en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es negativa (Tabla 6). La transparencia máxima (36 cm) se observó en el límite noreste del lago (San Agustín del Pulque) (Fig. 24), los sólidos totales suspendidos que corresponden a esta estación son los más bajos (0.02 g/l), el motivo de valores de transparencia, es porque esta zona se encuentra muy cercana a la barrera de vegetación que secciona al Lago de Cuitzeo, dicha barrera propicia la sedimentación y filtración del agua que circula hacia el litoral de San Agustín del Pulque con cantidades menores de sólidos totales suspendidos que el resto del área de estudio. La transparencia menor obtenida (10 cm) fue en el litoral cercano al poblado de Cuitzeo, los sólidos totales suspendidos en este sitio fueron los más altos (0.51 g/l).

Tabla 6. Correlación de Pearson entre el material suspendido y la Transparencia del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

	Material suspendido	Transparencia
Material suspendido	1.00	<b>-0.48</b>
Transparencia		1.00
N=47, con 95% de certeza mayor que 0.294		

La transparencia es uno de los indicadores de la eutrofización de los lagos, la OCDE, marca los valores de eutrofización de los lagos (Tabla 7), de acuerdo con este criterio, el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se considera un lago hipertrófico.

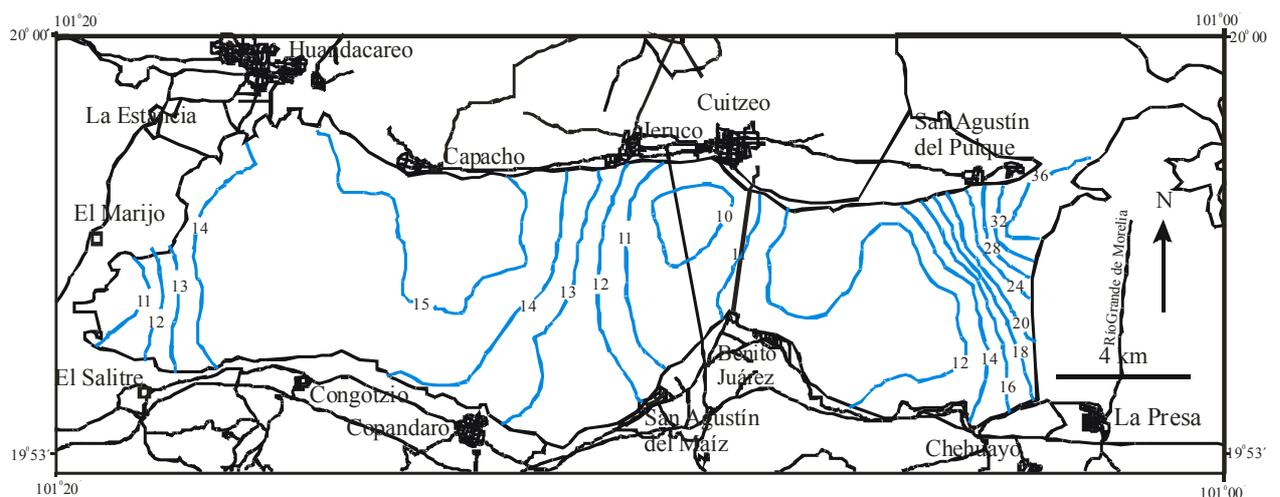


Figura 24. Distribución de la transparencia en el agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Tabla 7. Límites de transparencia según la OCDE (1982). (Tomada de Olmos, 2000).

Transparencia (m)		
Estado trófico	Media	Mínima
Ultraoligotrófico	> 12	< 6
Oligotrófico	>6	<3
Mesotrófico	6-3	3-1.5
Eutrófico	3-1.5	1.5-0.7
Hipertrófico	<1.5	>0.7

### **Sólidos Totales Suspendidos (STS)**

El Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo muestra valores altos de material suspendido, el promedio de STS fue de 0.3 gr/l. El contenido máximo (0.77 gr/l) se encontró en la margen occidental del lago y el mínimo (0.02 gr/l) en el litoral oriente (San Agustín del Pulque), en esta zona la profundidad del lago es mayor lo que permite menos resuspensión desde el fondo, este factor junto con la vegetación que retiene partículas y las fuerte sedimentación que hay hacia el oriente del área de estudio, permiten menor contenido de STS y mayor transparencia en el agua.

## 6. QUÍMICA DE SEDIMENTOS

### Valoración de pH en sedimentos.

El pH contribuye a la precipitación o solubilidad de los compuestos químicos presentes en los cuerpos de agua. En el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo el pH básico ha sido un factor importante en la formación de arenas de lodo, ya que ha propiciado la precipitación de carbonatos y bicarbonatos que cementan a los lodos aglutinados. También ha tenido efecto sobre la arcilla, pues las mantiene en suspensión y solución. En este trabajo se efectuaron pruebas experimentales para definir el comportamiento de la montmorillonita del Lago de Cuitzeo y se comprobó que la disolución se incrementa notablemente a partir del pH = 5.

La carretera Morelia-Salamanca seccionó el área de estudio de tal manera que hacia el poniente de ésta se restringe la circulación del agua y por lo tanto la evaporación ha ocasionado la concentración salina, lo que ha incrementado el pH hasta valores superiores a 10 en los sedimentos, mientras que hacia sector oriente con menor concentración de sales el pH es menor que 10 (Fig. 25). Los valores de de pH en los sedimentos se incrementan de la línea litoral hacia el centro del lago.

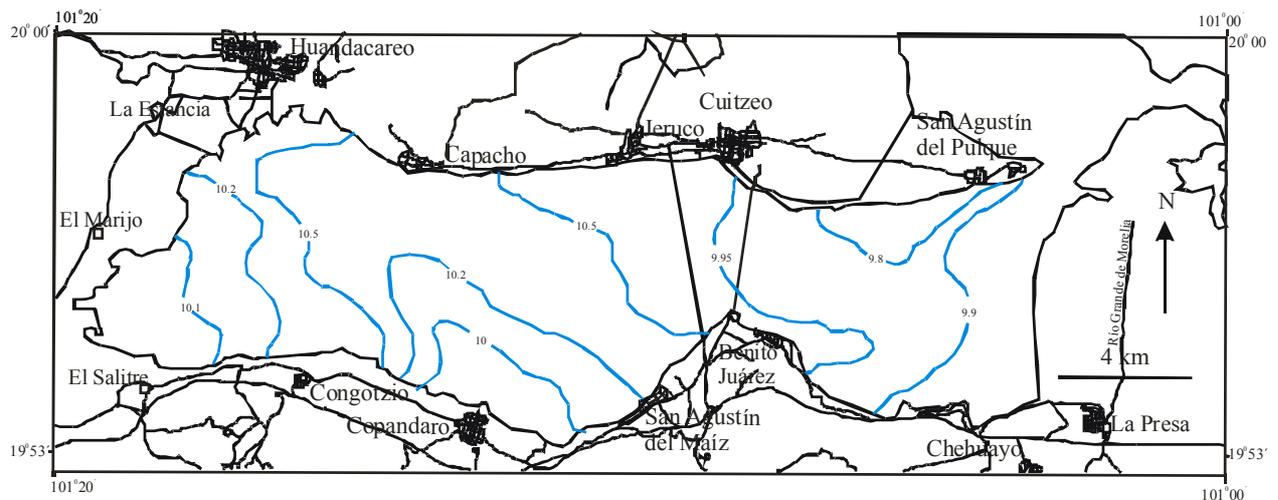


Figura 25. Distribución del pH en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de materia orgánica.

Horowitz y Elrick (1987) consideran que el carbono orgánico muestra una correlación positiva con la disminución del tamaño de grano y gran área superficial. Orson *et al.* (1992) sugieren que la presencia de materia orgánica puede concentrar metales, sin embargo, este es un tema en discusión ya que al parecer esta concentración depende del tipo de materia orgánica del elemento que esté

presente y que la capacidad de retención de materia orgánica depende también de una alta capacidad de intercambio y captura física (Swanson *et al.*, 1966).

En el Lago de Cuitzeo el promedio de materia orgánica es de 0.95 %, el valor máximo (5.5%) se observó en las inmediaciones del poblado de Benito Juárez; sin embargo, este valor se debe a la presencia de pastos (Fig. 26), ya que en las muestras de sedimentos se observó que la presencia de pastos correspondía con valores superiores al 2% de materia orgánica. Los arroyos que desembocan al Lago de Cuitzeo son utilizados como descargas de aguas negras, por lo que los valores de materia orgánica en estas áreas rebasan en general el 1%. Existe una correlación positiva de la materia orgánica con el cobre (Tabla 9), la relación puede deberse a que el cobre y la materia orgánica son una posible fuente antropogénica y forman quelatos.

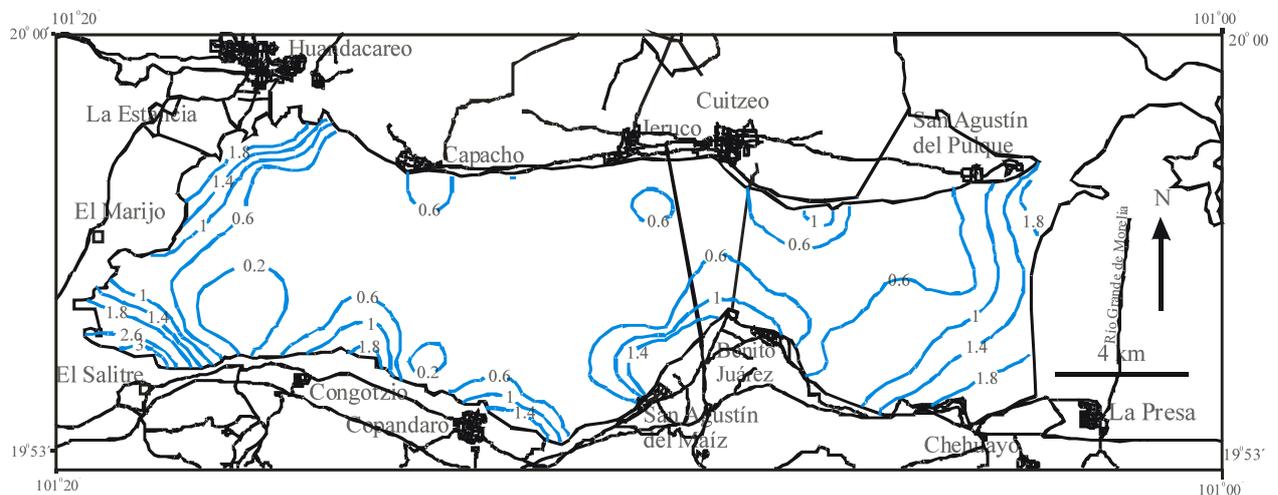


Figura 26. Distribución de materia orgánica (%), en los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de carbonatos.

La distribución de los carbonatos en los sedimentos se asocia con la presencia de biógenos, primordialmente conchas de ostrácodos (Fig. 27) así como algunas costras de carbonatos, resultado de precipitación química. El promedio en el área de estudio es de 11%. De esta manera existe una correlación positiva muy importante de los carbonatos con los biógenos (ostrácodos) (Tabla 8). Por ejemplo en el litoral próximo al poblado de Capacho se encontraron cantidades altas de ostrácodos, lo que da por resultado en un porcentaje alto de carbonatos (20%).

Tabla 8. Correlación de Pearson entre los carbonatos, biógenos y arenas de lodo

	Carbonatos	Biógenos	Arenas de Lodo
Carbonatos	1.00	<b>0.65</b>	0.32
Biógenos		1.00	-0.14
Arenas de lodo			1.00
N=24, con certeza mayor que 95% : 0.404			

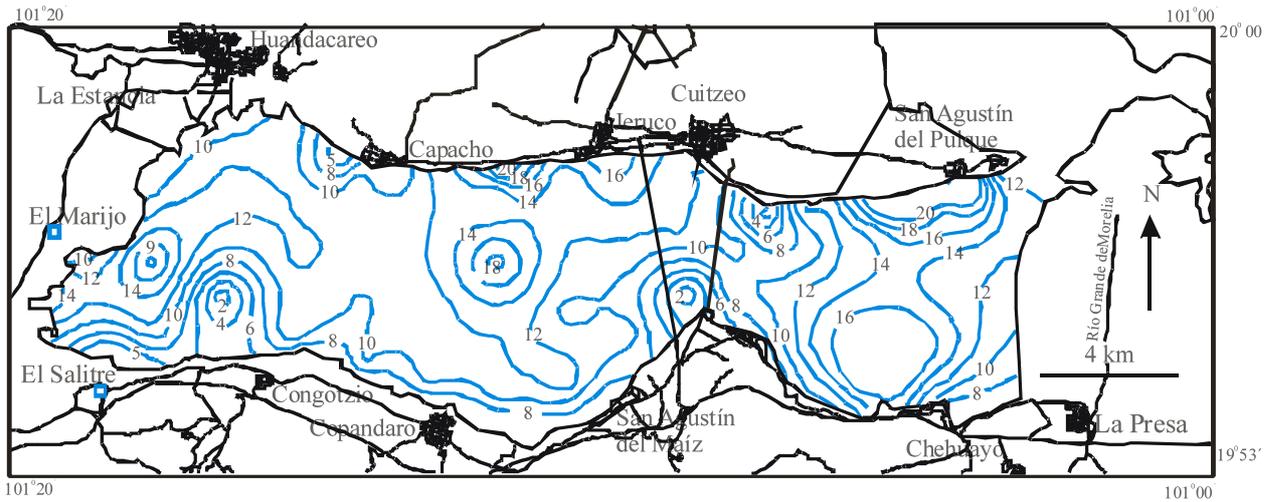


Figura 27. Distribución de carbonatos (%) en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de SiO<sub>2</sub>

El sitio con el mayor porcentaje de SiO<sub>2</sub> (69.8%), se encontró en las inmediaciones de la población de Capacho, ya que esta parte del litoral se caracteriza por la presencia de líticos y fragmentos de cuarzo del tamaño de grava, así como de sedimentos lacustres maduros. El contenido menor se determinó en Benito Juárez (41.7%), en las proximidades del litoral del lago en este sector se aprecian rocas andesíticas y basálticas, que son rocas con porcentajes más bajos de sílice (66 a 45%) con respecto a las rocas ácidas. En San Agustín del Pulque, el litoral rocoso es de composición riolítica, por lo que los contenidos de SiO<sub>2</sub> se incrementan hasta el 64.6% (Fig. 28). El interior del vaso poniente del lago presentó valores muy homogéneos de SiO<sub>2</sub> (48 a 50%) que corresponde primordialmente con la composición de las arcillas y limos (principalmente feldespatos) aglutinados y cementados.

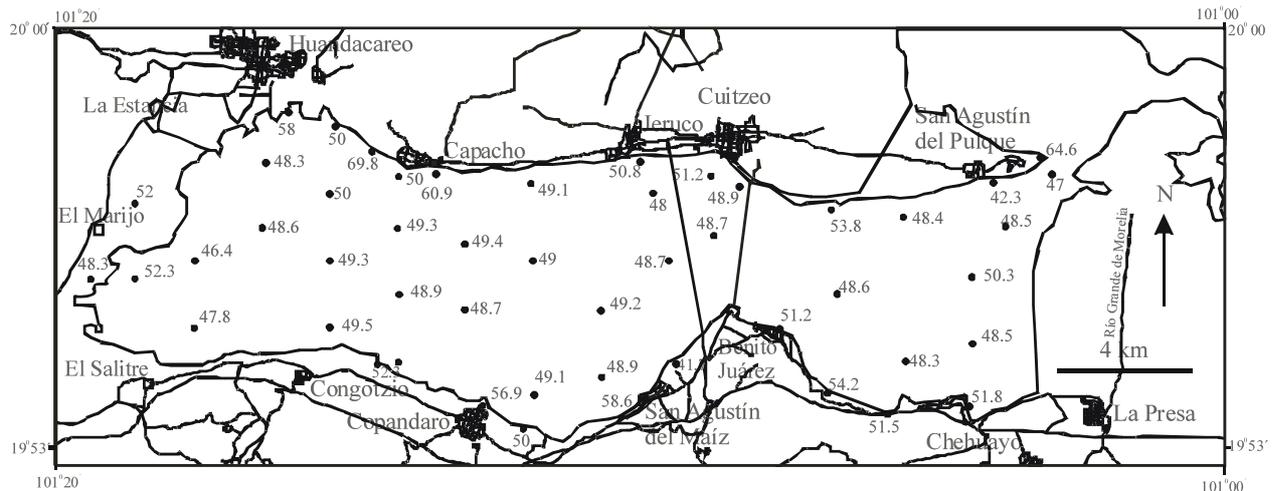


Figura 28. Concentraciones en sedimentos de  $\text{SiO}_2$  (%) obtenido por FRX del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de $\text{Al}_2\text{O}_3$

El óxido de aluminio (15.45% en promedio) se distribuye de acuerdo con los contenidos de feldespatos provenientes en su mayoría de las ignimbritas y riolitas, así como de la arcilla procedentes de las alteraciones de las cenizas volcánicas y de los feldespatos. De esta manera cuando se conjugan porcentajes altos de estos minerales, el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se incrementa notablemente (Fig. 29). Los sedimentos del interior del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo tienen concentraciones altas de lodos aglutinados, de composición arcillosa y feldespática por lo que sus valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  son superiores al 17%.

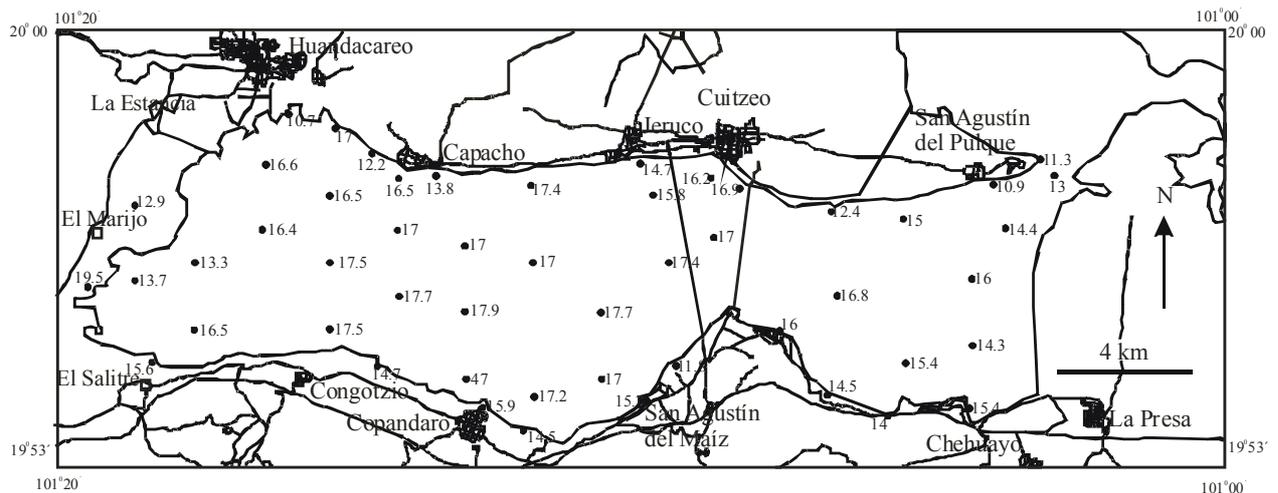


Figura 29. Distribución de las concentraciones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%) determinadas por FRX del Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo.

El óxido de aluminio mostró un valor muy alto en el litoral poniente (estación 17 = 19.05 %), en el cual hay una fuerte fluctuación de la línea del litoral y abundan sedimentos maduros del paleolago, cuya composición contiene abundante arcilla, lo que enriquece en  $Al_2O_3$  a los sedimentos. El valor mínimo (10.7) se encontró en el litoral noreste cercano a los balnearios de Huandacareo en esta zona, el Arroyo Blanco (Fig. 6) está depositando rocas de composición basáltica y andesítica; tanto intrusivas como extrusivas, que sumadas a porcentajes altos de cuarzo y cantidades menores de aglutinados y feldespatos dan por resultado contenidos bajos de  $Al_2O_3$ .

Los valores de  $Al_2O_3$  son menores en el sector oriental de la carretera Morelia-Salamanca, esto es porque disminuyen los porcentajes de feldespatos y fragmentos de roca.

Los porcentajes altos de  $Al_2O_3$  son indicativos de la abundancia de arcillas y feldespatos, de esta manera los porcentajes más altos de  $Al_2O_3$ , coinciden con la abundancia de estos. Este comportamiento es notable en el interior del lago y sobresale hacia el centro del mismo.

### **Distribución de $Fe_2O_3$ .**

El óxido de fierro (5.5 % en promedio) encontrado corresponde principalmente con la magnetita; así como, a los minerales presentes en los basaltos, andesitas y depósitos de cenizas volcánicas. Las zonas del litoral donde descargan los arroyos con sedimentos de rocas basálticas y andesíticas son las que presentan los valores más altos de  $Fe_2O_3$ . Ejemplos de esta distribución se observa en las inmediaciones del poblado de Copándaro (estación 9), donde los arroyos están depositando sedimentos derivados de rocas andesíticas y basálticas, los cuales contienen minerales con fierro en su composición tales como: olivino, piroxenos y hornblenda, es frecuente que esta última presente oxidación. La composición mineralógica de estos sedimentos, se refleja en el contenido de  $Fe_2O_3$ , con valores de hasta 6.6%. Al poniente del lago hay una extensa zona de rocas basálticas y andesíticas cortadas por arroyos que depositan las partículas de estas rocas en el límite occidental del lago, en el cual se aprecian las mismas características de la zona de Copándaro. El incremento de minerales pesados (magnetita) (estación 17) incrementa el  $Fe_2O_3$  al 9.99%. Los contenidos bajos de  $Fe_2O_3$  en el litoral corresponden a las descargas de sedimentos provenientes de rocas riolíticas e ignimbríticas en las cuales se aprecian pocos ferromagnesianos, como es el caso del litoral rocoso riolítico del área de San Agustín del Pulque (estación 23) con valores 3.57% de  $Fe_2O_3$  (Fig. 30).

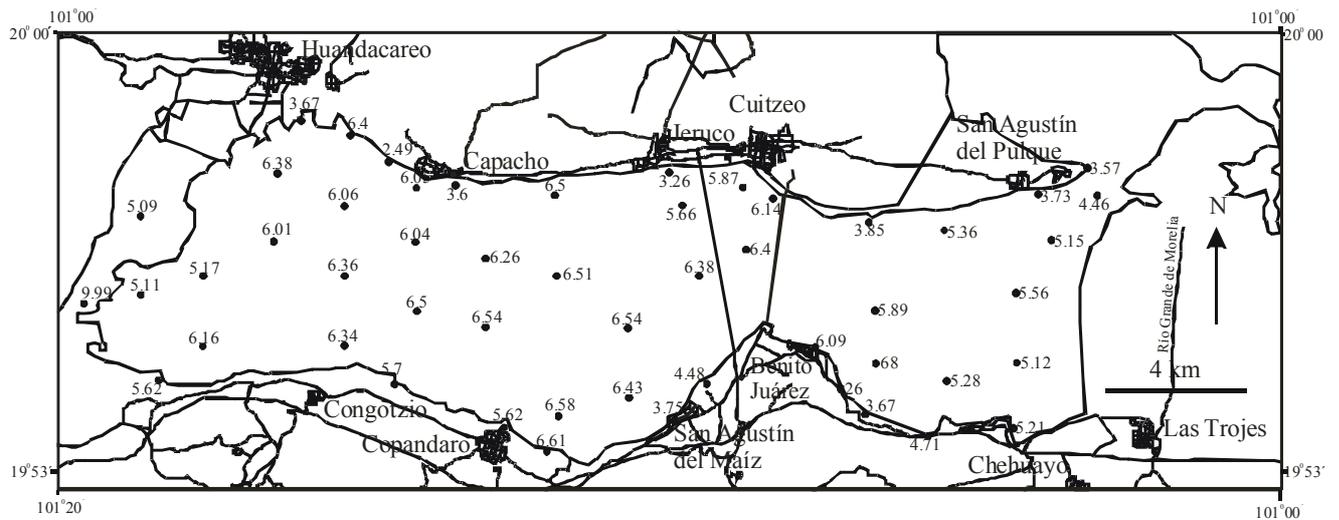


Figura 30. Concentraciones de  $Fe_2O_3$  (%) determinadas por FRX en el Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo.

**Distribución de  $TiO_2$**

El óxido de titanio se encontró en valores muy bajos (0.77% en promedio) asociado con magnetitas en los sedimentos (Fig. 31). En el sector poniente del lago (estación 17) se presenta el promedio máximo (1.63) de el cual se encuentra asociado principalmente a la magnetita.

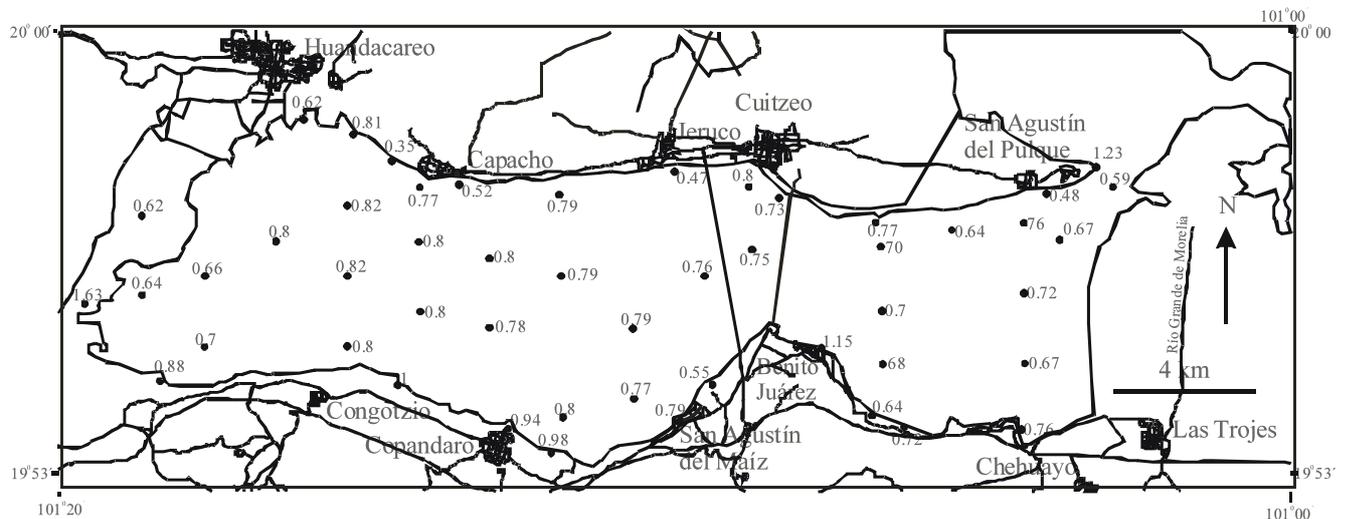


Figura 31. Concentraciones de  $TiO_2$  (%) determinadas por FRX en el Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo.

### Distribución de CaO

El contenido de CaO (5.7% en promedio) se asocia con el cementante de las arenas de lodo, las conchas de los ostrácodos, el calcio de las plagioclasas y a las cenizas volcánicas (Fig. 32). Así por ejemplo, la zona poniente del lago (estación 34) se caracteriza por la entrada de arroyos con sedimentos derivados de rocas basálticas y andesíticas que contienen plagioclasas cálcicas. También se aprecia abundancia de vegetación enraizada con la que se asocian los ostrácodos (Lamina 1) y los aglutinados cementados con carbonatos, por lo que los valores de CaO son altos (9.58%). En la estación 22 con 16.18% de CaO, las plagioclasas sódico-cálcicas derivadas de las rocas andesíticas y basálticas tienen incidencia en los porcentajes de CaO, como se determinó en la estación 10 donde se encontraron clastos de estas rocas y los valores son del 6.58 %. Es notable que en las zonas litorales donde se están depositando fragmentos de roca basáltico- andesíticos y dacíticos, se presentan valores más altos, lo que se explica por la presencia de las plagioclasas cálcico sódicas. Por ejemplo, en el litoral de Copándaro (6.58% de CaO) y Benito Juárez- Chehuayo (7.5% de CaO) sitios donde se encuentran depósitos importantes de rocas basálticas.

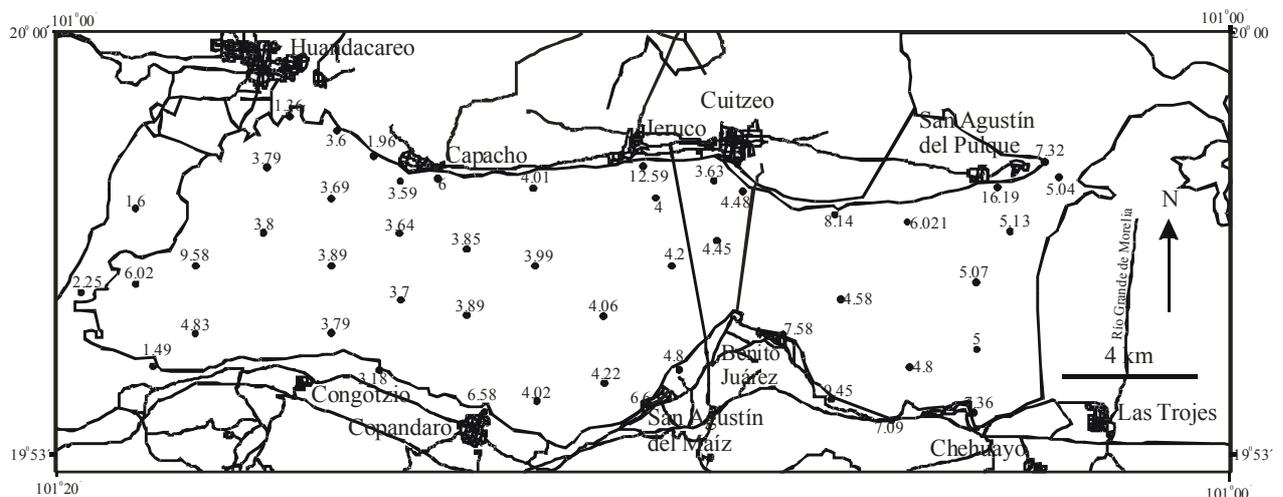


Figura 32. Concentraciones de CaO (%), determinadas por FRX en el Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo.

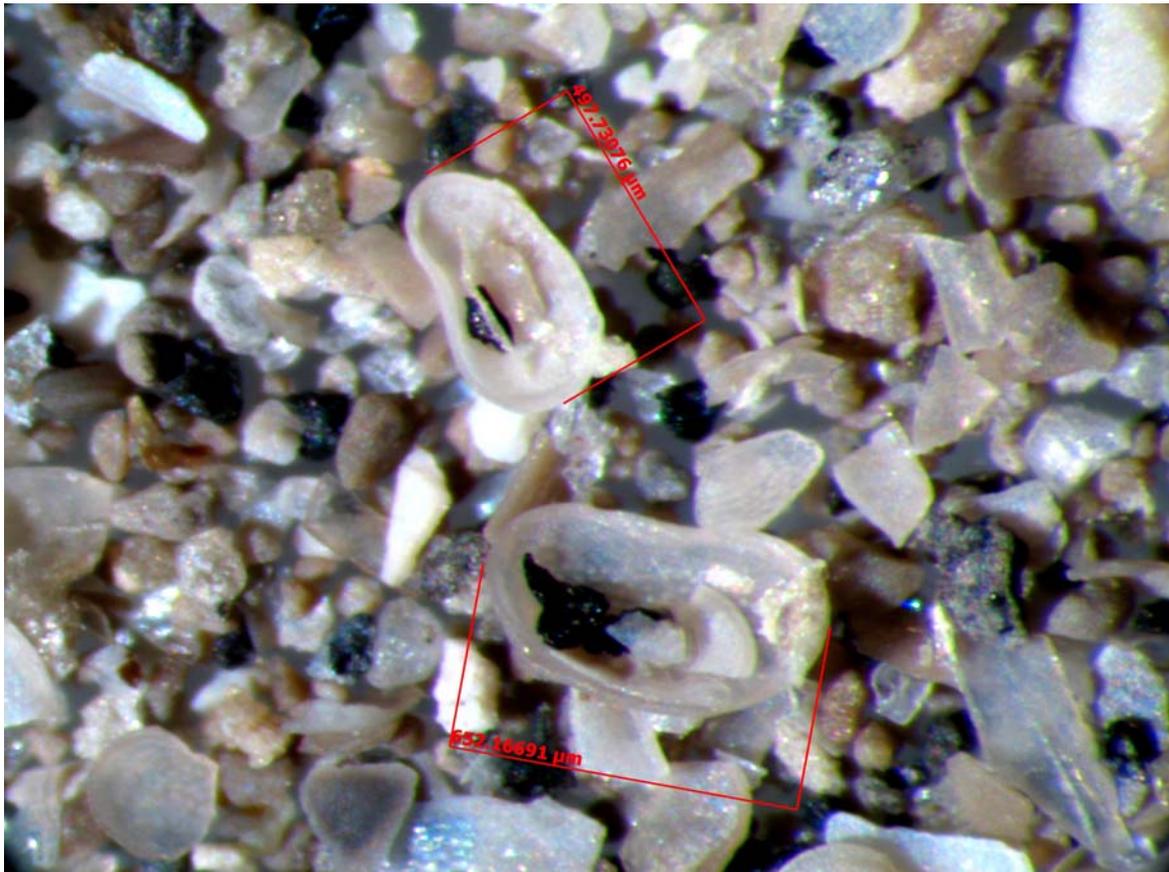


Lámina 1. Sedimentos de la fracción arenosa, en la que se aprecian ostrácodos y arenas de lodo.

### **Distribución de Na<sub>2</sub>O**

El óxido de sodio promedia valores de 2 % (Fig. 33) y procede en su mayoría de las plagioclasas, las arcillas y del aporte de sodio de los manantiales (Fig. 16) que contribuyen a que se precipiten bicarbonatos de sodio en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Las cantidades mayores de Na<sub>2</sub>O encontradas corresponden con plagioclasa (oligoclasa) observadas en las riolitas, ignimbritas, dacitas, microdacitas y arcillas aglutinadas. Ejemplo de esta composición química se aprecia en el litoral cercano al poblado de Capacho (estación 3) lugar donde descargan arroyos con sedimentos lacustres localizados al noroeste del lago y que contienen partículas de este tipo de rocas, cuyo valor de Na<sub>2</sub>O fue de 3.06%. En el litoral sur, desde el poblado de Congotzio hasta Chehuayo, se encontraron porcentajes importantes de plagioclasas y fragmentos de rocas volcánicas procedentes de los arroyos que descienden de las rocas basálticas y andesíticas localizadas hacia el sur del área de estudio, los valores de Na<sub>2</sub>O, en esta zona oscilan entre el 2 y

3.3%. En el litoral rocoso norte (San Agustín del pulque) las rocas son riolíticas y los valores de  $\text{Na}_2\text{O}$  son del orden de 2%, debido a la influencia de los sedimentos empobrecidos en sodio que llegan a través de los canales del Río Morelia.

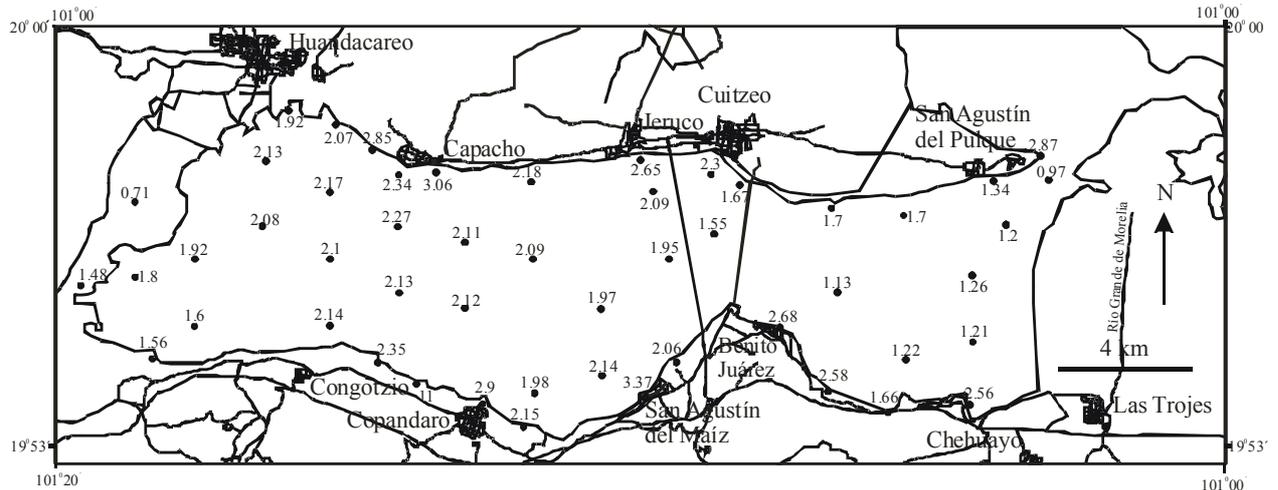


Figura 33. Concentraciones de  $\text{Na}_2\text{O}$  (%) determinadas por FRX en el Vaso Poniente del Lago del Cuitzeo.

### Distribución de $\text{K}_2\text{O}$

El óxido de potasio (2% en promedio) en los sedimentos corresponde principalmente al feldespato potásico presente en las rocas de composición ácida, como son: las riolitas, tobas riolíticas e ignimbritas (Fig. 34). La granulometría de las rocas ácidas de la Cuenca de Cuitzeo es preferentemente de tamaño de arenas finas y limos, por esta razón los sedimentos con feldespato potásico que se están depositando en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se caracterizan por tener estos tamaños, el potasio procedente de las biotitas y muscovitas es mínimo (determinados con microscopio petrográfico) pues estos minerales son muy escasos. Las áreas en las que se incrementan los valores, como lo es el caso del litoral noroeste, en las inmediaciones del pueblo de Capacho (hasta 3.81%) es ocasionado por la presencia de fragmentos de rocas volcánicas de composición ácida que presenta una asociación frecuente con plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico (sanidino).



### Metales Traza en sedimentos.

Los elementos traza en sedimentos se determinaron por FRX. Para normalizarlos se consultaron los valores de fondo de análisis geoquímicos de sedimentos de arroyos de la Cuenca de Cuitzeo (Anexo XII) realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) (Fig. 35).

Se compararon los promedios entre los metales traza en sedimentos de arroyos en la Cuenca de Cuitzeo y los promedios en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 36).

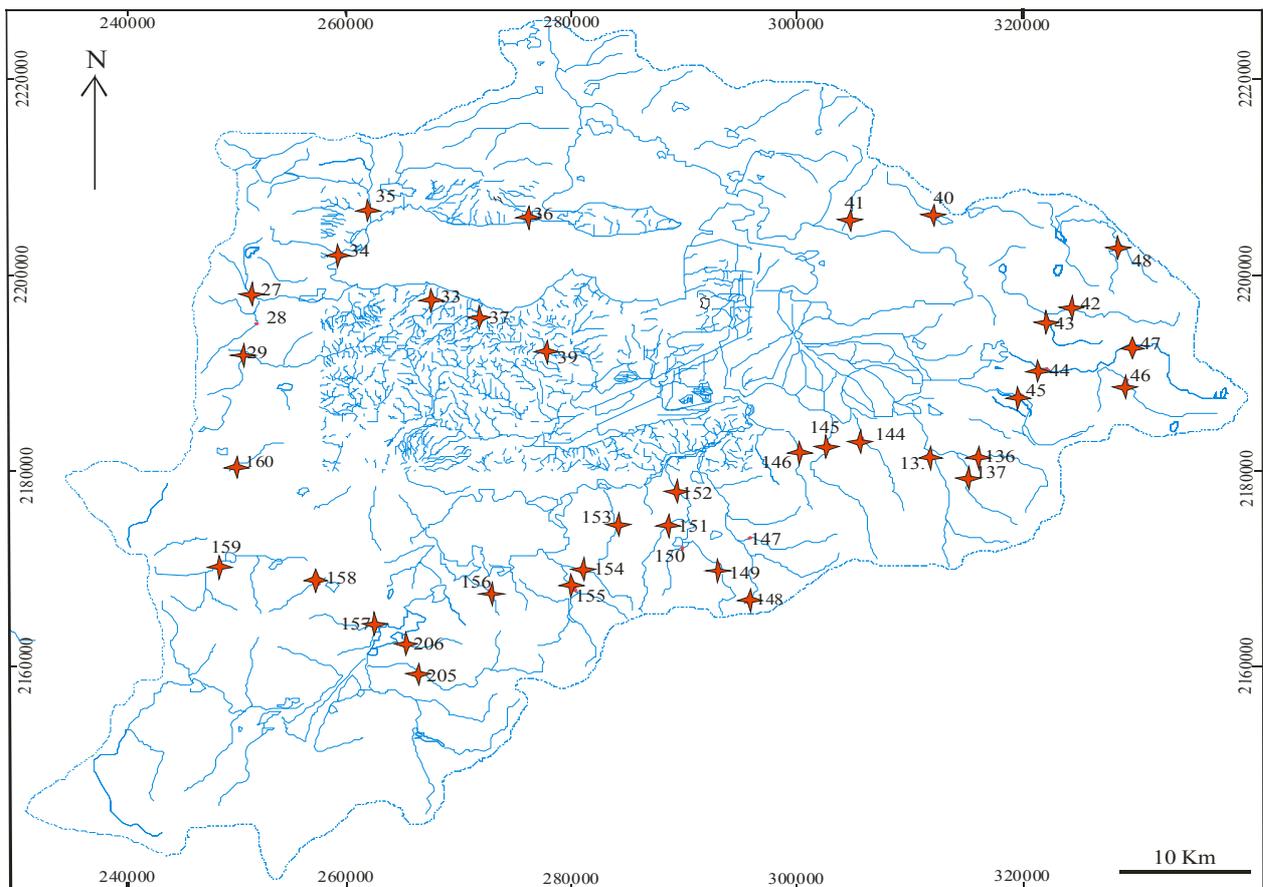


Figura 35. Estaciones del análisis geoquímico de sedimentos de arroyos de la Cuenca de Cuitzeo, realizadas por el Servicio Geológico Mexicano (Tomado del SGM, 1998 a).

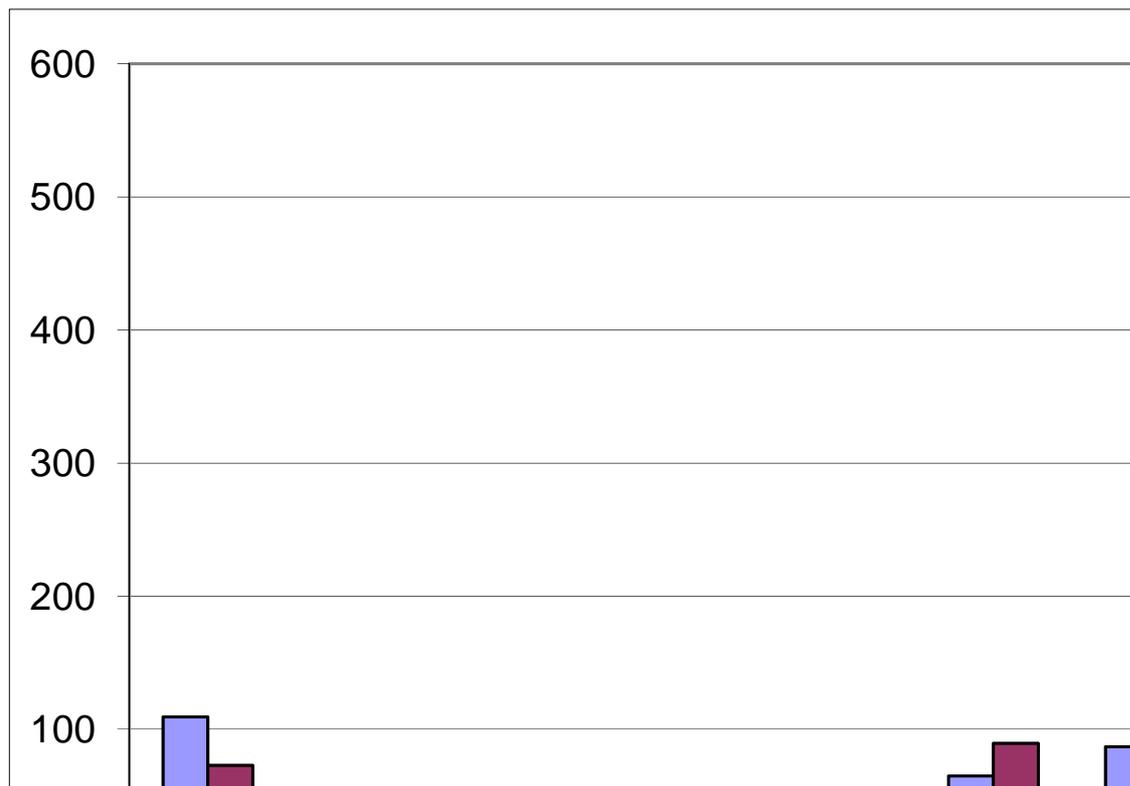


Figura 36. Comparación entre los promedios de metales en sedimentos de arroyos de la cuenca de Cuitzeo (Datos tomados del SGM 1998 a, b, c, d) y los promedios de los resultados por difracción de rayos x en sedimentos del Lago de Cuitzeo. ■ Promedios en arroyos de la cuenca. ■ Promedios en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de cromo

El cromo es un elemento de baja movilidad en los sedimentos; sin embargo, los sulfatos son buenos disolventes del cromo. El  $\text{Cr}^{6+}$  es más móvil que el  $\text{Cr}^{3+}$ , el cual es muy poco soluble en agua. Es difícil encontrar cromo en ambientes sedimentarios con pH mayor que 9 (Varela-González, 2007). Se distinguen dos tendencias de porcentajes de este elemento. La primera y la más importante se localiza en toda la margen litoral (Fig. 37) que se relacionan con el incremento de fragmentos de rocas básicas, la correlación entre el cromo y los fragmentos de roca es significativa (0.47) (Tabla 9), esta correspondencia se explica por los valores de fondo de los sedimentos derivados de las rocas de la Cuenca de Cuitzeo que se están depositando en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

La segunda es una relación menos definida del cromo con el tamaño promedio gráfico  $Mz\phi$  (0.41) (Tabla 9) ya que cuando se presentan arenas el contenido de cromo tiende a disminuir y cuando el  $Mz\phi$  es de finos (limos-arcillas), el contenido de cromo tiende a aumentar.

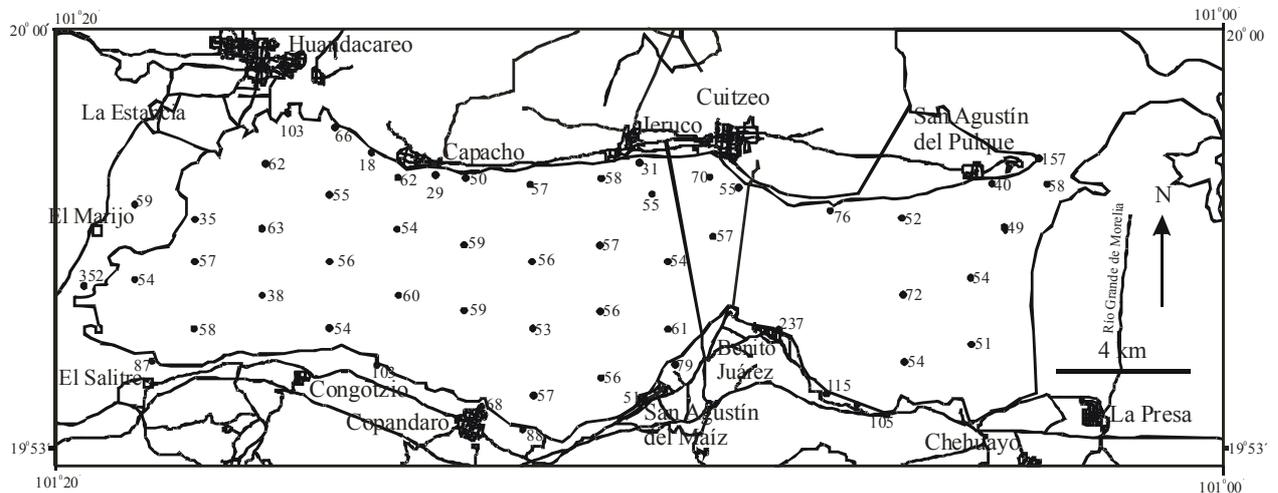


Figura 37. Distribución de cromo (ppm) de los sedimentos en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Entre el pH y el cromo no se encuentra una correlación significativa, esto indica que el pH de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo no favorece la estabilidad química del cromo. En la estación 17 se presenta el valor más alto de cromo (352 ppm), asociado a minerales tales como: el olivino, hornblenda y magnetita. En la estación 24 los valores de cromo (237 ppm) se asocian con fragmentos de rocas basálticas, dacíticas y andesíticas, así como minerales opacos y hornblenda. En el litoral de Mariano Escobedo (estación 23), los valores altos de cromo (157 ppm) ocurren con abundantes fragmentos de roca básicas e intermedias y minerales opacos (magnetitas), que proceden de los ríos Morelia y Querendaro. Estos 3 ejemplos ilustran la relación positiva del cromo con los fragmentos de roca, principalmente basálticos y andesíticos, minerales opacos, piroxenos y anfíboles.

La correlación de Pearson (Tabla 9), indica que la relación del cromo con: vanadio, cobalto y níquel es por su afinidad en la mineralogía de las rocas básicas e intermedias del AVTM.

La correspondencia de valores con el cobre, es por dos causas posibles: la mezcla de sedimentos provenientes de rocas básicas con las ácidas y por la posible absorción de estos elementos por hidróxidos de manganeso y fierro (Tabla 10) (Martínez-López, 2004).

Tabla 9. Correlación de Pearson entre elementos traza, materia orgánica y la petrografía de la fracción arenosa, del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

	*M. O.	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	MzØ	*F. (%)	*F. R. (%)	*M.P. (%)	*B. (%)	*A.L. (%)
*M. O.	1.00	0.29	0.20	0.18	0.19	<b>0.54</b>	0.33	-0.12	<b>0.42</b>	<b>0.51</b>	<b>0.42</b>	0.31	-0.33	-0.38
V		1.00	<b>0.83</b>	<b>0.89</b>	<b>0.92</b>	<b>0.86</b>	<b>0.58</b>	0.34	<b>0.57</b>	0.06	0.33	0.34	-0.19	-0.14
Cr			1.00	<b>0.79</b>	<b>0.71</b>	<b>0.61</b>	0.38	0.16	<b>0.41</b>	0.14	<b>0.47</b>	<b>0.47</b>	-0.15	-0.27
Co				1.00	<b>0.89</b>	<b>0.77</b>	<b>0.58</b>	0.20	<b>0.50</b>	0.07	0.35	0.25	-0.17	-0.16
Ni					1.00	<b>0.83</b>	<b>0.56</b>	0.31	<b>0.62</b>	-0.10	0.07	0.10	-0.14	0.07
Cu						1.00	<b>0.67</b>	0.36	<b>0.72</b>	0.12	0.24	0.34	-0.22	-0.13
Zn							1.00	<b>0.64</b>	0.37	0.18	0.23	0.23	-0.26	-0.13
Pb								1.00	-0.01	0.01	0.03	0.29	-0.23	0.08
MzØ									1.00	-0.09	-0.12	0.13	0.05	0.02
*F (%)										1.00	<b>0.65</b>	<b>0.75</b>	-0.35	<b>-0.84</b>
*F.R (%)											1.00	0.69	-0.35	<b>-0.69</b>
*M.P. (%)												1.00	-0.16	-0.80
*B (%)													1.00	-0.14
*A.L. (%)														1.00

N = 23, con certeza mayor que 95% : 0.43

\*M.O. = Materia orgánica; F. = Feldespatos; M.P. = Minerales pesados; F.R. = Fragmentos de roca; B. = Biógenos; A.L. = Arenas de lodo.

Tabla 10. Correlación entre Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> total y MnO con los metales traza, del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	Sr	Ba	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	1.00	<b>0.68</b>	<b>-0.35</b>	<b>0.41</b>	<b>0.65</b>	<b>0.40</b>	<b>0.43</b>	<b>0.89</b>	<b>0.39</b>	<b>0.40</b>	<b>0.30</b>
MnO		1.00	-0.07	<b>0.53</b>	<b>0.61</b>	<b>0.56</b>	<b>0.46</b>	<b>0.79</b>	<b>0.34</b>	0.17	0.00
Sr			1.00	0.19	-0.35	-0.16	<b>-0.41</b>	<b>-0.37</b>	<b>-0.43</b>	<b>-0.50</b>	<b>-0.43</b>
Ba				1.00	<b>0.30</b>	<b>0.49</b>	<b>0.30</b>	<b>0.41</b>	-0.08	-0.03	-0.17
V					1.00	<b>0.76</b>	<b>0.78</b>	<b>0.86</b>	<b>0.77</b>	<b>0.53</b>	0.12
Cr						1.00	<b>0.69</b>	<b>0.66</b>	<b>0.52</b>	<b>0.34</b>	0.03
Co							1.00	<b>0.72</b>	<b>0.82</b>	<b>0.56</b>	0.07
Ni								1.00	<b>0.65</b>	<b>0.51</b>	0.21
Cu									1.00	0.61	0.15
Zn										1.00	<b>0.62</b>
Pb											1.00

N=50, con certeza mayor que 95% : 0.279

### Distribución de estroncio

El estroncio es un elemento abundante en los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, el valor más alto se localiza en la zona litoral del poblado de Jeruco (1081 ppm) y el más bajo en el litoral poniente con porcentajes cercanos a las 200 ppm (Fig. 38). Tiene correlación negativa con: vanadio, cobalto, plomo, zinc, níquel y cobre (Tabla 10).

El estroncio se encontró en cantidades mayores en los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, que en los sedimentos de los arroyos de la Cuenca de Cuitzeo, esto sugiere que este elemento por su movilidad es disuelto por los manantiales termales al transitar por las rocas volcánicas y que junto con el bario se están depositando en forma de sulfatos, ya que estos se encuentran ampliamente distribuidos en el agua del área de estudio.

El bario y el estroncio son elementos que sustituyen al potasio y sodio en las redes cristalinas del sanidino y la albita, en las plagioclasas cálcicas el estroncio se sustituye con el calcio (Otonello, 1997), por lo que es muy factible que estos dos elementos traza se encuentren en los sedimentos asociados a estos minerales.

La relación negativa con los metales traza es debido a su génesis diferente y por lo tanto en su distribución no se correlaciona.

A pesar de su posible similitud en el origen entre el estroncio y el bario no les confiere una relación de Pearson positiva- significativa (tabla 10).

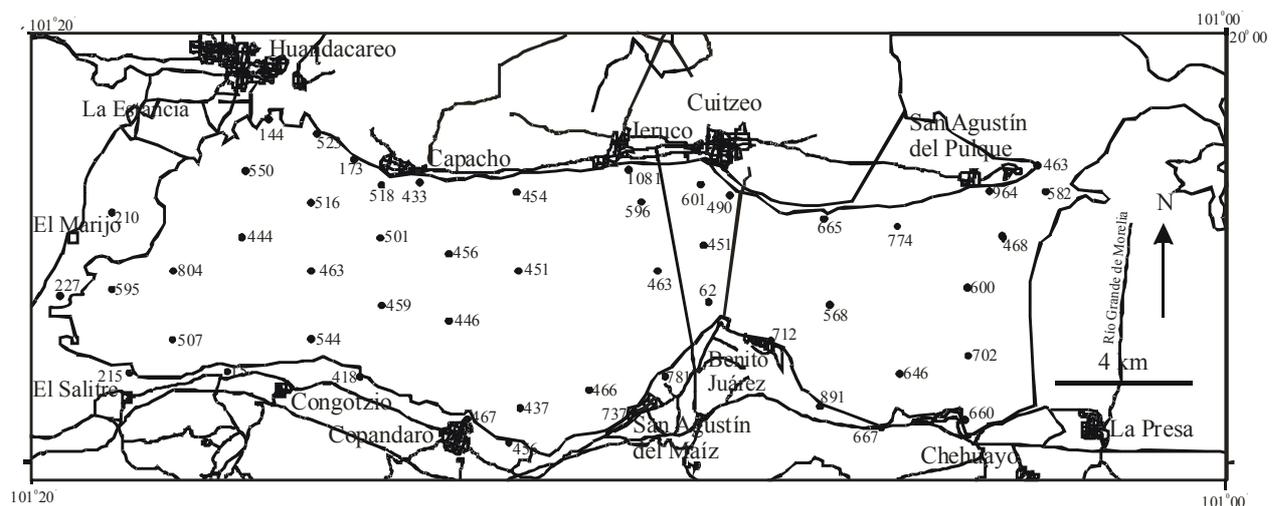


Figura 38. Distribución de estroncio (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de bario

El bario mantiene una relación no significativa con el estroncio (Tabla 11), la probable relación entre estos dos elementos es la co-precipitación como sulfatos, en el ambiente químico del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo. Las relaciones negativas con el cobalto, cobre y plomo es porque tienen procedencias de ambientes geoquímicos diferentes, ya que el bario es un elemento con mayor movilidad que procede de soluciones hidrotermales y se precipita como sulfatos y los elementos con los que se correlaciona negativamente se encuentran en los sedimentos que proceden de la litología de la cuenca, por esta razón su diferencia en la distribución en los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 39).

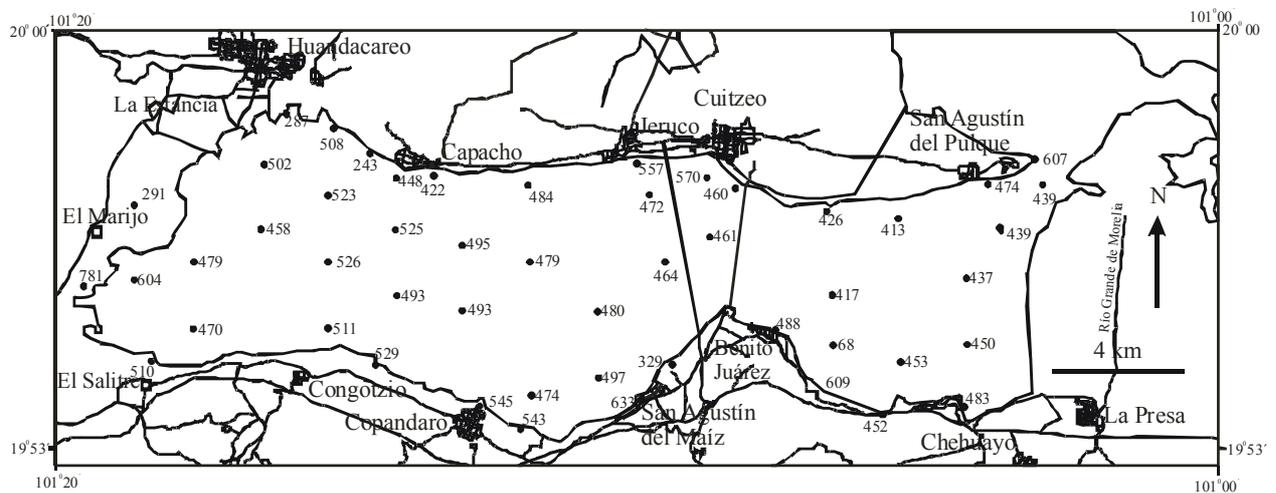


Figura 39. Distribución de bario (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

La presencia del bario es muy homogénea, quizás como resultado de su precipitación como sulfatos en el agua, ya que en ésta es un compuesto abundante, su promedio en los sedimentos es de 482 ppm y sus porcentajes más altos se encuentran en el litoral oeste, donde existe mayor precipitación (781 ppm) que en el sector este, el valor más alto se ubicó en el litoral de San Agustín del Pulque (607 ppm). Las correlaciones de Pearson del bario con algunos elementos (Tabla 10) indican que por su movilidad y abundancia en el agua del área de estudio el bario pudo originarse por precipitación. Una alternativa por la que no existe correlación positiva entre el bario y el estroncio, es porque en los promedios de las rocas básicas, es mayor la sustitución del calcio por el estroncio y los promedios de bario son más altos en las rocas ácidas, ya que reemplazan en la red cristalina al potasio de los feldespatos potásicos (sandino) (anexo XVI).

Tabla 11. Correlaciones de Pearson de estroncio y bario, con elementos de los sedimento del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Sr	Ba	V	Cr	Co	Ni
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	1.00	0.28	<b>-0.45</b>	-0.24	0.04	<b>-0.35</b>	<b>0.41</b>	<b>0.65</b>	<b>0.40</b>	<b>0.43</b>	<b>0.89</b>
MgO		1.00	<b>0.33</b>	<b>-0.51</b>	0.06	<b>0.37</b>	-0.11	-0.22	<b>-0.38</b>	<b>-0.44</b>	0.01
CaO			1.00	-0.04	-0.35	<b>0.88</b>	0.15	<b>-0.38</b>	-0.14	<b>-0.38</b>	<b>-0.43</b>
Na <sub>2</sub> O				1.00	<b>0.49</b>	0.06	0.28	-0.24	0.02	-0.09	-0.29
K <sub>2</sub> O					1.00	-0.29	-0.15	<b>-0.44</b>	<b>-0.41</b>	<b>-0.43</b>	-0.24
Sr						1.00	0.19	<b>-0.35</b>	-0.16	<b>-0.41</b>	<b>-0.37</b>
Ba							1.00	<b>0.30</b>	<b>0.49</b>	<b>0.30</b>	<b>0.41</b>
V								1.00	<b>0.76</b>	<b>0.78</b>	<b>0.86</b>
Cr									1.00	<b>0.69</b>	<b>0.66</b>
Co										1.00	<b>0.72</b>
Ni											1.00

N=50, con certeza mayor que 95% : 0.279

### Distribución de vanadio

El vanadio es un elemento anfótero y tiende a concentrarse en rocas básicas (Toselli *et al.*, 2003) El promedio de vanadio es de 85.7 ppm, los contenidos mayores se aprecian en algunas áreas de litoral (Fig. 40) como lo son: Benito Juárez (145 ppm), Chehuayo (108 ppm), Congotzio 113 (ppm) y la margen poniente del lago (221 ppm), el valor más bajo se encontró entre Huandacareo y Capacho (34 ppm). Este elemento se asocia principalmente a las rocas básicas, por tal motivo se correlaciona con: cromo, cobalto, níquel, cobre y zinc (Tabla 10).

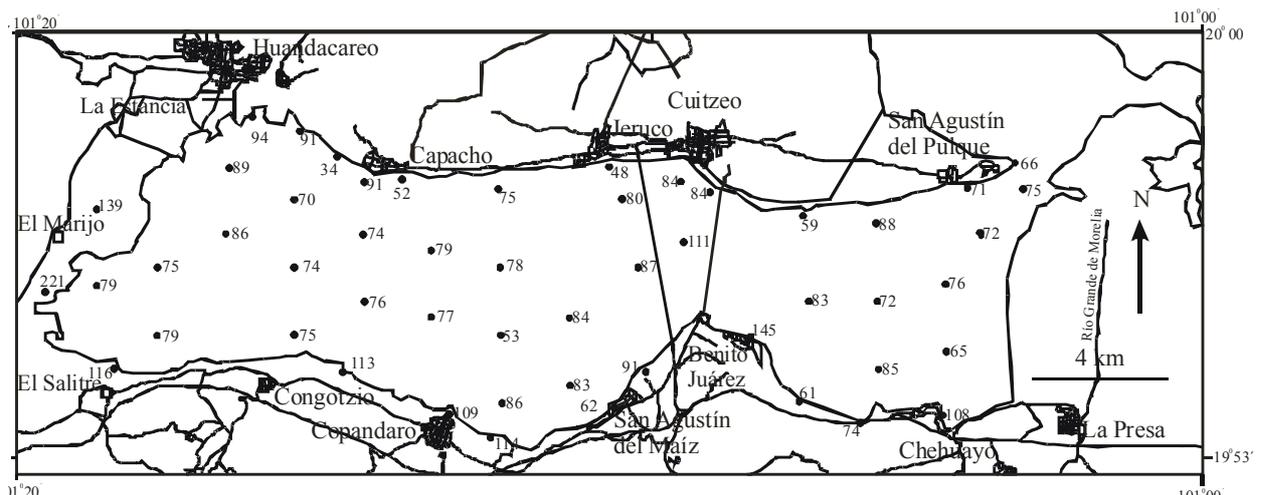


Figura 40. Distribución de vanadio (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

La probable relación con el cobre-vanadio-zinc es por la mezcla de rocas ácidas y básicas y a posibles fuentes de contaminación antropogénica, ya que la diferencia de valores de Cu y Zn entre los sedimentos depositados en el área de estudio y los de los arroyos de la Cuenca de Cuitzeo sugieren contaminación antropogénica (Fig. 36), un ejemplo de esta posible contaminación entra al lago por medio de los arroyos que desembocan en el litoral en la zona de Copandaro-Benito Juárez.

### Distribución de cobalto

El contenido de cobalto es de los más bajos en los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 41), el promedio es de 18.6 ppm, el valor máximo se encuentra en el litoral de Huandacareo (38 ppm) y el mínimo en el litoral de Benito Juárez (13 ppm) (Anexo VI). El cobalto es significativo positivo con los minerales presentes en las rocas básicas como lo son: cromo, vanadio, níquel, así como con: cobre, zinc y plomo de manera negativa con el estroncio (Tabla 10). El níquel, cobalto, cobre y plomo pueden ser absorbidos en los hidróxidos de fierro y manganeso, lo que hace que entre sí tengan una correlación significativa (Tabla 11) (Martínez-López, 2004). La relación de cobalto con zinc se debe a la posible mezcla de sedimentos derivados de rocas básicas y ácidas, sobre todo en las márgenes litorales del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

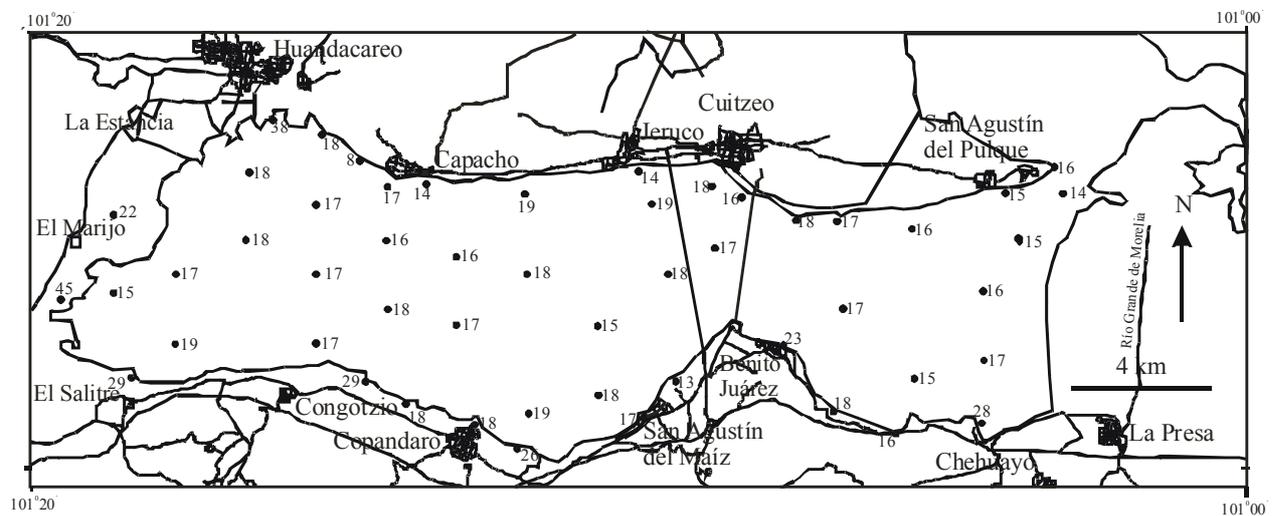


Figura 41. Distribución de cobalto (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de níquel

Los sedimentos del lago de Cuitzeo contienen valores bajos de níquel (Fig. 42), en promedio (28.7 ppm). El valor más alto se localiza en la margen poniente del lago (75 ppm) y el más bajo en el límite oriente del lago (14 ppm). Se encontró que el níquel se asocia fuertemente al  $Fe_2O_3$  total y al MnO. Tiene correlación positiva con Cr, V, Co, Cu y Zn y Pb (Tabla 11). Estos elementos se encuentran en las redes cristalinas del olivino, piroxenos y anfíboles, donde sustituyen a elementos como el magnesio, ya sea en la etapa magmática o en la hidrotermal (Ottonello, 1997).

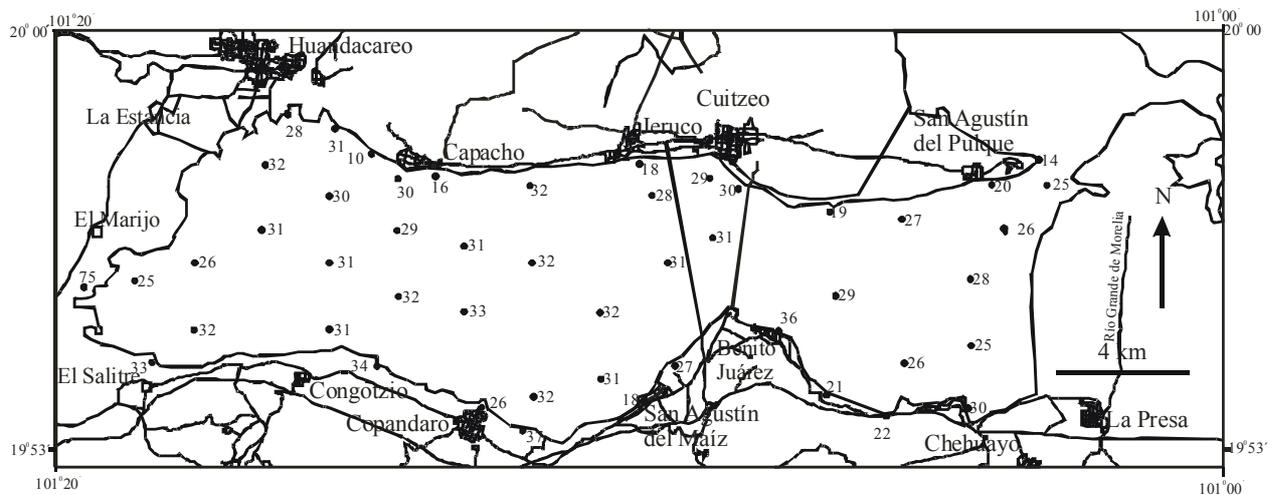


Figura 42. Distribución de níquel en sedimentos (ppm) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

### Distribución de cobre

El promedio de Cu es de 23.4 ppm, la mayor concentración se determinó en el límite oeste del lago 44 ppm y el valor más bajo 8 ppm en la margen oriente del lago a la altura de San Agustín del Pulque (Fig. 43).

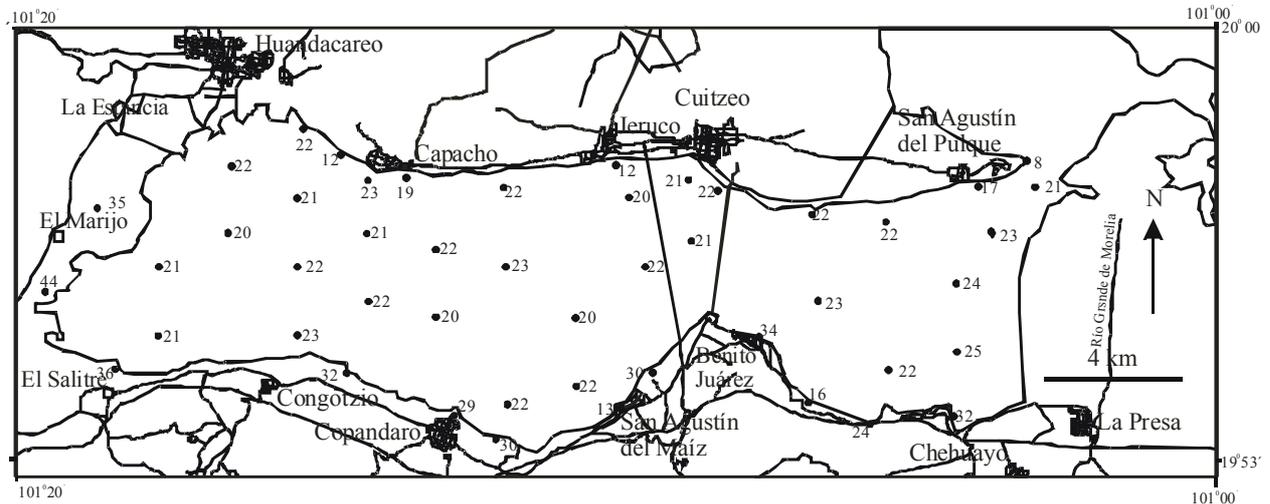


Figura 43. Mapa de distribución de cobre (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

El Cu mantiene una relación significativa con Cr, V, Co, Ni, Zn y Pb (Tabla 11). También tiene una relación importante con el  $Fe_2O_3$  y con el  $MnO$ , quizá la relación con estos sea por absorción del cobre, la relación con el zinc y el plomo es en su afinidad por las rocas ácidas y por ser fuentes de contaminación antropogénica.

### Distribución de zinc

El promedio de este elemento es de 89.5 ppm, las proporciones máximas se localizaron en el flanco oeste del lago (137 ppm) y hacia el sector sur cercano al poblado de Chehuayo 149 ppm (Fig. 44). La tendencia de distribución de este elemento es tener valores más elevados en las zonas litorales, en donde se presentan los porcentajes mayores de líticos. Presenta relación significativa con vanadio, cobalto, alta con cobre y en menor proporción con níquel (Tabla 10). Las correlaciones son las mismas que para el cobre ya que estos elementos tienen afinidad química por lo que se reemplazan en las estructuras cristalinas de los minerales.

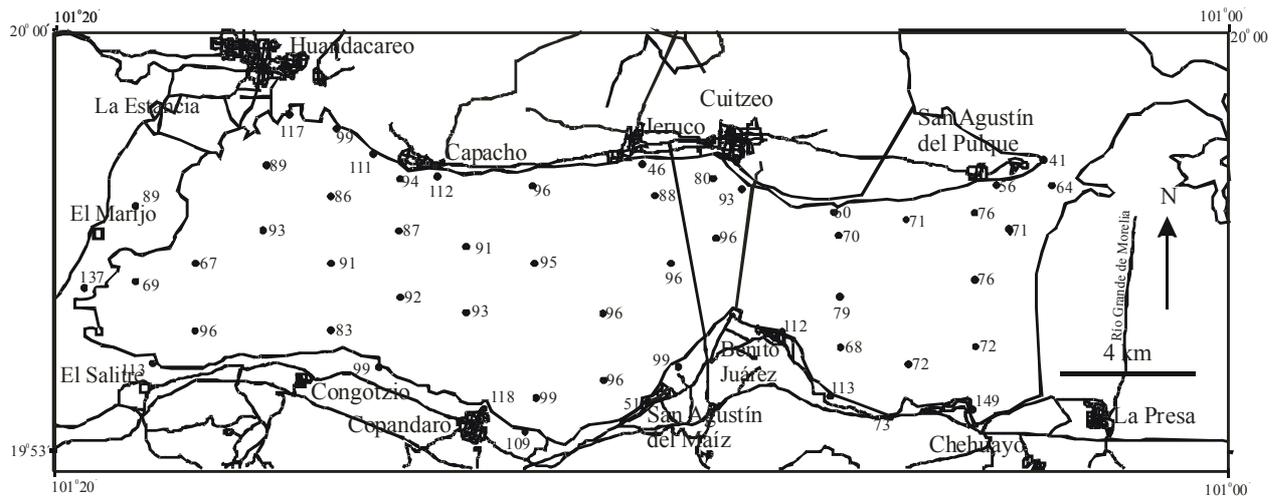


Figura 44. Distribución de Zn (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Distribución de plomo

El promedio de plomo es de 17.8, su valor más alto (28 ppm) se encontró en las cercanías del poblado de Benito Juárez y el menor (9 ppm) en la margen litoral norte cercana al poblado de San Agustín del Pulque (Fig. 45). Las relaciones de plomo con el cobre, zinc, pueden ser debidas a su asociación en la mineralogía de las rocas ácidas de la Cuenca de Cuitzeo

La comparación de promedios de elementos entre los arroyos y el lago sugieren que el cromo, níquel, cobalto y plomo se han movilizad por debajo de sus valores de fondo hacia el lago y que el ambiente químico no permite su estabilidad en los sedimentos del lago. Las cantidades de cobre y zinc en los sedimentos superan ligeramente los promedios de fondo. Esto conduce a inferir contaminaciones antrópicas locales.

La contaminación de los sedimentos del Lago de Cuitzeo es baja según la normativa holandesa (tabla 12), se aprecia que uno de los elementos con mayor presencia es el cromo.

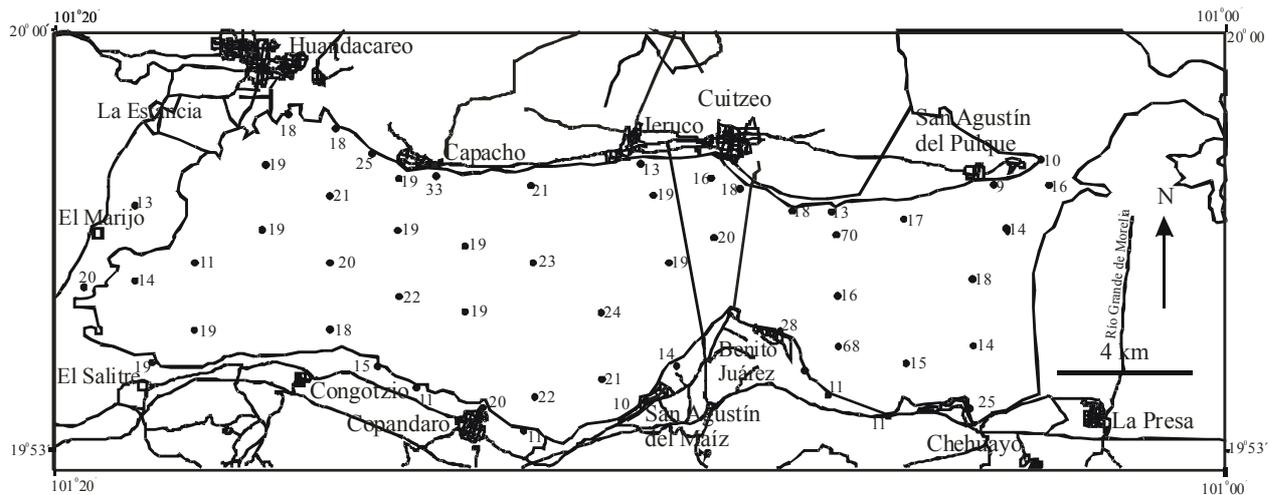


Figura 45. Distribución de plomo (ppm) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Tabla 12. Comparación de valores de elementos traza del sedimento del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo vs valores de la normativa holandesa\*

Elemento	Ba	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
Promedio de sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (ppm)	482.7	72.8	18.7	28.7	23.4	89.5	17.76
Suelo no Contaminado (mg/l)	200	0.1	20	0.1	0.1	0.5	3.65
Suelo Contaminado (mg/l)	2000	800	300	500	500	3000	600

\* Ver anexo XVII

### Índice de alteración química.

La Cuenca de Cuitzeo se caracteriza por afloramientos de rocas ígneas de composición química muy variada (desde básica hasta ácida) predominantemente extrusivas. La intensidad de la alteración química depende del tipo de roca sobre la que actúa el intemperismo, así como del clima de la región. Los feldspatos (silicoaluminatos de calcio, sodio y potasio) son minerales esenciales presentes en los tipos de roca antes mencionados, cuando la alteración química los ataca remueve al calcio, sodio y potasio, razón por la que el aluminio de estos minerales se concentra en el residuo conforme avanza la alteración. Con esta idea, Nesbitt y Young (1982) propusieron el índice de alteración química (IAQ) como una relación entre los óxidos de estos elementos.

$$IAQ = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] * 100$$

Con los resultados de los análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), realizados a los sedimentos colectados en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se calculó el IAQ (Fig. 46), en esta determinación debe considerarse que en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo un porcentaje de la arcilla está disuelta y suspendida en el agua, debido a que esta tiene un pH superior a 9 y que las conchas de los organismos (ostrácodos) y el cementante de las arenas de lodo aportan porcentajes significativos de CaO y Na<sub>2</sub>O, esto influye en los resultados del IAQ ya que ocasiona que sus valores sean inferiores a los reales, con esta consideración se definió que el promedio del IAQ es de 61.7%.

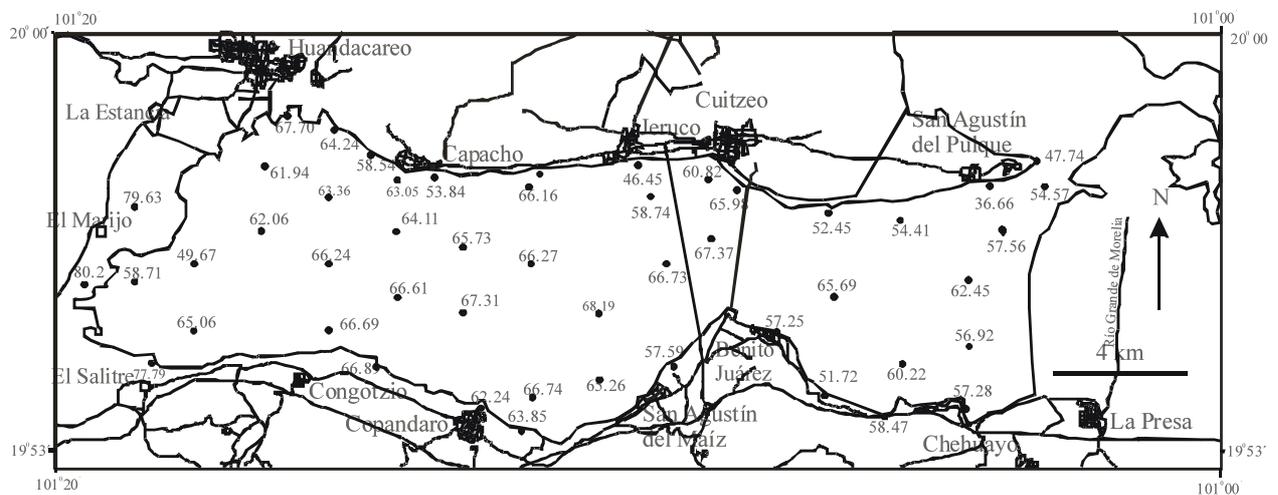


Figura 46. Distribución de los valores del IAQ del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Se observó que cuando los porcentajes de feldespatos son altos el IAQ disminuye, lo mismo sucede con los fragmentos de roca pues estos contienen feldespatos, este comportamiento se aprecia en la estación 4, localizada en el litoral noroeste.

El calcio contenido en los ostrácodos interfiere la determinación del IAQ, ya que el calcio presente en su concha disminuye sus valores, esto se ejemplifica con la estación 1, localizada en el litoral cercano al poblado de Jeruco que tiene el IAQ bajo (46.45) y alto contenido de ostrácodos (32 %) que es uno de los porcentajes más altos de estos organismos encontrados en el área de estudio (Anexo XV). Los valores más elevados del IAQ se ubicaron en la margen litoral poniente del lago (estación 17) en esta zona se presentan los valores máximos de arcillas, esto contribuye al incremento de los valores del IAQ.

Hacia el centro del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo prevalecen los lodos aglutinados, cuya composición mineralógica es sobre todo de montmorillonita, feldespatos y en menor proporción fragmentos de roca, piroxenos, anfíboles y olivino entre otros, estos minerales muestran ya una grado de alteración avanzada, que da por resultado que el IAQ sea superior al 60 %, a pesar de que la presencia de ostrácodos hace que el índice de madurez química sea inferior al real.

## 7. ANÁLISIS TEXTURAL

Las características texturales de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo son resultado de la gran extensión de este cuerpo de agua y su poca profundidad, que favorecen la interacción de las energías producida por el viento y las corrientes de agua, que resuspenden y mezclan constantemente a los sedimentos. También tienen efecto la composición química del agua y la fuerte evaporación, que dan lugar a la precipitación de bicarbonatos de sodio y carbonatos de calcio.

### **Tamaño promedio gráfico (MzØ)**

El tamaño de las partículas de los sedimentos refleja los factores que controlan cada ambiente de depósito y se calcula con la fórmula  $MzØ = (\Ø16 + \Ø50 + \Ø84)/3$ , misma que define el diámetro promedio de las partículas de una muestra (Folk, 1974).

El porcentaje del tamaño dominante en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo corresponde a las arenas finas (2.25 a 4Ø) y se aprecia en casi todo el lago (Fig. 47). Hacia las zonas noreste y norte del litoral, que comprenden las inmediaciones de los poblados de San Agustín del Pulque y Capacho, el (MzØ) determinado es de arenas medias (0.5 a 2.25Ø) en las áreas suroeste y oeste del lago se observan limos (4 a 5Ø) (Fig.48).

Los tamaños (MzØ) dominantes corresponden con las arenas finas y en menor proporción con los limos y reflejan la abundancia de las arenas de lodo y ostrácodos que se observaron al microscopio. Las arenas de lodo muestran una ligera tendencia a incrementar su tamaño con la profundidad, esta explicación se fundamenta en la abundancia de arcilla (montmorillonita) en las partes más profundas del lago, razón por la que su aglutinamiento les permite formar gránulos de mayor tamaño, los cuales se cementan con los bicarbonatos que precipitan. También tienen efecto en este proceso las sequías temporales que ha tenido el lago, pues concentran el agua con bicarbonatos y sedimentos en las zonas más profundas que son las que se secan en última instancia; al mismo tiempo, este tamaño de grano es más difícil de resuspender ya que el efecto de la energía eólica es inversamente proporcional a la profundidad del lago. Respecto al tamaño y abundancia de los ostrácodos, están en función de las características de los sitios donde se desarrollan, su distribución se hace más notable en las zonas afectadas por las descargas de aguas negras y en los sitios con vegetación enraizada, los tamaños dominantes observados de estos organismos (arenas finas) ocurren en las zonas de descargas residuales.

Los feldspatos tienen un amplio rango de tamaños, se aprecian desde arenas gruesas hasta limos y se destacan en el litoral rocoso, muestran dos tendencias de tamaños, uno se manifiesta en los sitios del litoral norte-noroeste del lago con dominio de las arenas gruesas y medias y el otro se observa en el litoral sur con predominancia de limos y en menor proporción arenas finas.

Las arenas de lodo contienen feldspatos en tamaños de limos. Los valores más significativos de fragmentos de roca y minerales pesados coinciden en tamaño y ubicación con los feldspatos. La bimodalidad entre el (MzØ) de los sedimento del litoral y el del interior del lago obedece básicamente al aglutamiento y cementación de los sedimentos del interior del lago que producen gran cantidad de tamaños de 2 a 5Ø.

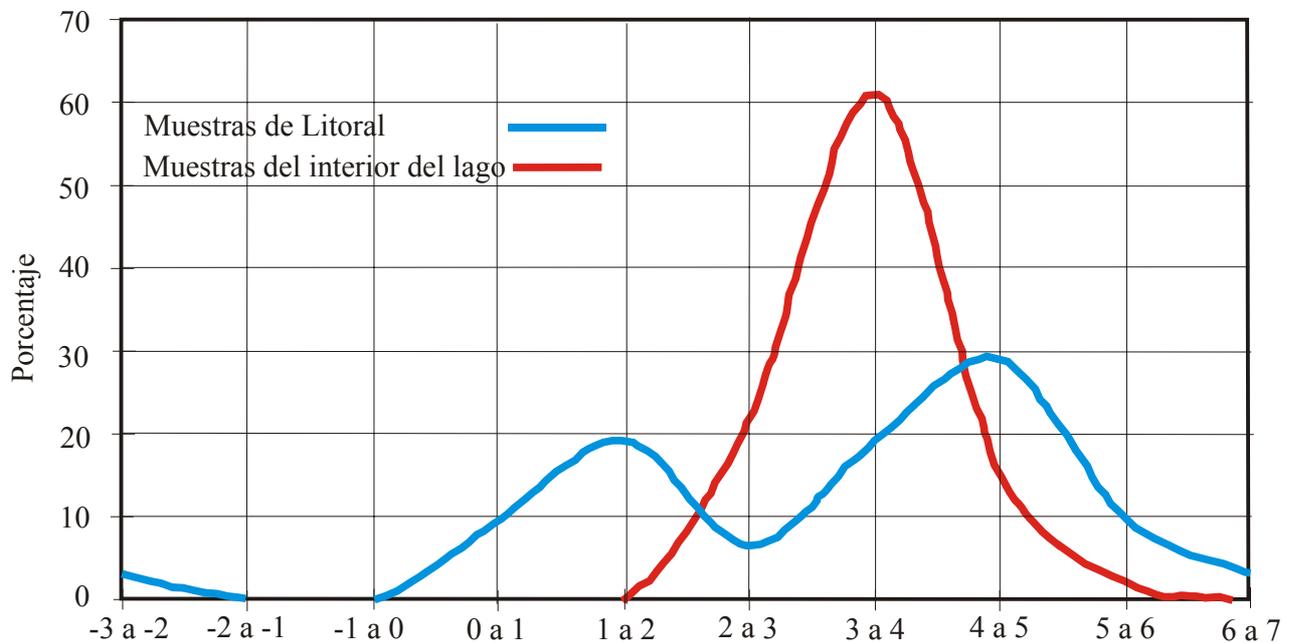


Figura 47. Porcentajes del tamaño promedio gráfico (MzØ) en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

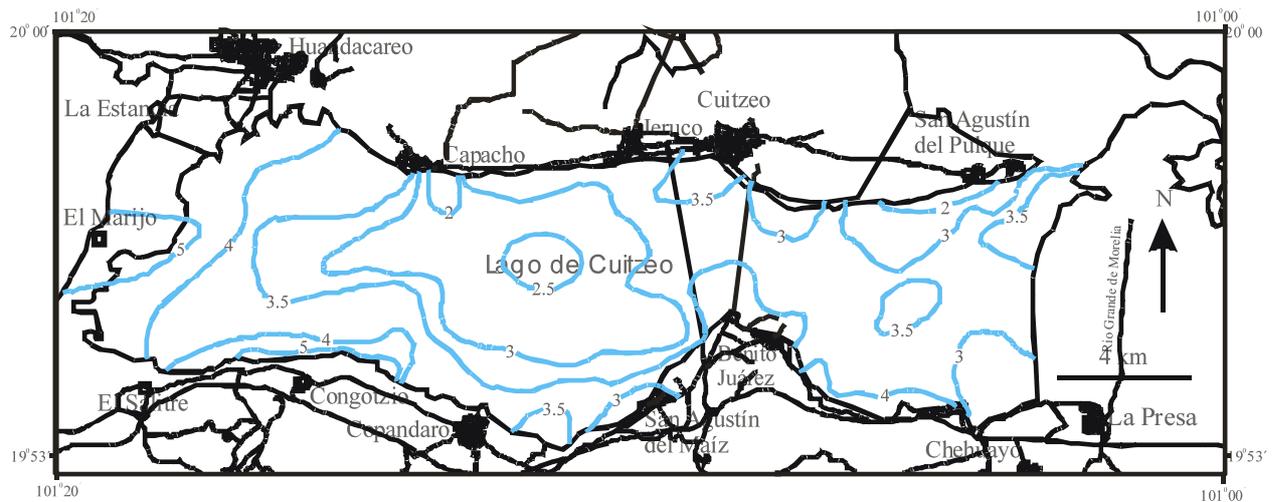


Figura 48. Distribución del tamaño promedio gráfico ( $Mz\phi$ ) de sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_1\phi$ )

La desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_1\phi$ ) valora la uniformidad o clasificación de los sedimentos y está determinada por la fórmula  $(\phi_{84} - \phi_{16})/4 + (\phi_{95} - \phi_5) / 6.6$  (Folk, 1974) (Tabla 13).

Tabla 13. Valores de clasificación de sedimentos (Folk, 1974).

Valor de $\phi$	Desviación estándar ( $\sigma_1\phi$ )
menor que 0.35	muy bien clasificada
0.35 a 0.5	bien clasificada
0.5 a 0.71	moderadamente bien clasificada
0.71 a 1	moderadamente clasificada
1 a 2	mal clasificada
2 a 4	muy mal clasificada
mayor que 4	extremadamente mal clasificada

La clasificación de los sedimentos está determinada por la variedad de tamaños en la muestra, la selección indica la forma en que se distribuyen los individuos de una población alrededor del valor central y depende en gran medida del tiempo de transporte y del ambiente de depósito.

Los porcentajes más elevados del ( $\sigma_1 \emptyset$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo corresponden con sedimentos muy mal clasificados (Fig. 49).

Los sedimentos mal clasificados (MC) y los muy mal clasificados (MMC) son los más frecuentes en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 50). Se observa que en todo el litoral prevalecen los sedimentos muy mal clasificados (MMC) producto de la fuerte mezcla entre las arenas procedentes del litoral rocoso con las arenas, limos y arcillas que entran al lago por las descargas de los arroyos; así como, con los sedimentos autigénicos (materiales producto de la precipitación química, arenas de lodo y biógenos). Hacia la parte central del Vaso Poniente se encuentran sedimentos mal clasificados (MC) caracterizados por elevados porcentajes de arenas de lodo asociadas con ostrácodos y en menor proporción con terrígenos.

Los tamaños de las arenas de lodo depende de la cantidad de arcilla aglutinada y del cementante que las une, esto ocasiona que las arenas de lodo no tengan tamaños uniformes en los sitios de formación, de esta manera contribuyen en la mala clasificación.

Los ostrácodos inciden en la clasificación granulométrica, sus dimensiones comprenden desde las arenas medias hasta limos, la forma de sus conchas permite que éstas se resuspendan y desplacen fácilmente en el agua, esto indica que los ostrácodos se depositan con tamaños menores de líticos y arenas de lodos.

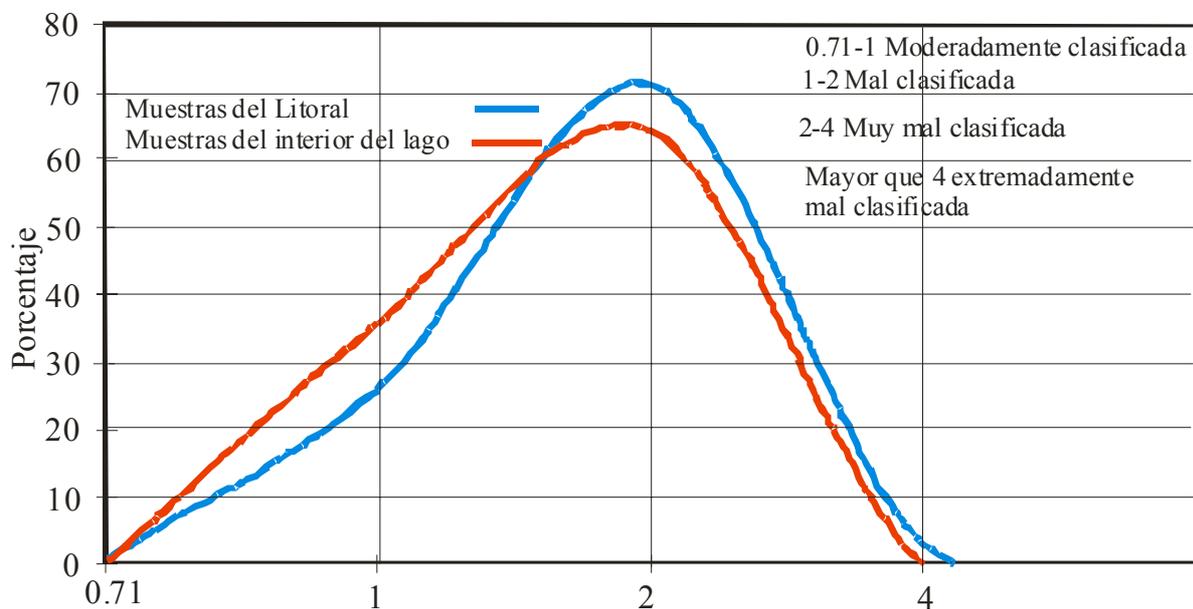


Figura 49. Desviación estándar gráfica inclusiva ( $\sigma_1 \emptyset$ ) en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

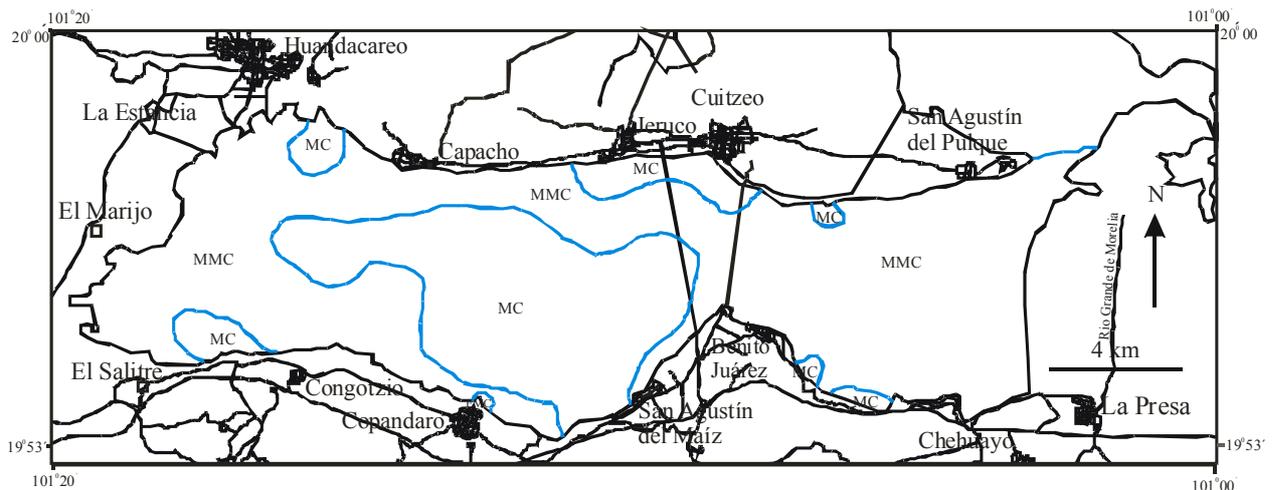


Figura 50. Distribución de la Desviación Estándar Gráfica Inclusiva ( $\sigma_{I\varnothing}$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo. MC = mal clasificado, MMC = muy mal clasificado, EMC = extremadamente mal clasificado.

Los feldespatos muestran diferencias en tamaño por zonas, esta característica es controlada por la procedencia de diferentes fuentes, aunque los feldespatos se depositan preferentemente en el litoral no dejan de tener incidencia en la clasificación granulométrica.

La zona central del lado poniente del área de estudio refleja poca influencia de las corrientes de arroyos; sin embargo, la energía eólica contribuye significativamente al movimiento y mezcla de estas partículas. El lado oriental del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se caracteriza por sedimentos muy mal clasificados compuestos por arenas de lodos y ostrácodos; así como feldespatos, fragmentos de roca y minerales pesados procedentes de los ríos y del litoral rocoso de San Agustín del Pulque y Chehuayo. La diversidad de composición y de áreas fuente, combinadas con las energías de las corrientes de los ríos y del viento ocasiona que las partículas se muevan por suspensión y saltación, dando lugar a una gran mezcla de tamaños que propician la muy mala clasificación.

Los arroyos que desembocan al lago por el lado oeste son de poca longitud, por lo que transportan sedimentos de fuentes cercanas, con poco tiempo de transporte que no les permite hacer una buena clasificación granulométrica, algunos arroyos con características similares se aprecian en el lado este del área de estudio.

Los Ríos Querendaro y Morelia tienen un recorrido importante desde su nacimiento hasta su desembocadura en el litoral oeste del Lago de Cuitzeo, esto les permite realizar una mejor clasificación de los sedimentos, sin embargo, existe una retención importante de éstos en la Presa de Coinzio ubicada al sur del Lago de Cuitzeo. También hay una sedimentación significativa de partículas terrígenas en la zona central del lago que está desarrollando una barrera en la que crece de manera abundante vegetación enraizada, misma que está seccionando al lago en dos vasos. Otra fuente de sedimentos es la planicie del paleolago, cuyas escorrentías transportan partículas preferentemente finas hacia el lago actual.

Los procesos que originan los grados de clasificación en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo dependen de la combinación de corrientes fluviales que desembocan al lago, con la energía producida por el viento, bajo el predominio del transporte por saltación y suspensión, procesos que son más notorios en el interior del lago, con la subsiguiente mezcla de sedimentos híbridos (terrígenos + biógenos + autógenos) de tamaños muy diversos.

### **Grado de asimetría gráfica inclusiva ( $SK_I$ )**

El grado de asimetría ( $SK_I$ ) valora el sesgo o asimetría de una curva hacia el material fino o grueso. Las curvas de frecuencia pueden presentar similitudes en tamaño promedio y clasificación; sin embargo, una puede ser simétrica y la otra asimétrica. La medida del grado de asimetría es evaluar si una curva es asimétrica hacia la izquierda o hacia la derecha, de manera que las curvas con asimetría positiva representan a las muestras con un exceso de material fino, mientras que las que muestran asimetría negativa contienen un exceso de material grueso (Folk, 1974) (Tabla 14). La asimetría es una medida independiente de la selección e indica predominio de una población con respecto a la otra y relaciona la separación de los extremos (colas) de la población con la media. La asimetría de una curva de frecuencia es un indicio de la contaminación de sedimentos con otros. Generalmente las muestras fuertemente asimétricas son el resultado de mezcla en los ambientes sedimentarios. El estudio del grado y signo de la asimetría de una curva de frecuencia, permite inferir que tipo de granulometría es la dominante y cual es la subordinada en determinados sedimentos. La fórmula que determina el ( $SK_I$ ) es la siguiente:

$$(SK_I) = (\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{84} - \phi_{16}) + (\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}) / 2(\phi_{95} - \phi_5)$$

En la zona litoral del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, se determinó que la granulometría es asimétrica hacia los finos (AF), hacia el interior del lago los sedimentos son muy asimétricos hacia los finos (MAF) (Fig. 51). A lo largo del litoral se observan algunas zonas pequeñas con valores de simetría (S) como se aprecia en el litoral del poblado de Chehuayo y asimetría hacia los gruesos (AG) en el litoral cercano a los poblados de Benito Juárez y Capacho.

Tabla 14. Valores del grado de simetría ( $SK_I$ ) (Folk, 1974).

Valor de la asimetría	Grado de sesgo ( $SK_I$ )
1.00 a 0.30	Muy asimétrico hacia los finos
0.30 a 0.10	Asimétrico hacia los finos
0.10 a -0.10	Simétrico
-0.10 a -0.30	Asimétrico hacia los gruesos
-0.30 a -1.00	Muy asimétrico hacia los gruesos

La asimetría hacia los Finos en el Lago de Cuitzeo indica que los ríos Querendaro y Morelia están aportando sedimentos finos al vaso poniente, ya que las partículas más gruesas se sedimentan en el entorno a la desembocadura de los ríos. Los arroyos que drenan al vaso poniente son de poca longitud, por lo que transportan sedimentos de áreas fuentes cercanas, preferentemente con materiales finos. El aglutinamiento y cementación de lodos produce un tamaño dominante de arenas finas. Los ostrácodos presentan tamaños de arenas finas y limos. Los aportes terrígenos y las partículas autigénicas depositados en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo son predominantemente finos, existe además una fuerte mezcla entre ellos, razones por las que el  $SK_I$  es preferentemente asimétrico hacia los finos (Fig. 52).

Las combinaciones de energía son más altas en las zonas litorales, razón por las que ahí se encuentran los sedimentos más gruesos.

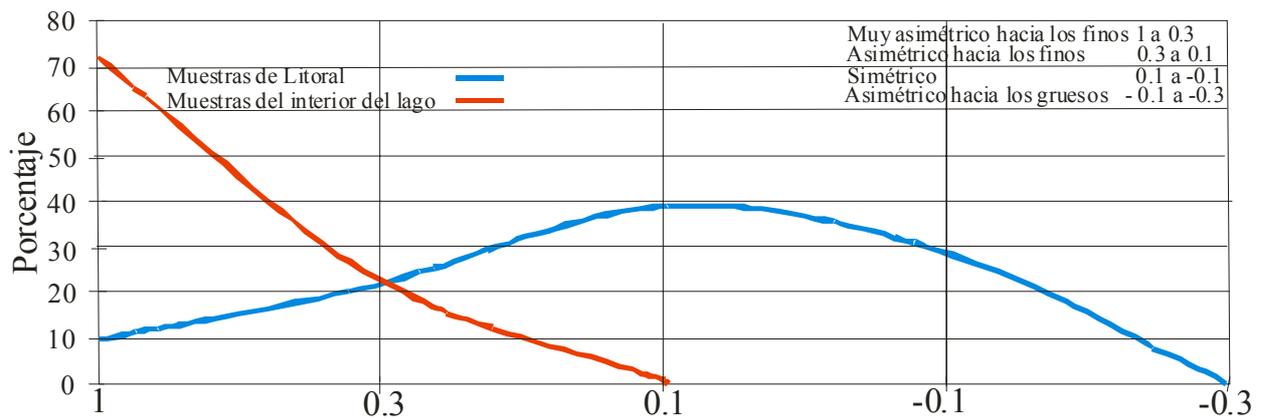


Figura 51. Grado de Asimetría Gráfica Inclusiva ( $SK_1$ ) en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

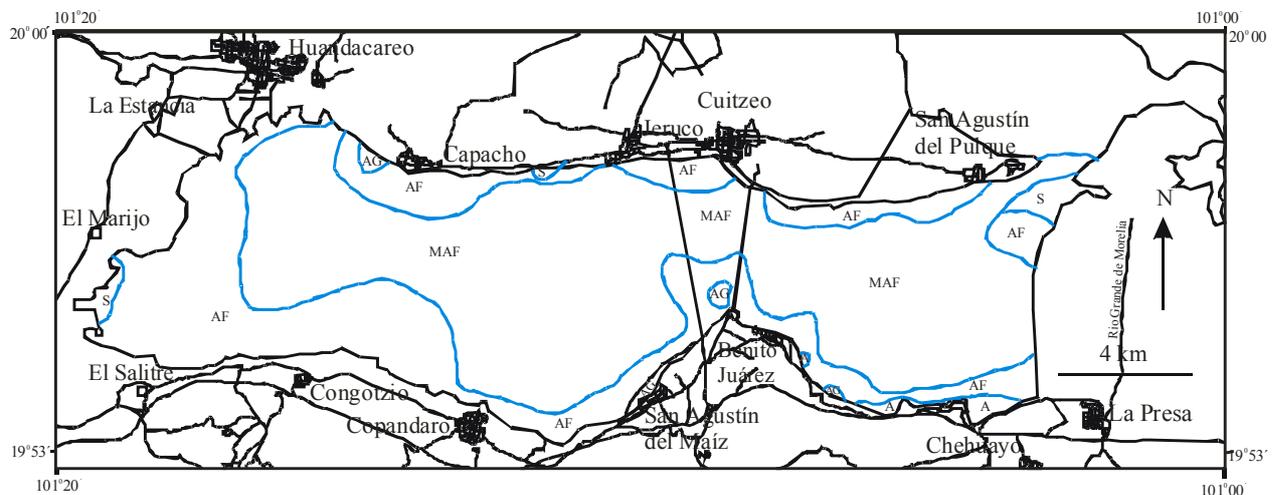


Figura 52. Distribución del Grado de Asimetría Gráfica Inclusiva ( $SK_1$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo. MAF = muy asimétrico hacia los finos, AF = asimétrico hacia los finos, S = simétrico, AG = asimétrico hacia los gruesos.

**Curtosis gráfica ( $K_G$ )**

La curtosis gráfica ( $K_G$ ) determina si una curva de frecuencia unimodal es aplanada o alargada, de manera que si presenta un pico muy agudo es leptocúrtica, si presenta una zona horizontal en el máximo es platicúrtica y si es similar a la normal, se considera mesocúrtica. Esta medida refleja en cierto modo los tamaños de grano que hay en la muestra y su distribución. En una curva platicúrtica el sedimento es muy disperso (mal seleccionado) y en una leptocúrtica los sedimentos son poco dispersos (bien seleccionados), la ecuación con la que se determinan los rangos de curtosis (Tabla 15) es la siguiente:

$$(K_G) = (\sigma_{95} - \sigma_5) / 2.44 (\sigma_{75} - \sigma_{25}).$$

Tabla 15. Curtosis gráfica ( $K_G$ ).

Rango	Curtosis
< 0.67	Muy platicúrtico
0.67 a 0.90	Platicúrtico
0.90 a 1.11	Mesocúrtico
1.11 a 1.50	Leptocúrtico
1.50 a 3.00	Muy leptocúrtico
> 3.00	Extremadamente leptocúrtica

La curtosis gráfica en los sedimentos del interior del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es ligeramente más leptocúrtica que en el litoral del mismo (Fig. 53).

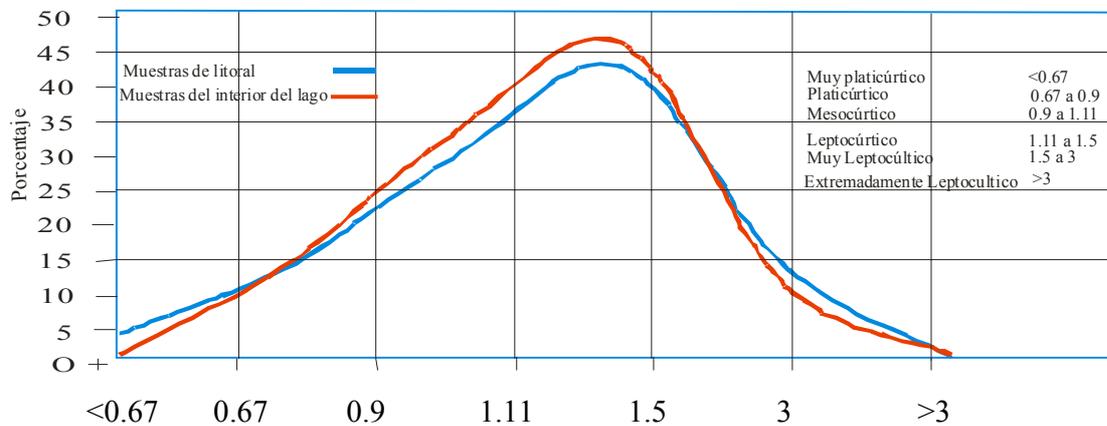


Figura 53. Curtosis Gráfica de sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

La curtosis gráfica del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es muy variada, ya que sus valores son tanto leptocúrtica como muy leptocúrticas, mesocúrticas y platicúrticas (Fig. 54), estas características tienen una relación muy importante con la clasificación granulométrica del lago.

Los coeficientes de correlación entre los parámetros texturales infieren una correspondencia significativa entre la desviación estándar y la curtosis, ya que al aumentar la mala clasificación, las curvas de frecuencia son más platicúrticas (Fig. 55).

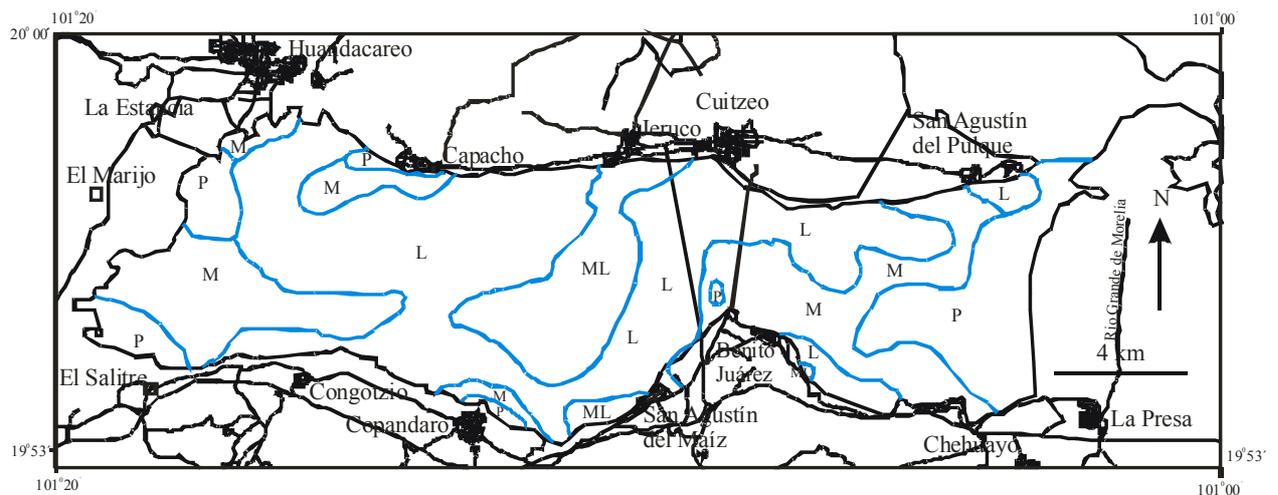


Figura 54. Distribución de la Curtosis Gráfica de sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo. P = platicúrtica, M = mesocúrtica, L = leptocúrtica, ML = Muy platicúrtica.

Mientras menos clasificados sean los sedimentos más platicúrticos y *viceversa* mientras mejor clasificados estén los sedimentos se vuelven más leptocúrticos, es decir, a mayor dispersión del tamaño de grano, la gráfica es más aplanada. La mayoría de las estaciones tienen sedimentos mal clasificados y muy mal clasificados, que coinciden con valores de  $SK_I$ , desde mesocúrtica hasta muy leptocúrtica.

Las arenas aumentan sus porcentajes de las márgenes litorales hacia el centro del lago (Fig. 56), la explicación de valores altos de arena en el centro del lago, es por la gran formación autógena de arenas de lodo y por la presencia de conchas de organismos con estos rangos de tamaño y su concentración por los mecanismos de transporte en las partes más profundas del lago.

Los limos son más cuantiosos en las áreas litorales, sus valores decrecen notablemente hacia el centro del lago (Fig. 57). Las arcillas presentan porcentajes muy bajos, sus valores máximos se encuentran en el litoral suroeste del lago y los mínimos en el centro del lago (Fig. 58).

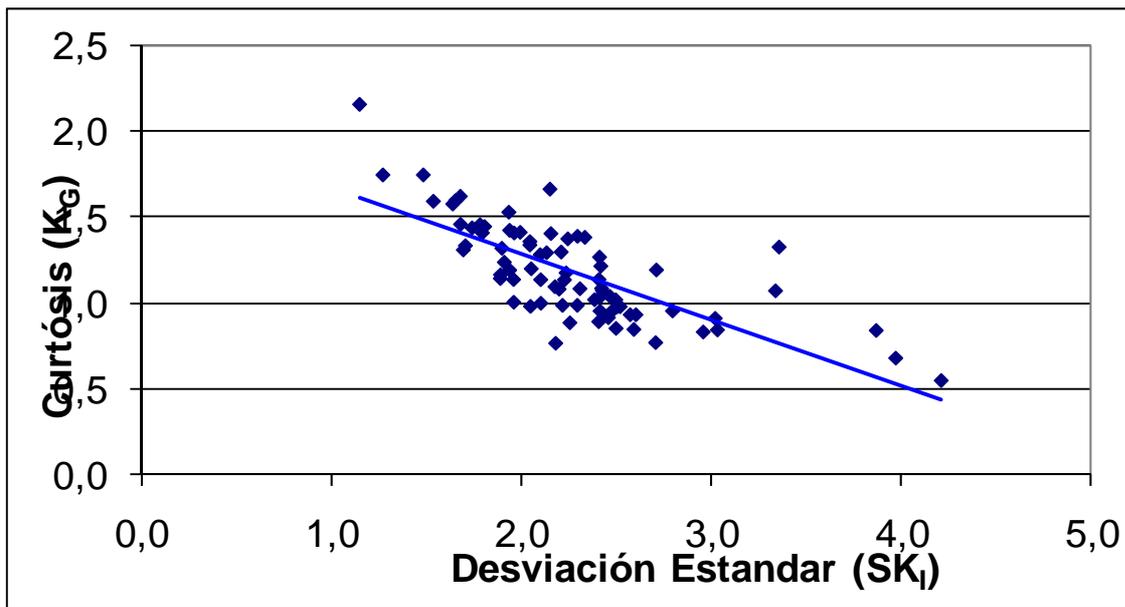


Figura 55. Correlación entre curtosis ( $K_G$ ) y simetría ( $SK_I$ ) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Los lodos (limos + arcillas) son dominantes al suroeste del área de estudio (Fig. 59). El aporte de arcillas al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es muy alto; sin embargo, su aglutinamiento y cementación forman arenas de lodo, lo que hace que decrezca el contenido de tamaños de arcillas y aumente el de arenas.

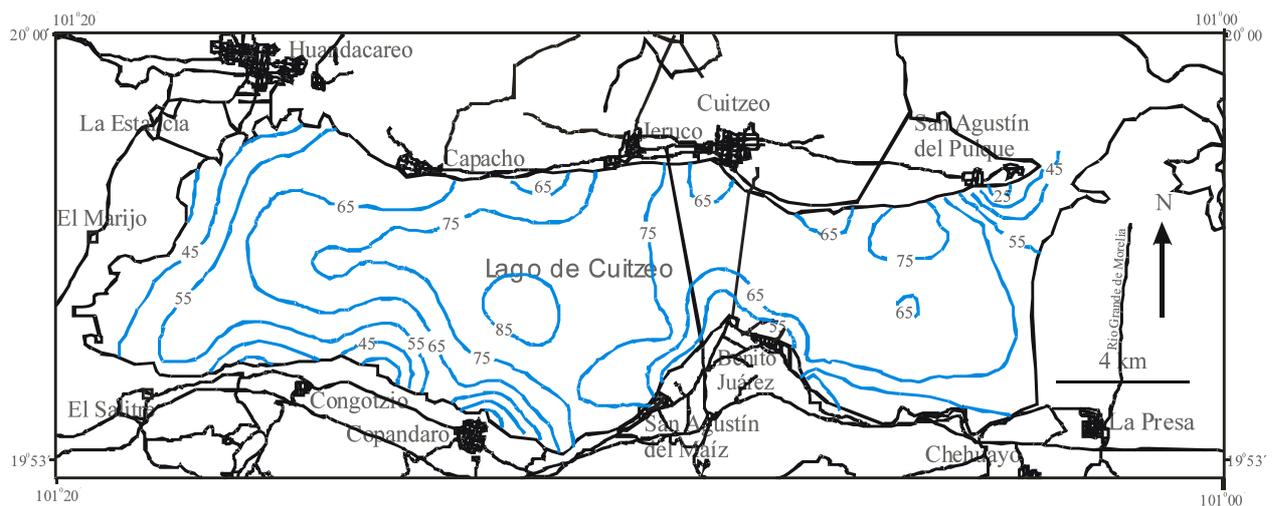


Figura 56. Distribución de arenas (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

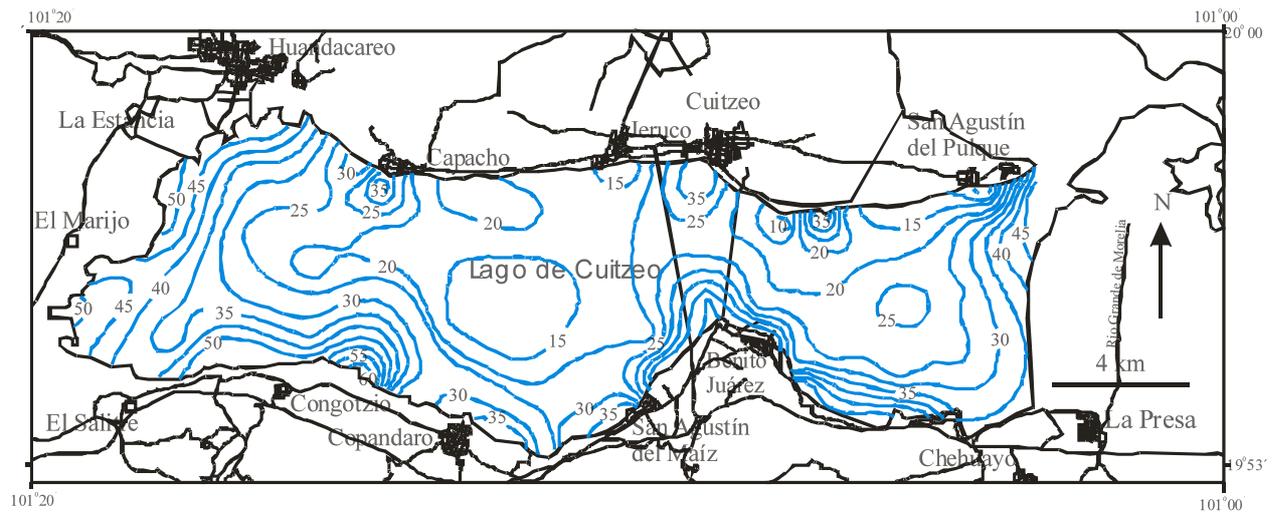


Figura 57. Distribución de Limos (%) del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

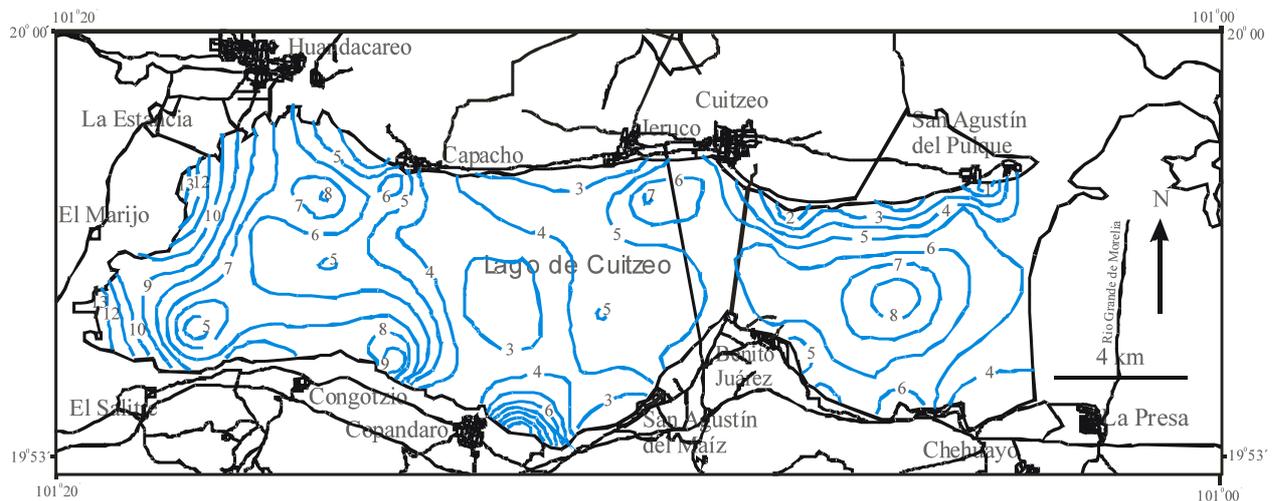


Figura 58. Distribución de arcillas (%) en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Los porcentajes elevados de arenas de lodo son el resultado del aglutinamiento y cementación de lodos en un medio con pH alcalino (mayor que 9) con altas concentraciones de carbonatos, con condiciones climáticas propicias para sequías temporales y fuerte evaporación.

El desarrollo de biógenos (ostrácodos) con tamaños predominantes de arenas y limos representa un aporte significativo en la distribución de tamaños. En contraste, las arenas terrígenas se encuentran en mayor proporción en la zona litoral, que en las partes profundas del lago.

Los bajos contenidos de arcilla están determinados por las características químicas del agua que las mantiene en suspensión y solución, mientras que la arcilla que forma parte de los sedimentos se aglutina incrementando su tamaño.

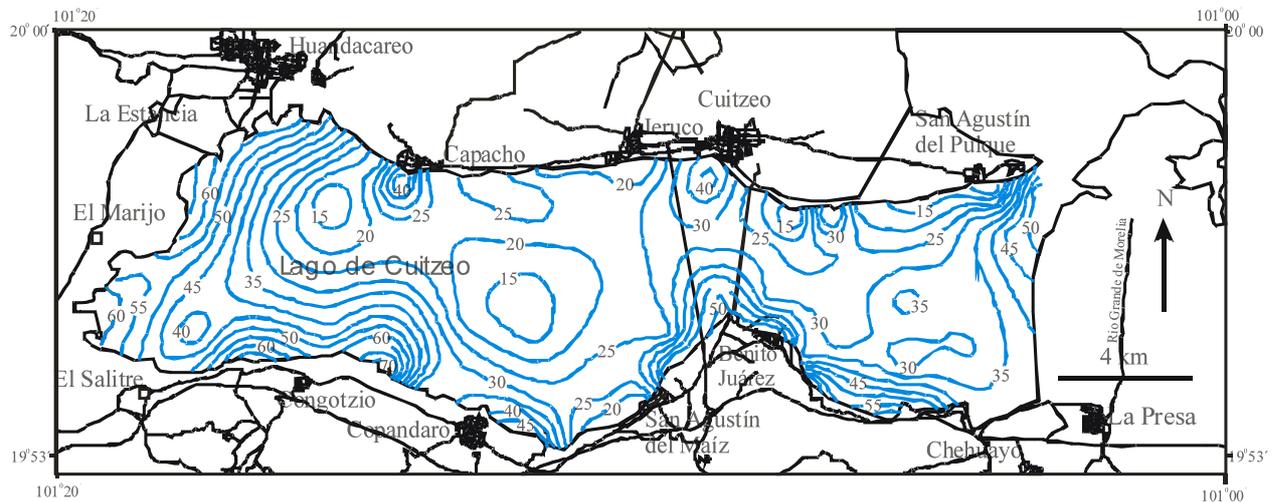


Figura 59. Distribución de lodos (%) en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Las corrientes acuáticas y el viento interactúan fuertemente, incidiendo en los mecanismos de transporte y propician que exista una combinación entre el movimiento de partículas por saltación y por suspensión y por ello se produce una fuerte mezcla de sedimentos que dan lugar a la pobre clasificación granulométrica en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo. La abundancia de arenas de lodo es resultado de un proceso de aglutinamiento y cementación de arcillas, para estimar los porcentajes de limo y arcilla que intervienen en dicho proceso se seleccionaron algunas muestras representativas y se dispersaron con ultrasonido (Figs. 60 a 62). Se estableció que los porcentajes de arcillas y limos se incrementaron de manera significativa, en consecuencia los porcentajes de arena disminuyeron drásticamente en todas las muestras, esto indica que las arcillas y limos aumentan su tamaño por su aglutinamiento y cementación.

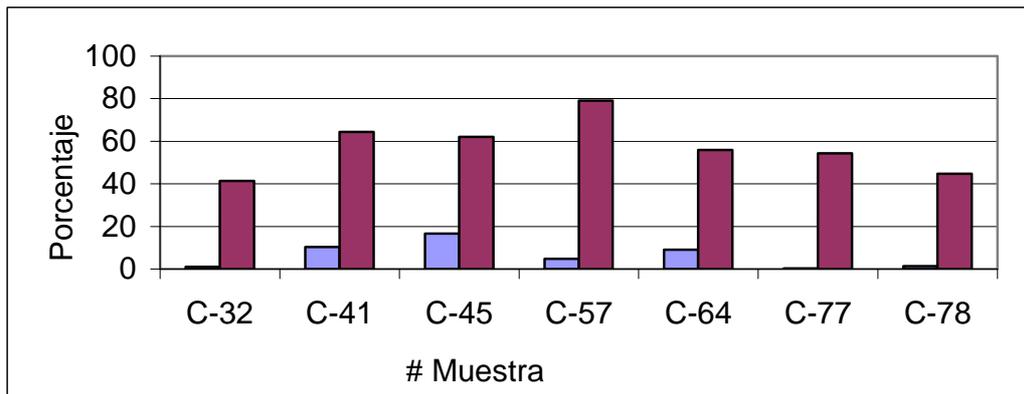


Figura 60. Comparativo entre los porcentajes de arena original ■ y arena dispersada con ultrasonido (US) ■ del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

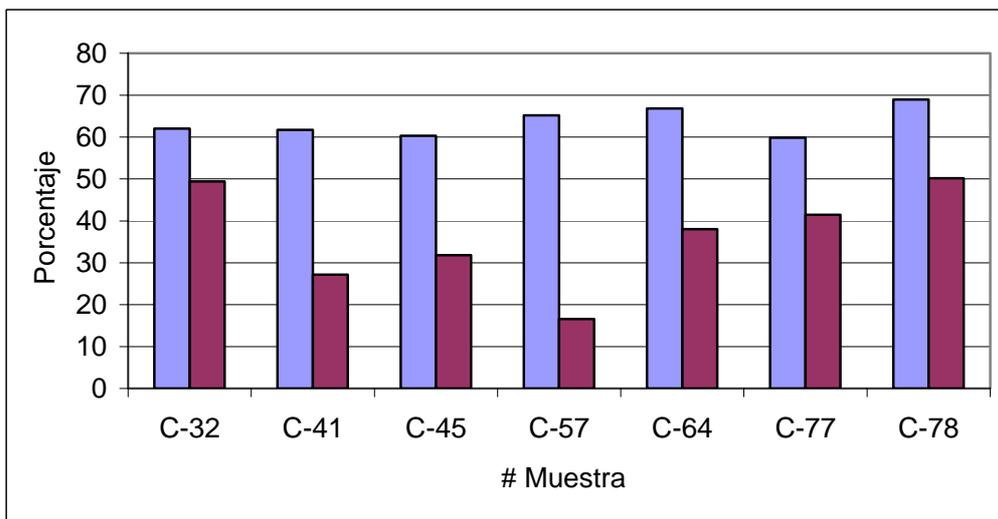


Figura 61. Comparativo entre los porcentajes de limo original ■ y el limo dispersado con ultrasonido (US) ■ en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

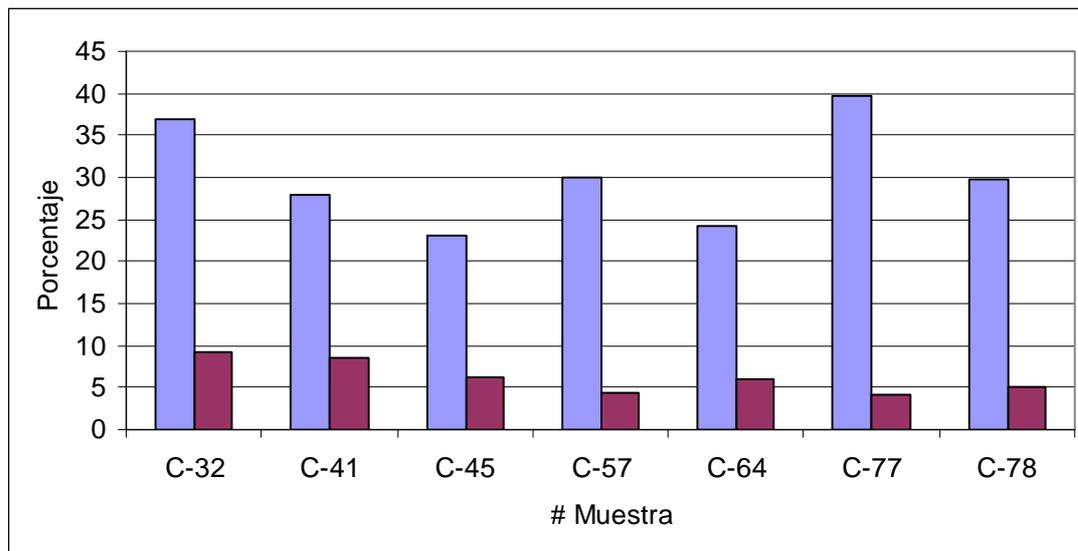


Figura 62. Comparativo entre los porcentajes de arcilla original ■ y la arcilla dispersada con ultrasonido (US) ■ del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

### Mecanismos de transporte

La interpretación de la relación entre los medios de transporte y la distribución granulométrica en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se apoyó en los trabajos de Visser (1969). El análisis se efectuó con las curvas que resultaron de graficar el porcentaje acumulativo contra el tamaño  $Mz\phi$  (Figs. 63 a 72). En la muestra C-4 (Fig. 63) la tracción ocurrió desde las gravas hasta el  $Mz\phi = 0.26$ ; la saltación desde el  $Mz\phi = 0.26$ , hasta los tamaños de arenas ( $Mz\phi = 3$ ); la suspensión presenta dos poblaciones: la primera comprende el rango  $3\phi$  a  $8.5\phi$  y la segunda contempla la parte arcillosa. La tracción contiene el 32.5%, la saltación el 47.6% y la suspensión el 19.95%, la muestra fue colectada en el litoral cercano al pueblo de Capacho, donde bajan algunos arroyos con descargas de aguas negras que producen turbulencia, la cual se infiere en los puntos de inflexión abruptos de la curva.

La muestra C-5 (Fig. 64) no contiene gravas, lo que permite suponer que el transporte por tracción es incipiente, el cual se da solo en la parte de arenas gruesas ( $Mz\phi = -0.3$ ); la saltación presenta dos poblaciones: la primera de ellas va de este último punto hasta el valor  $3.25\phi$  (arenas finas), la segunda población abarca desde el  $3.25\phi$  hasta el  $7.5\phi$ ; la suspensión comprende desde este punto hasta el final de la curva de la distribución granulométrica. Los puntos de inflexión de esta curva no

son tan abruptos, esta muestra se colectó en el litoral cercano al pueblo de Huandacareo, en la zona de descarga del Arroyo Blanco.

La muestra C-16 define una recta larga de transporte por saltación (95.5%), el punto de inflexión que da paso a la población en suspensión es suave y está muy bien definido (Fig. 65); el límite entre ambas poblaciones se precisa en el tamaño 8 MzØ. Esta muestra contiene el 10% de arcillas y se colectó en el litoral cercano al poblado El Salitre, la saltación se forma por la influencia del canal que conduce el agua de los manantiales de la Alberca y del viento que corre de suroeste a noreste. La muestra C-18 presenta tracción en el 23.1% y hasta el tamaño -1Ø; el porcentaje en saltación es amplio casi el 70%, la inflexión hacia el transporte en suspensión es abrupta (Fig. 66) indicativa de turbulencia. La muestra fue tomada en el flanco norte del lago que es un litoral rocoso, la tracción se presenta por lo somero de la estación y por el flujo de las corrientes del Río Morelia que se mueven a lo largo del litoral en sentido este-oeste.

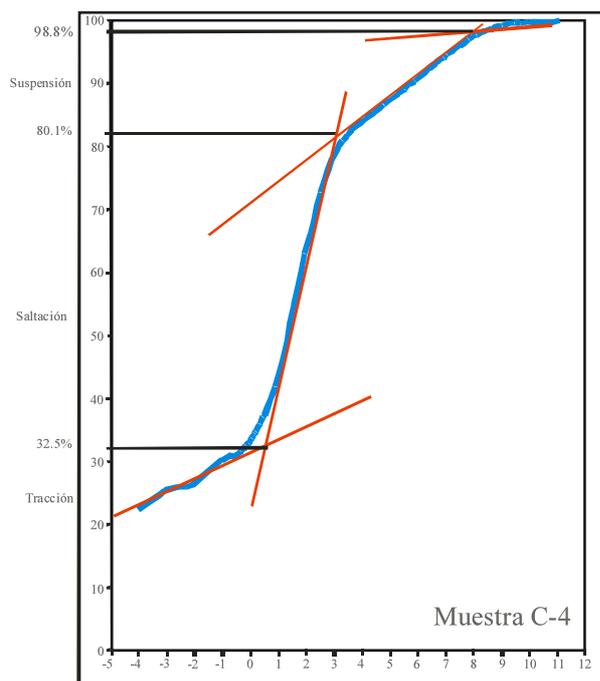


Figura 63. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-4.

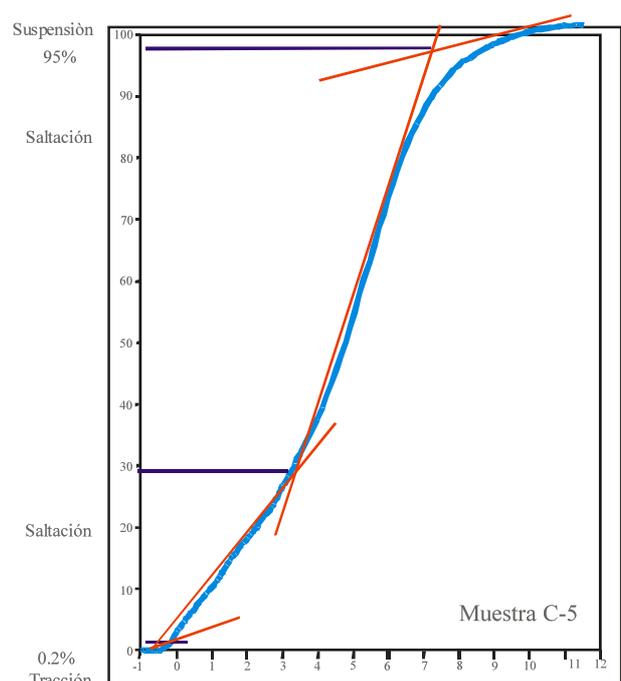


Figura 64. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-5.

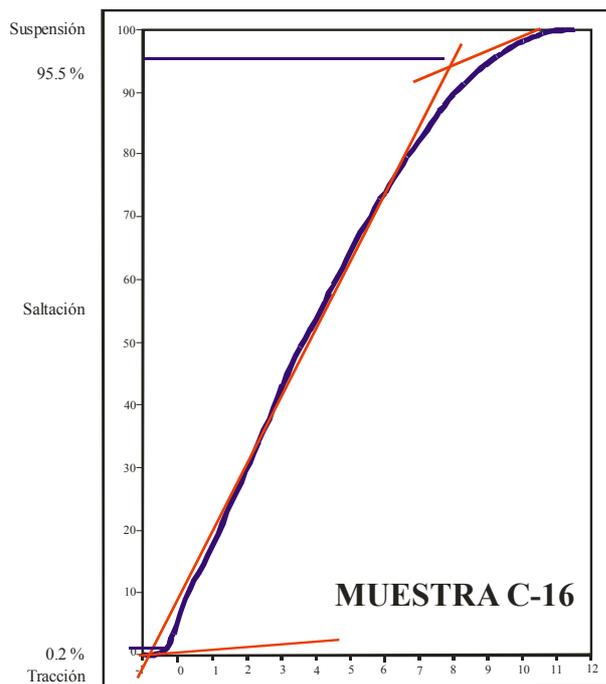


Figura 65. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-16.

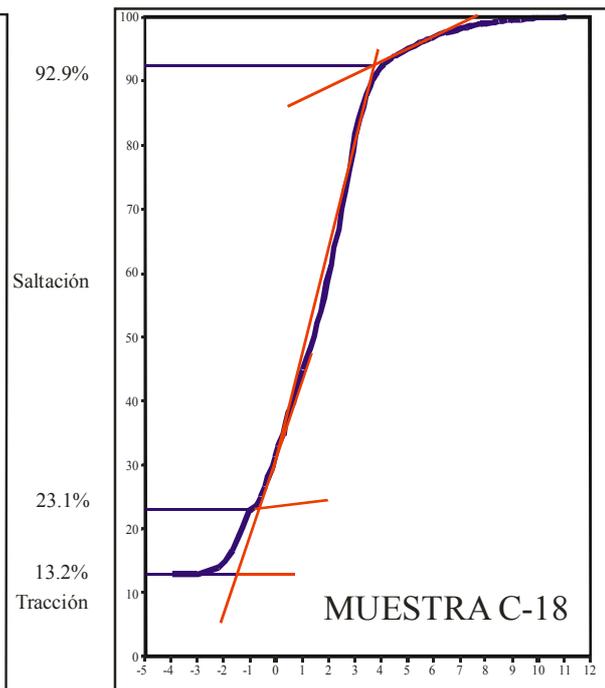


Figura 66. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-18

La muestra C-33 define muy bien sus tres poblaciones de transporte. Se aprecia una recta amplia en la saltación que cambia con una inflexión moderada a la población en suspensión (Fig. 67). En el sitio de colecta no se aprecian entradas de arroyos, sin embargo, es el lugar por donde entran los vientos del suroeste al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo y estos tienen fuerte incidencia en el desplazamiento de los sedimentos en el interior del área de estudio. Se determinó un porcentaje alto de arenas y limos.

La muestra C-36 ubicada en el extremo occidental del lago define muy bien sus tres poblaciones (Fig. 68) prácticamente no existe la tracción, la suspensión contiene el 21%. Es la zona de influencia del Arroyo Blanco, las características de flujo poco turbulento favorecen el transporte por saltación y la suspensión.

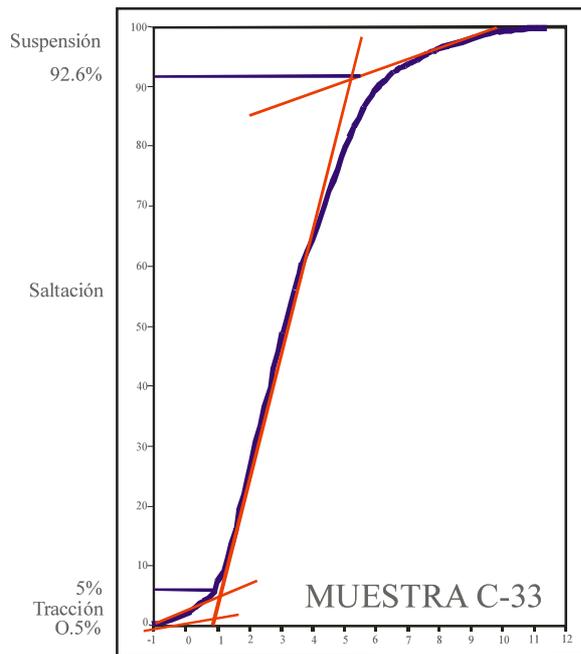


Figura 67. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-33.

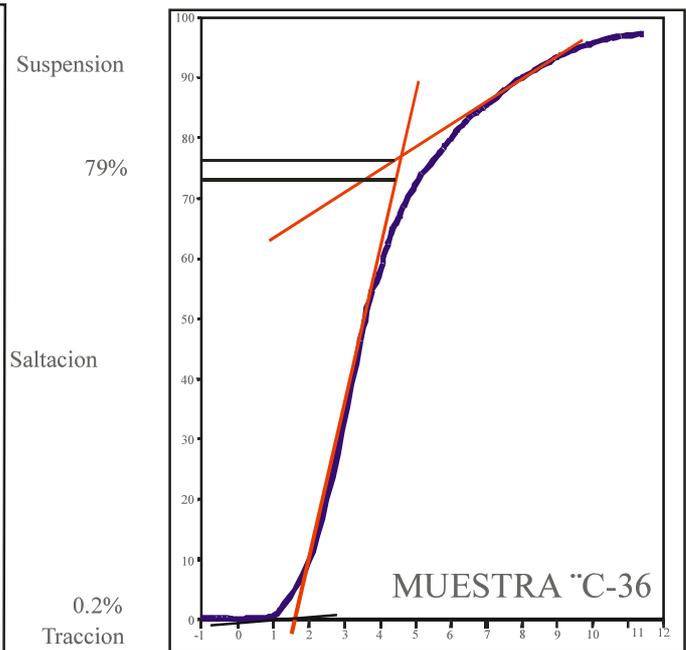


Figura 68. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-36.

La muestra C-47 se colectó en el litoral cercano al poblado de Copándaro, en esta zona bajan varios arroyos de los cerros localizados al sur del lago, los cuales, junto con la energía del viento logran mover las partículas de arena por tracción (Fig. 69). La muestra C-59 fue tomada cerca de la autopista Morelia-Salamanca donde se forma turbulencia, por el choque del viento con el bordo de la carretera, por esta razón, la inflexión entre la saltación y la suspensión es abrupta (Fig. 70).

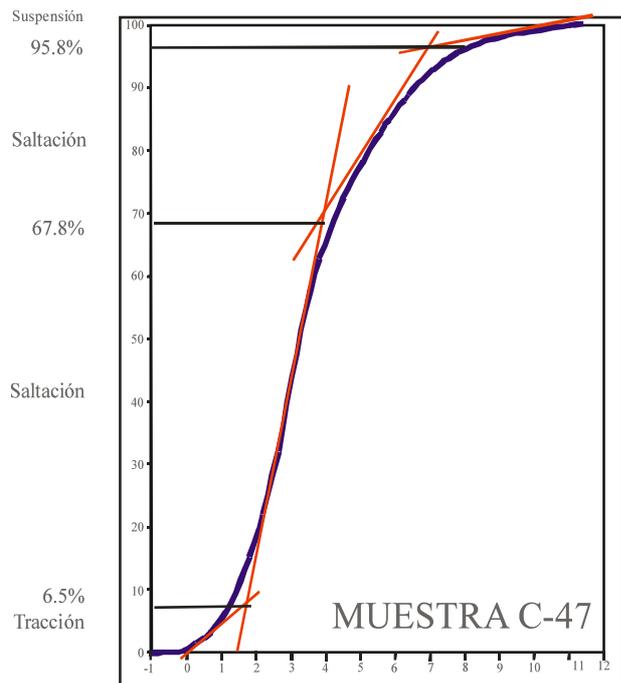


Figura 69. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-47.

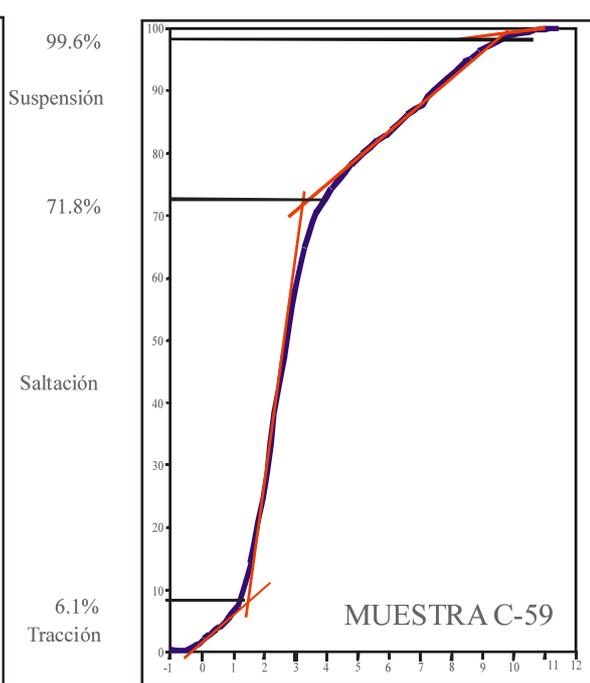


Figura 70. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-59.

La muestra C-66 se obtuvo en el lado oriente de la carretera a Cuitzeo, en el paso de la corriente que conduce el agua al lado poniente de la misma, la fuerte flexión de la curva entre las poblaciones en saltación y suspensión (Fig. 71) es indicativa de la turbulencia que se forma al pasar el agua por la compuerta angosta que se localiza por debajo de la carretera. Se identifican dos poblaciones en suspensión. La muestra C-43 (Fig. 72) pertenece a la zona del litoral, en Capacho, y en ella se definen muy bien sus tres poblaciones, en la zona de influencia del Arroyo Las Peñas (Fig. 6) y algunos drenajes de aguas negras.

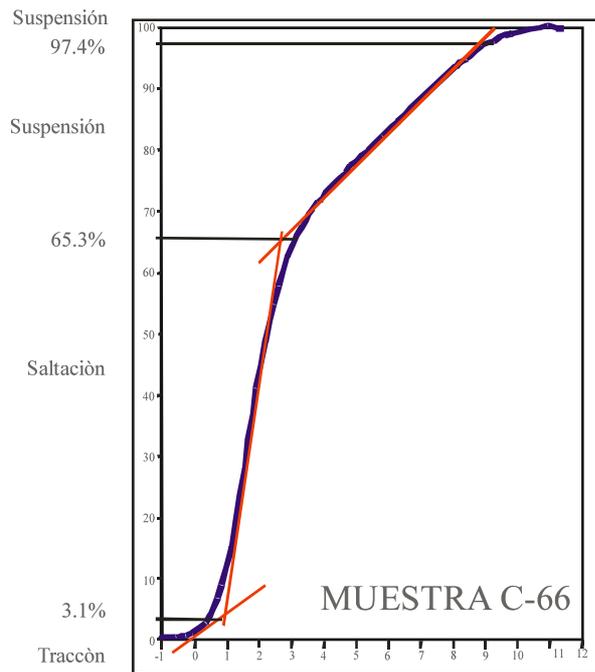


Figura 71. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-66

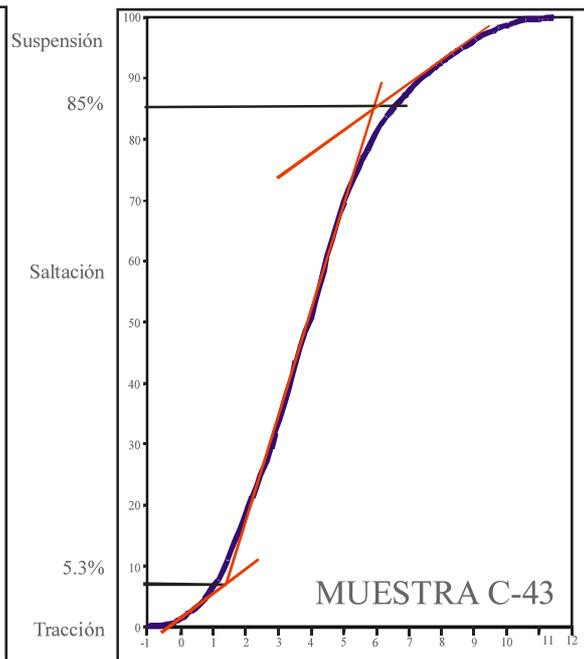


Figura 72. Poblaciones de acuerdo con el mecanismo de transporte en la muestra C-43.

La fuerte mezcla entre las poblaciones en suspensión y saltación en el Vaso poniente del Lago de Cuitzeo se debe a la interacción entre la energía producida por el viento y las corrientes de agua de los drenajes que llegan al vaso poniente del lago. En el litoral la tracción se presenta desde las gravas hasta las arenas finas (Fig. 73) la saltación ocurre en los limos y la suspensión a partir de la frontera entre los limos y las arcillas. La turbulencia es más intensa en las desembocaduras de los arroyos y en las descargas de aguas negras.

El transporte por suspensión es más intenso en las muestras que se ubican en el oriente del lago (Fig. 75) el dominio de este mecanismo de transporte es porque en esta zona desembocan una serie de canales derivados del Río Grande de Morelia y del Dren Querendaro, mismos que llevan suspendida una cantidad importante de sedimentos con tamaños de arenas, limos y arcilla.

El transporte por saltación es el dominante en el interior del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 74) y se genera en gran medida por la fuerza del viento que tiene efecto en el fondo del lago y remueve constantemente a las partículas. Las áreas fuente del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo descargan predominantemente partículas del tamaño de arena e inferiores.

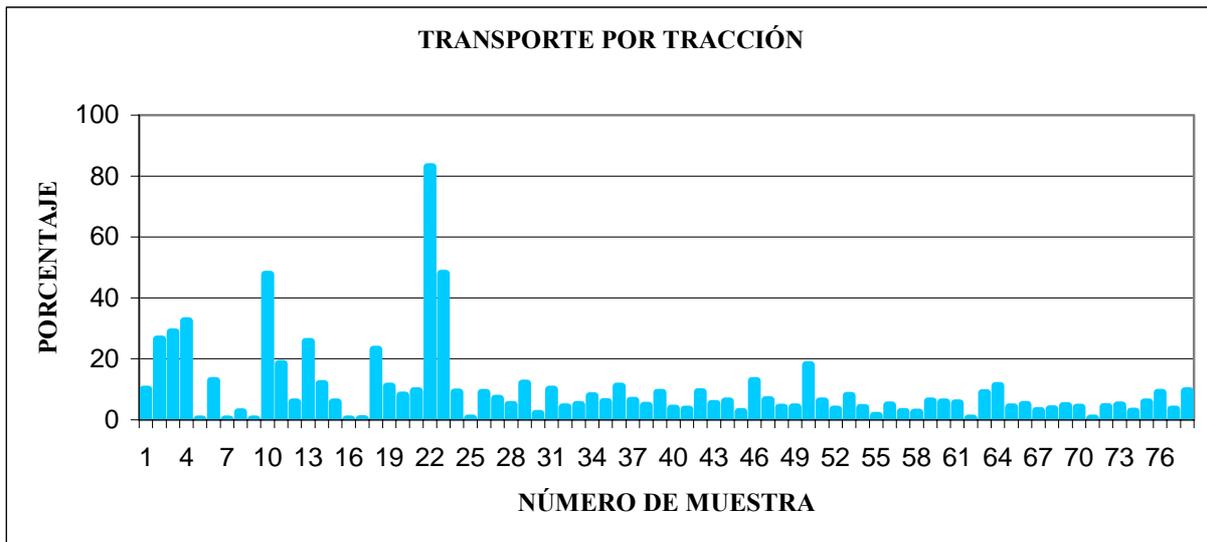


Figura 73. El transporte por tracción en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es mayor en algunas muestras del litoral (estaciones 1 a 31) donde se presentan las gravas. La energía para mover estas partículas procede de las corrientes de arroyos que desembocan a lo largo de la costa del lago.

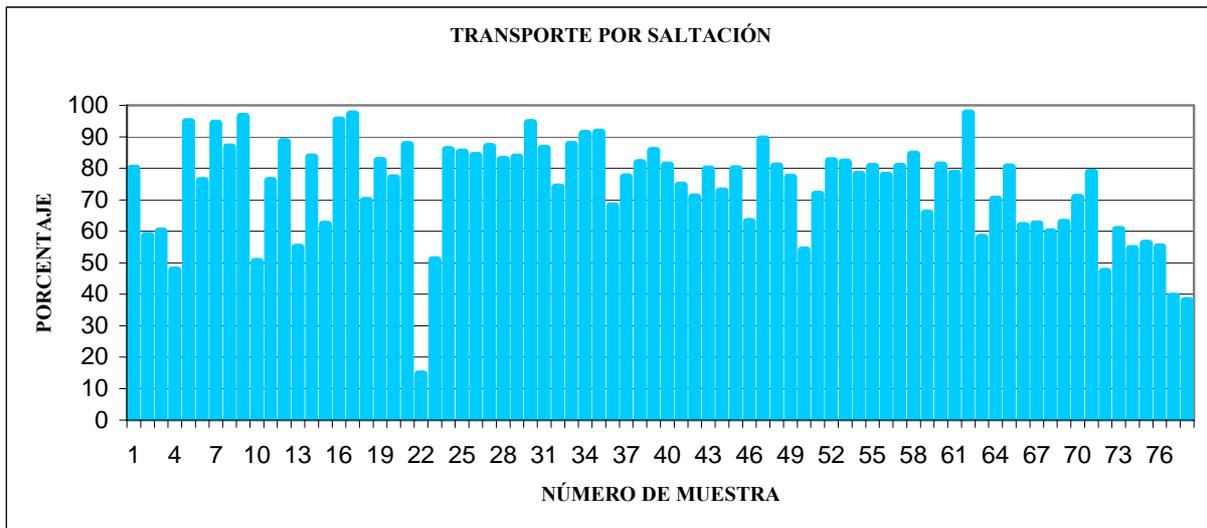


Figura 74. El transporte dominante en el interior del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es por saltación. Este mecanismo de transporte se genera en gran medida por la fuerza del viento que tiene efecto en el fondo del lago dado lo somero del mismo, lo que permite remover las partículas.

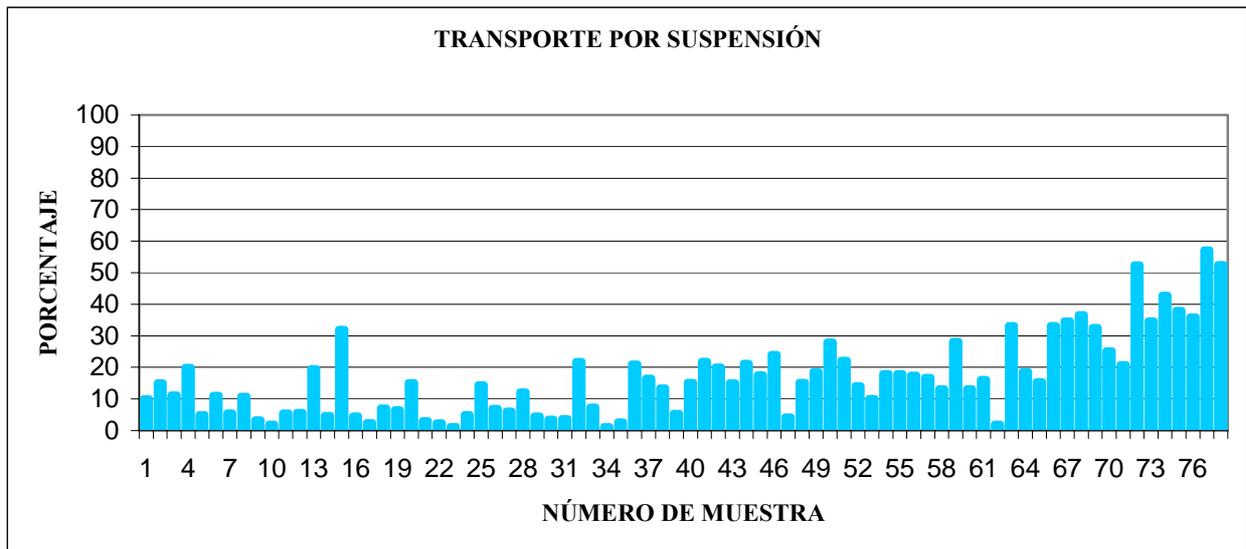


Figura 75. Transporte por suspensión en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

El transporte por suspensión es mayor en las muestras que se ubican al oriente dentro del área de estudio, la razón es porque en esta zona desembocan una serie de canales derivados del Río Grande de Morelia que llevan suspendido una cantidad importante de sedimentos y porque es la parte más profunda y por lo tanto la que tiene menos influencia del viento en el fondo del lago.

Los porcentajes correspondientes a las poblaciones de tracción, saltación y suspensión se muestran en el triángulo propuesto por Lecuanda (1992). Se encontró que en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo el transporte dominante es la saltación (Saltitas) seguido por la suspensión (suspensitas) y finalmente la tracción (tractitas) (Figs. 76 y 77).

En las zonas de las descargas es donde más se presenta la mezcla entre los tres tipos de transporte.

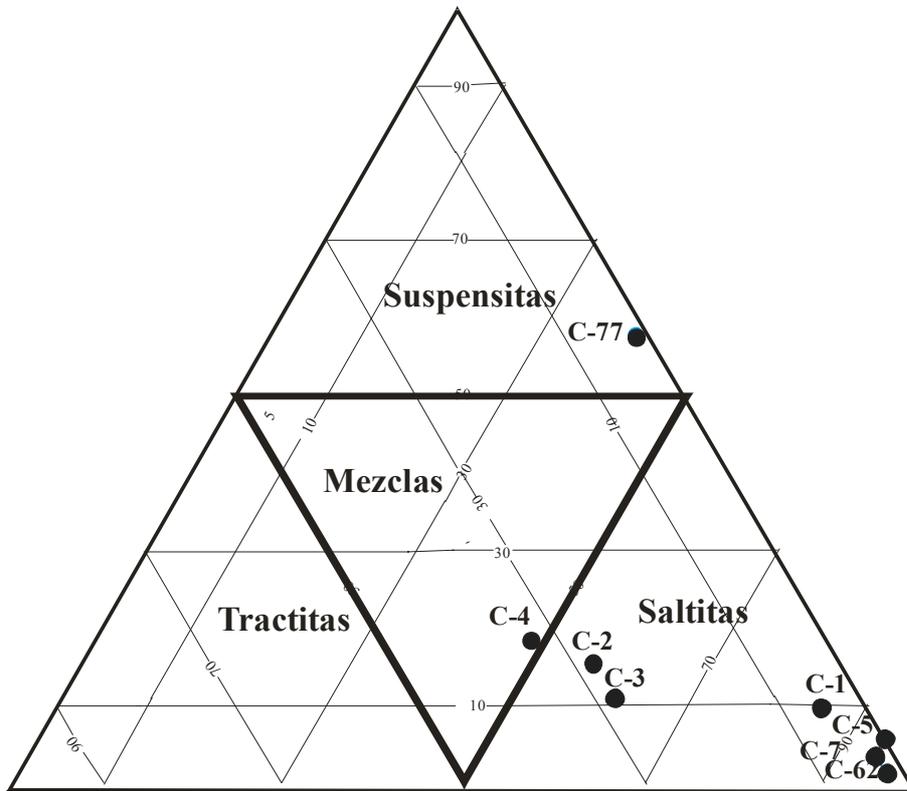


Figura 76. Mecanismos de transporte en el triángulo propuesto por Lecuanda (1992).

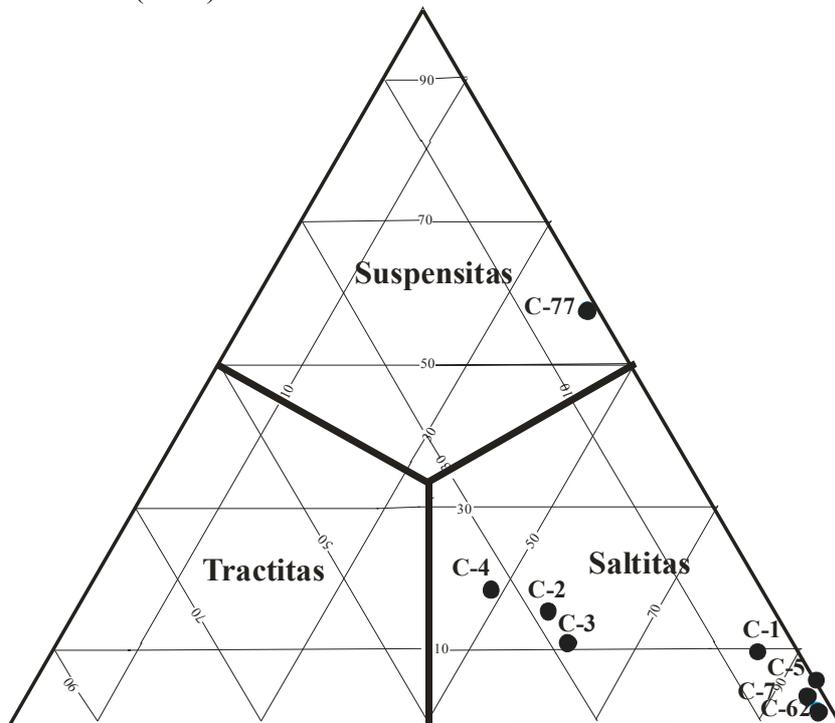


Figura 77. Mecanismos de transporte en un triángulo con tres clases (modificado de Lecuanda, 1992).

## 8. COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS PETROLÓGICAS

### Índice de procedencia (Ip)

Los sedimentos suelen conservar la composición y textura de las rocas de origen por lo que reflejan el carácter original de la fuente y permiten inferir la naturaleza litológica y el ambiente tectónico y de depósito. En un estudio de procedencia se requiere determinar la composición petrológica de la fracción arenosa de los sedimentos que comprende un análisis modal de cuarzo, feldespato y fragmentos de roca. El Ip se determina con la siguiente fórmula de acuerdo con Pettijohn (2002).

$$I_p = F / FR$$

Los componentes considerados en la descripción microscópica de la fracción arenosa, son los siguientes: cuarzo (C) se separa en cuarzo monocristalino (Cm) y policristalino (Cp), el feldespato (F) se diferencian con base en su alteración diferencial y su índice de refracción, en feldespato alcalino (Fk) y plagioclasa (Fp), los fragmentos de roca (FR) se agrupan en volcánicos (FRV) y plutónicos (FRP), minerales accesorios (magnetita, piroxenos, anfíboles, olivinos, biotitas), minerales autógenos (carbonatos y bicarbonatos), arenas de lodo (lodos aglutinados) y biógenos (ostrácodos).

La composición mineralógica de la fracción arenosa obtenida en el análisis petrográfico de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo se representa en la figura 78.

Los métodos geoquímicos se utilizan en la valoración del Ip de sedimentos terrígenos y son un excelente complemento interpretativo con el análisis petrográfico, este tipo de análisis se ha aplicado con éxito en las rocas sedimentarias terrígenas de grano fino (lutitas, limonitas y areniscas de grano fino) (Sánchez y Centeno, 2000).

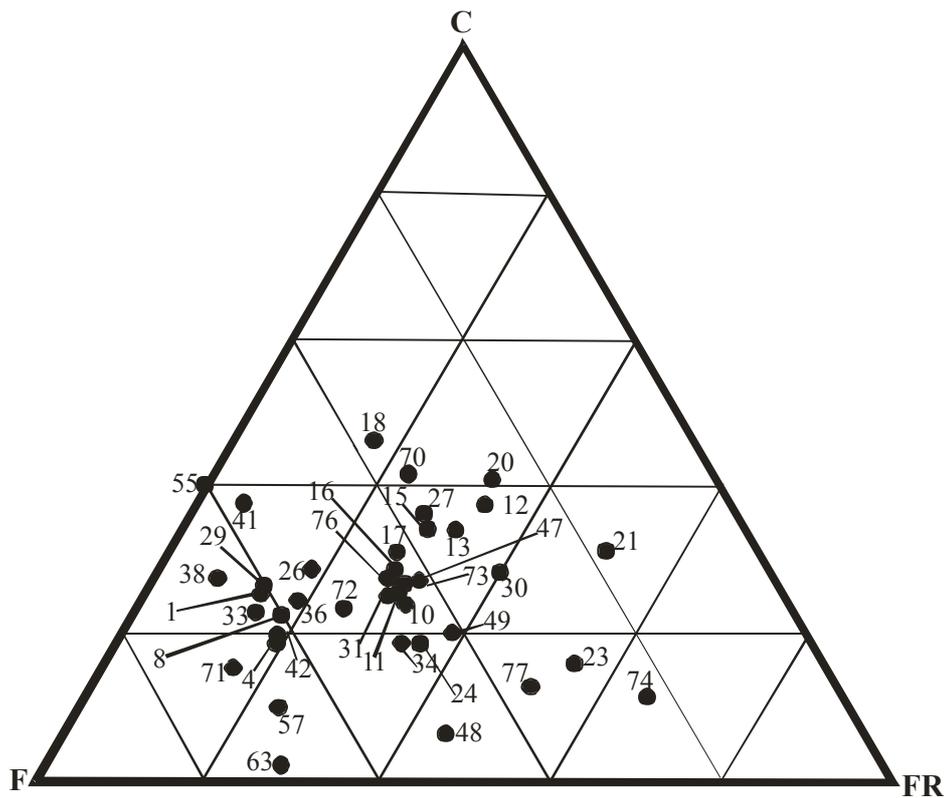


Figura 78. Ubicación de la composición mineralogía de los puntos de muestreo en un diagrama ternario. F = feldespato, C = cuarzo, FR= fragmentos de roca

Bhatia (1983) hace una clasificación relacionada con la procedencia desde la perspectiva de la geoquímica: 1) Arco de Isla oceánico (AIO), 2) Arco de isla continental (AIC), 3) Margen continental activa (MCA) y 4) Margen continental pasiva (MCP), observó que los valores de  $Fe_2O_3$  total + MgO,  $TiO_2$  y  $Al_2O_3/SiO_2$  disminuyen, mientras que los valores de  $K_2O/Na_2O$ , y  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$  aumentan en las márgenes continentales activas y pasivas con respecto a los arcos de isla oceánico y continental, en este estudio se aplica el método utilizando los valores de elementos mayores obtenidos por fluorescencia de rayos X, para determinar el Ip en los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo (Fig. 79 a 82).

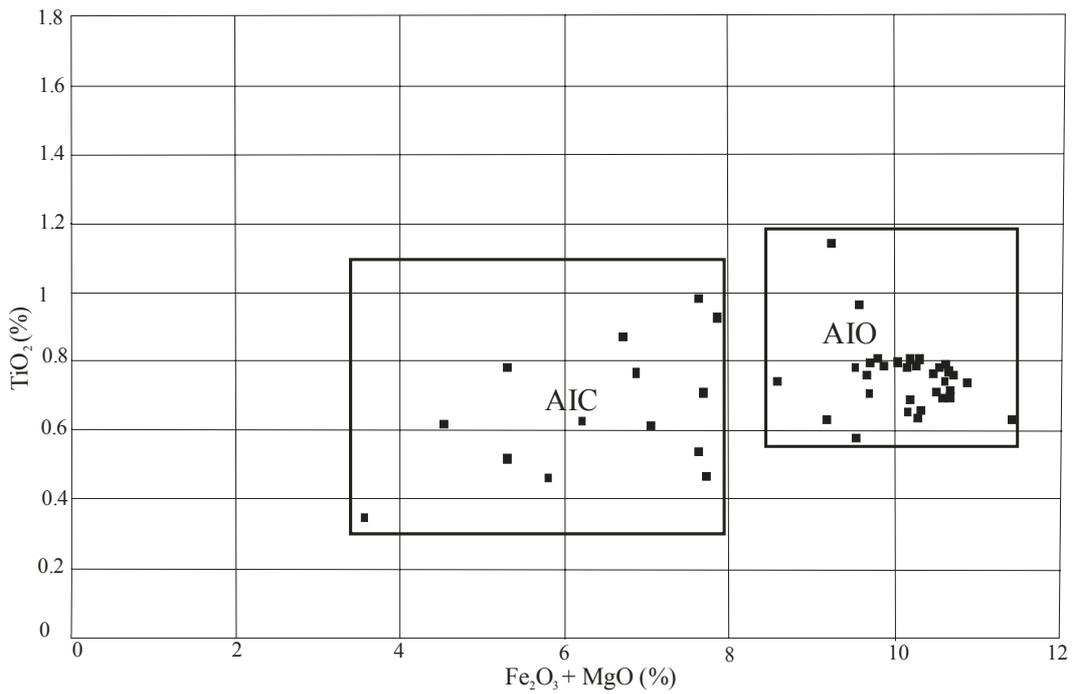


Figura 79. Relación de elementos mayores.  $\text{TiO}_2$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ , como una forma de determinación del índice de procedencia en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

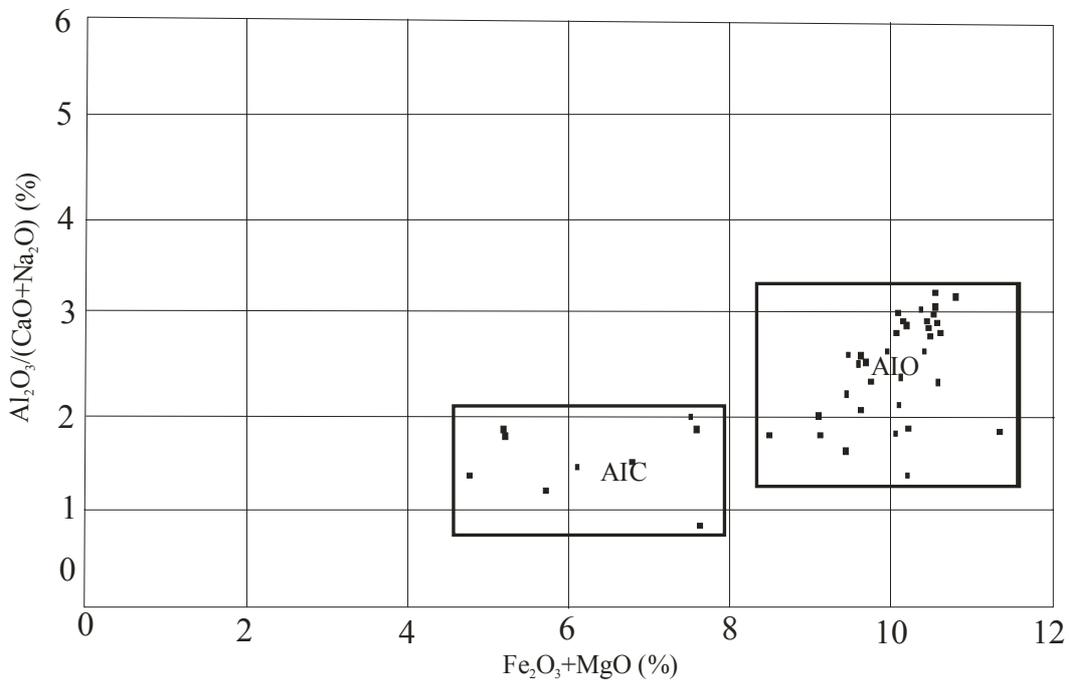


Figura 80. Relación de elementos mayores.  $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$  vs  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ , como una forma de determinación del índice de procedencia, en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

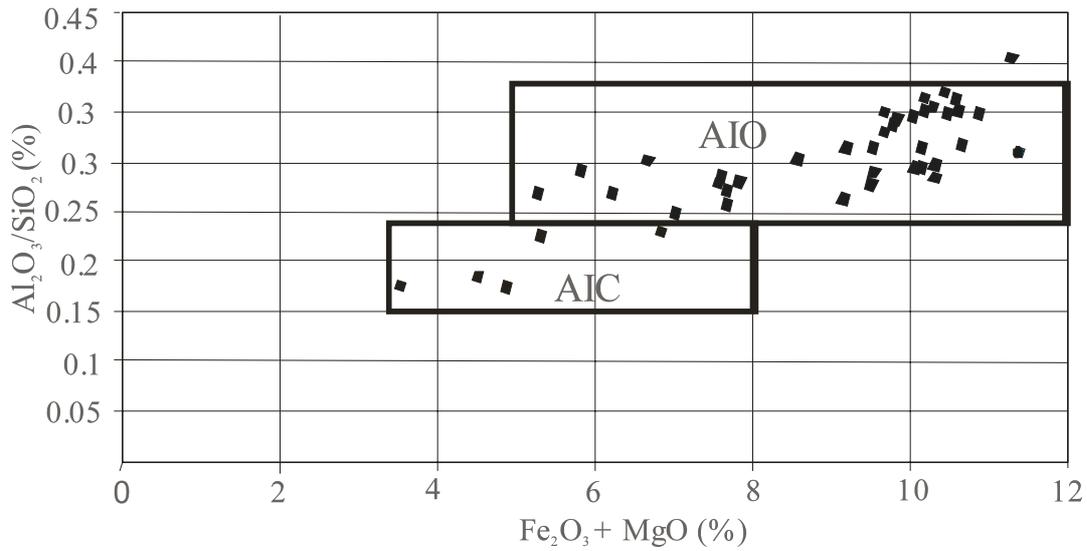


Figura 81. Relación de elementos mayores.  $Al_2O_3/SiO_2$  vs  $Fe_2O_3 + MgO$ , como una forma de determinación del índice de procedencia del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

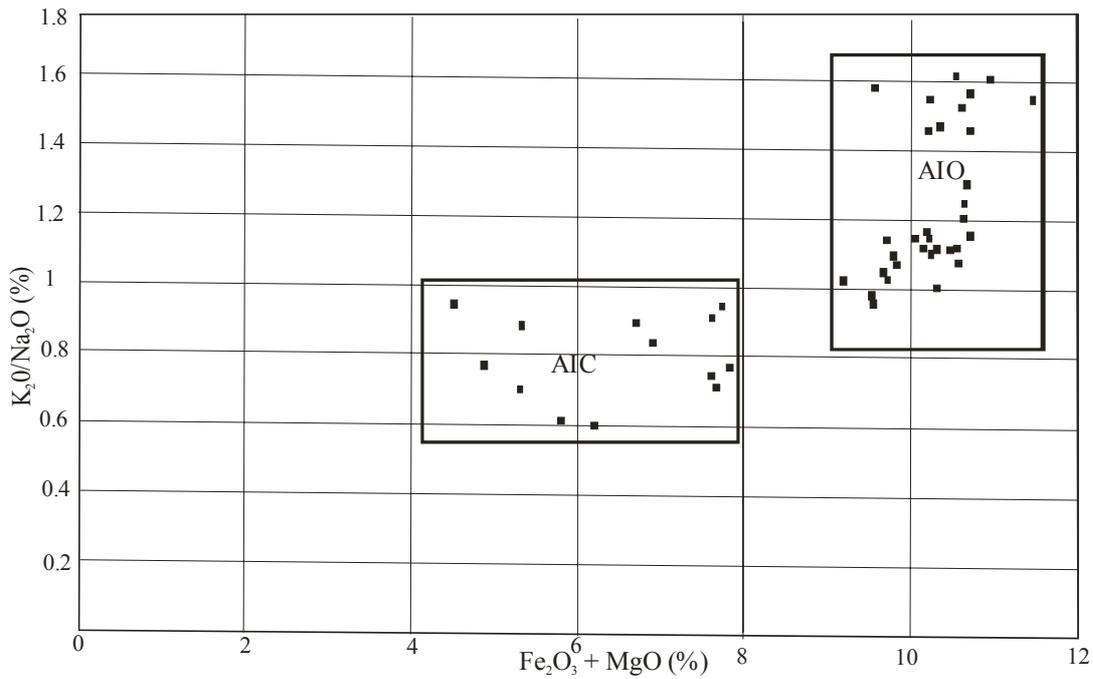


Figura 82. Relación de elementos mayores.  $K_2O / Na_2O$  vs  $Fe_2O_3 + MgO$ , como una forma de determinación del índice de procedencia del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

El Arco Volcánico Trans-mexicano (AVTM) es muy complejo y variado, se localiza en la región suroccidental de la Placa Norteamericana, como resultado de la subducción de la placas Rivera y Cocos a lo largo de la Trinchera de Acapulco, tiene secuencias volcánicas de composición química muy variada, en el se aprecian centros monogenéticos y volcanes escudos de composición basáltica, basáltica-andesítica, domos de composición andesítica-riolítica y dacítica. “En todo el AVTM se han emplazado rocas alcalinas, pero solo una parte de ellas tienen afinidad intraplaca y pueden interpretarse como basaltos de isla oceánica derivados de un manto no contaminado por la subducción” (Ferrari, 2000).

El sistema lacustre de Cuitzeo está localizado en la parte central del AVTM que forma parte del brazo este del arco circunpacífico, en la parte central-oeste de México. El vulcanismo y la deformación tectónica del terciario tardío al cuaternario están relacionadas con el mecanismo de subducción y transgresión de la placa Pacífica bajo la Norteamericana (Israde y Garduño, 1999). La determinación del índice de procedencia por el método geoquímico de sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, sugiere que las rocas fuente están asociadas al ambiente tectónico del Arco Circunpacífico.

### **Índice de madurez mineralógica (Im)**

Se considera que la madurez mineralógica es el porcentaje de minerales resistentes que se presentan en los sedimentos; es decir, a mayor cantidad de minerales resistentes contra un menor porcentaje de minerales de fácil alteración, más maduros son los sedimentos y viceversa a mayor contenido de minerales fácilmente alterables, más inmaduros son los sedimentos.

Existen otras propiedades del sedimento que permiten determinar la madurez, entre éstas se encuentra la redondez, que indica la abrasión que han sufrido las partículas durante el transporte. El mineral en el que se puede apreciar mejor la redondez es el cuarzo por su gran resistencia a la abrasión, el significado es que mientras más redondeado sea el grano más transporte ha sufrido y mayor será su madurez y mientras más anguloso sea menor madurez tendrá.

El Im se determina de acuerdo con Pettijohn (2002) con la fórmula.

$$Im = C / (F + FR)$$

Los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo corresponden en promedio: cuarzo (C), 26%; feldespatos (F) 46%; fragmentos de roca (FR) 28% (tabla 16).

Tabla 16. Composición modal de la fracción arenosa de sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Parámetro Estadístico	C %	F %	FR %	Im	Ip
Promedio	25.57	46.88	27.55	0.37	2.31
Desviación estándar	9.93	13.59	13.66	0.19	2.12
Máximo	46.31	70.33	65.71	0.86	10.50
Mínimo	2.20	17.86	0	0.02	0
Coefficiente de Variación	38.84	29	49.58	50.98	91.85

La mineralogía de los sedimentos en el Vaso Poniente Lago de Cuitzeo presenta las siguientes características: El cuarzo observado es monocristalino, los feldespatos son sódico-cálcicos preferentemente oligoclasa y andesina, los FRV son basálticos, andesíticos y riolíticos, ocasionalmente se observaron algunos FRP de composición dacítica e hipabisales como las microdacitas. Los minerales accesorios observados son hornblenda, olivino, tremolita-actinolita, pigeonita, biotita y magnetita, También se encontró vidrio.

Mendoza-Cantú (2002), determinó que las características morfométricas de la Cuenca de Cuitzeo no favorecen los procesos erosivos, por lo que no existe suficiente material para ser transportado y depositado. La intensidad de la erosión es mayor sobre los depósitos superficiales, las colinas y las laderas, localizadas en las subcuencas de: Arroyo Colorado, San Andrés, Atécuaro, el Pedregal, San Lucas, Capula y Fontezuelas en los municipios de Morelia y Huarimba (Fig. 6). La litología más afectada por la erosión se localiza en áreas cercanas al sur y suroeste al Lago de Cuitzeo y consiste en: depósitos lacustres del paleolago, ignimbritas, volcanes monogenéticos y conos andesíticos. La densidad del drenaje de la Cuenca de Cuitzeo es moderada y la morfología muestra pendientes del 20% en promedio, estas características, propician un lento drenaje hacia el lago, lo que retarda el tiempo de transporte ayudando a la madurez mineralógica, sin embargo, son dominantes los procesos que generan sedimentos inmaduros (Mendoza-Cantú, 2002).

En la determinación del Im, se considera que a mayor concentración de cuarzo el Im se incrementa, puesto que este mineral tiene alta estabilidad mecánica, sin embargo, en el ambiente químico que prevalece en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo con pH mayor que 9, el cuarzo muestra inestabilidad química y gradualmente es disuelto y suspendido, disminuyendo su contenido en los sedimentos y por lo tanto el Im, esto contribuye a que la madurez de los sedimentos dentro del área de estudio sea menor que en los sedimentos correspondientes al litoral (Fig. 83). La explicación de las causas de la solubilidad del cuarzo se relaciona con el pH del agua, ya que cuando esta tiene valores altos por encima de 7.5 a 8, el cuarzo se disuelve (Gutiérrez-Elorza, 2001). Eraso y Taylor (1990) expresan que la solubilidad del cuarzo crece rápidamente a medida que aumenta el pH. La otra explicación de que los sedimentos del interior sean más inmaduros (Im = 0.1 a 0.2), que los del litoral (Im = 0.35 a 0.7) son los altos porcentajes de feldespatos en los lodos aglutinados, mismos que son aportados en su mayoría por las rocas de composición riolítica.

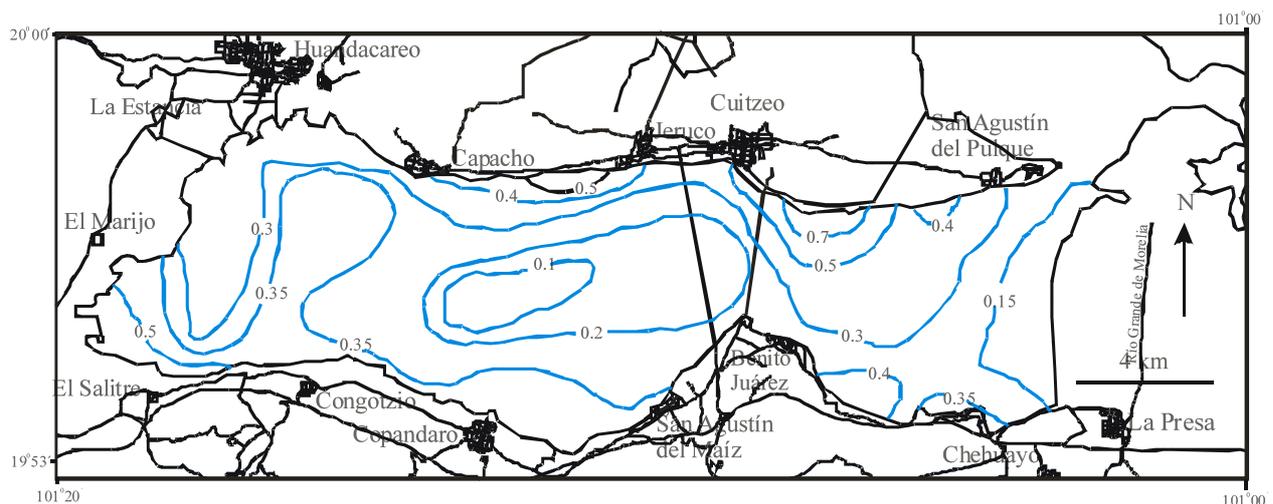


Figura 83. Distribución del índice de madurez mineralógica del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo no llegan sedimentos maduros de la parte sur de la cuenca, pues la Presa de Cointzio (Fig. 6) retiene a los sedimentos que sufrieron mayor transporte. Al noroeste del vaso poniente los arroyos circulan sobre la planicie lacustre (paleolago) depositando sedimentos con alta madurez en el litoral noroeste del vaso poniente, como el viento es más intenso y prolongado hacia el noreste, el movimiento de estos sedimentos hacia el interior del lago es mínimo. El resultado es la acumulación de sedimentos maduros en el litoral noroeste.

La barrera que se está formando en el sector central del lago y que lo está seccionando en dos vasos, retiene cantidades importantes de sedimentos maduros. En la zona próxima al litoral sur del vaso poniente (entre Capacho y Benito Juárez) afloran andesitas y basaltos, las partículas derivadas de estas rocas tienen poco transporte y se mezclan con los sedimentos maduros procedentes del paleolago, por lo cual su índice de madurez ( $I_m$ ) resultante es de 0.3 a 0.4.

El extremo poniente del área de estudio es una de las zonas con mayor madurez y se caracteriza porque la línea de costa es muy fluctuante, los sedimentos que se depositan en esta parte del lago son de rocas basálticas, andesíticas y riolíticas, estos materiales, en gran medida son producto de la falla geológica localizada al poniente del lago (Fig. 3). Los sedimentos acumulados en el litoral rocoso de la parte noreste del vaso poniente (entre los poblados de Cuitzeo y San Agustín del Pulque) proceden de ignimbrítas, riolitas, basaltos, andesitas, dacítas y depósitos del paleolago, conforme se avanza hacia el límite noreste del área de estudio los sedimentos se hacen más inmaduro, como consecuencia de su enriquecimiento en feldespatos que provienen de las rocas de composición riolítica.

### **Composición de arcillas.**

Con la finalidad de conocer la mineralogía de los sedimentos del vaso poniente del Lago de Cuitzeo, se realizó el estudio petrográfico de muestras de un núcleo a diferentes profundidades del Lago de Cuitzeo, proporcionados por la Dra Isabel Israde Alcántara del Departamento de Geología y Mineralogía del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, se encontró la asociación frecuente de ceniza volcánica con arcilla (Anexo IX). En estos estudios petrográficos se determinó que la columna sedimentaria contiene ceniza volcánica, una proporción de la arcilla presentes en los sedimentos del Lago de Cuitzeo proceden de la alteración de estas. En los laboratorios del Instituto de Geología de la UNAM, se analizaron 6 muestras del sedimento del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo por difracción de rayos X (DRX), para conocer los tipos de arcillas depositadas en el Lago de Cuitzeo (Fig. 84) la arcilla que se encontró es la montmorillonita (Tabla 17).

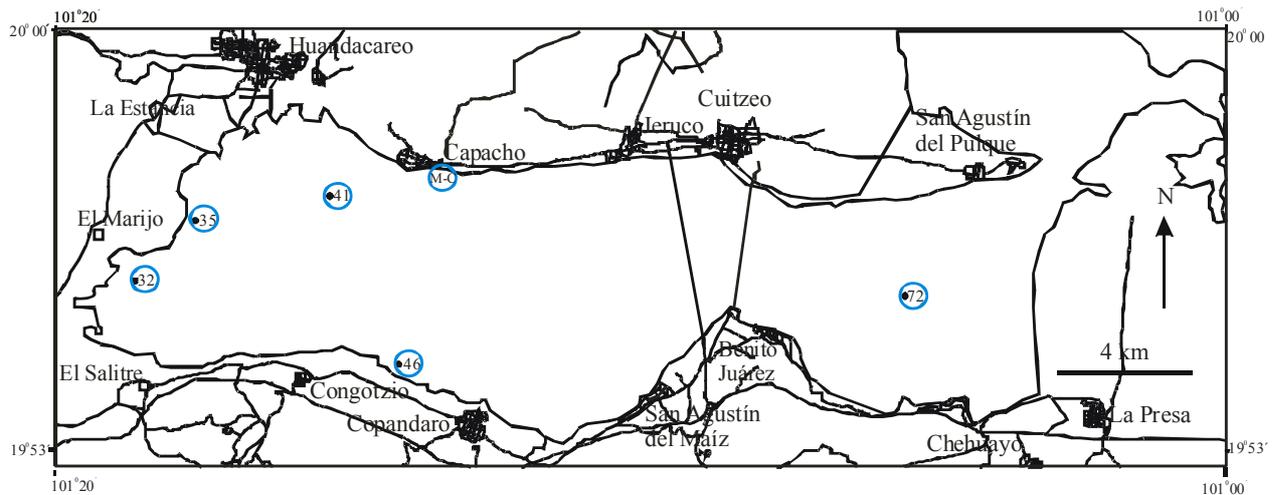


Figura 84. Ubicación de las estaciones en las que se determinaron los tipos de arcillas en el área de estudio. El núcleo se extrajo en el centro del piedraplen paralelo a la vieja carretera del Lago de Cuitzeo.

Tabla 17. Determinación de minerales por DRX en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Mineral	C-32	C-41	C-46	C-72	C-35	M-C*
Calcita	X	X	X	X	X	X
Montmorillonita de una capa de agua	X	X		X	X	X
Montmorillonita de dos capas de agua	X	X	X		X	
Montmorillonita de tres capas de agua	X	X	X		X	
Ópalo (escaso)	X	X		X	X	
Caolinita	X	X	X	X	X	
Biotita	X	X		X		
Plagioclasas		X		X		
Dawsonita						X

\*Muestra de sedimentos precipitados a partir de una muestra de agua colectada y evaporada.

La muestra de agua que se colectó para precipitar el material disuelto a partir de la evaporación se obtuvo en el litoral próximo al poblado de Capacho. Se eligió este sitio porque es uno de las zonas con pH más elevado y por lo tanto con más partículas en suspensión-solución, lo que permitió obtener sedimentos representativos para el análisis por DRX.

La caolinita determinada procede de la alteración de los feldespatos potásicos, esta afirmación se fundamenta en la alteración observada en el estudio petrográfica de estos minerales a dichas arcillas. El ambiente químico del agua del Lago de Cuitzeo, propicia que la montmorillonita y los minerales de sílice como el cuarzo y el ópalo ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) se mantengan en solución-suspensión, dando al agua del lago un color blanquecino.

Para determinar el efecto del pH alto (superior a 9) en la disolución de la montmorillonita, se efectuaron pruebas experimentales en 10 muestras de agua del lago en las que no se precipitaba la arcilla, el ensayo consistió en modificar el pH hasta 1.5 agregando HCl concentrado, el resultado fue una precipitación inmediata de todo el material suspendido y disuelto.

Otra manera de comprobar la disolución-suspensión de arcilla fue coleccionar agua ( Muestra M-C) y evaporarla naturalmente, el residuo fue un compuesto blanquecino que se analizó por DRX encontrándose montmorillonita, calcita y un mineral hidrotermal (dawsonita) (Tabla 17).

La montmorillonita es la arcilla predominante en el lago, resultado principalmente de la alteración de las cenizas volcánicas, se encontró en cantidades importantes tanto en el residuo de la muestra de agua precipitada, como en las muestras de sedimento observadas en el microscópio petrográfico.

Esta arcilla se aprecia abundantemente en todas las estaciones de muestreo, aglutinadas y cementadas con los limos, proceso que da origen a las arenas de lodo.

## 9. CONCLUSIONES

### **Composición química del agua**

La circulación del agua y la alta evaporación en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo han ocasionado gran concentración de sales, que han contribuido a que el agua de este lago tenga el pH básico (mayor que 9) y alta conductividad (superior que 5) en el área de estudio.

Se determinó que la zona poniente del área de estudio es menos profunda, los valores de pH, conductividad, sólidos totales, fosfatos y nitratos son más altos y la transparencia menor que en el sector oriental. El Na<sub>2</sub>O (promedio del 2 %) determinado en los análisis químicos del agua procede en su mayoría de las plagioclasas, la montmorillonita y los precipitados autigénicos.

Los manantiales aportan al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo cantidades significativas de sílice, sodio, calcio, magnesio, cloruros y sulfatos

Los elementos traza en el agua por orden de abundancia son: Cu, Cr, Pb y Ni.

Los valores de Cu, Ni y Pb obtenidos sugieren que hay aporte importante de estos por fuentes antropogénicas locales.

### **Textura y distribución de los sedimentos**

El promedio gráfico (MzØ) determinado es de arenas finas y en menor proporción de limos, los sedimentos que componen estos tamaños son principalmente arenas de lodo (montmorillonita y limo aglutinado y cementado), biógenos (ostrácodos) y terrígenos derivados de feldespatos, cuarzo, ferromagnesianos, fragmentos de roca y minerales pesados.

El aporte de arcilla al Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo es muy alto; sin embargo, su aglutinamiento y cementación forman arenas de lodo, lo que hace que decrezca el contenido de tamaños de arcillas y aumente el de arenas.

En la mayoría de los casos las partículas de tamaños de arenas medias y arenas finas, se asocian con biógenos (ostrácodos).

La poca profundidad del lago ocasiona una marcada interacción del viento con el oleaje y producen el movimiento por saltación y suspensión de los sedimentos en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo, mismos que contribuyen a la mala clasificación granulométrica, ya que mezclan sedimentos de diversas fuentes (terrígenas + biógenas + autígenas).

Se observó una correlación significativa entre la desviación estándar y la curtosis, ya que conforme aumenta la mala clasificación, las curvas de frecuencia son más platicúrticas, esto significa que a mayor dispersión del tamaño de grano, la curva es más aplanada. Esto puede reflejar distintas fuentes y una fuerte variedad de procesos dentro del vaso, mezclándose diversos tamaños.

La turbulencia que se produce en las descargas de aguas negras y los arroyos, incrementan la mezcla de los transportes por suspensión y saltación.

### **Composición de la fracción arenosa**

La madurez mineralógica es mayor en las áreas litorales que en hacia el interior del lago, ya que en esta zona la disolución del  $\text{SiO}_2$  contribuye a que el  $I_m$  disminuya.

La mineralogía dominante según el estudio petrográfico de la fracción arenosa, en orden de abundancia, es la siguiente: arenas de lodo; feldespatos; biógenos; cuarzo; fragmentos de rocas (ígneas extrusivas y escasamente intrusivas), cuya composición varía desde basáltica hasta riolítica y minerales pesados (piroxenos, anfíboles, minerales opacos y algunas micas).

Los valores promedio de los elementos traza en el sedimento muestran contaminación ligera por los elementos analizados.

Las concentraciones de elementos traza en el agua son menores que los límites mínimos permisibles.

### **Composición química de sedimentos**

Se determinó que el índice de alteración química promedio es del 61.7%, resultado de la alteración y disolución de los minerales, el valor máximo se localizó en la margen litoral poniente.

El grado de alteración de los minerales y el gran aporte de  $\text{SiO}_2$  a través de los manantiales ocasionan que sea el más abundante en los sedimentos seguido por el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

La alteración de minerales con calcio, así como la precipitación de carbonatos y las conchas de los organismos, producen cantidades significativas de  $\text{CaO}$  en el área de estudio.

Los valores de cromo, cobalto, vanadio, níquel y zinc, reflejan la composición de las rocas básicas de la Cuenca de Cuitzeo y se encuentran principalmente en los sedimentos finos.

Los promedios del cobre y el zinc en los sedimentos sugieren que parte de estos elementos proceden de fuentes antropogénicas y se asocian preferentemente a la materia orgánica y sedimentos.

Las fuentes más importantes de Sr y el Ba son los manantiales hidrotermales y los feldespatos. Las descargas de aguas negras arrojan cantidades importantes de materia orgánica en el lago de Cuitzeo, sin embargo, existe un alto consumo de ésta por los organismos, el porcentaje promedio de materia orgánica es de 0.95%.

La arcilla dominante en los sedimentos del lago es la montmorillonita, ésta procede principalmente de la alteración de los depósitos de cenizas volcánicas. El aglutinamiento y cementación de las arcillas con los limos da lugar a la formación de las arenas de lodo.

### **Zonas vulnerables a la acumulación de metales en sedimentos**

Se observó una asociación frecuente entre los metales traza, la materia orgánica y los sedimentos finos, misma que sobresale en las descargas de aguas negras y los arroyos disminuyendo hacia el interior del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

## 10. Literatura Citada

- Acosta-Villegas, M., 2002. Cambio en los patrones de consumo de agua y cambio de uso de suelo. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (1975-2000). Tesis profesional para obtener el grado de biólogo, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Alfaro, R., V. Martínez, N. Segovia, P. Peña, E. López, M. A. Armienta, J. Rangel and J.L. Seidel, 2002. Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River Basin. Mexico. *Geofísica Internacional*, 41 (4): 439-445.
- Arias, L. R., 1996. El Lago de Cuitzeo y su cuenca hidrológica, estrategia en Cuitzeo. En memoria del foro de análisis de la problemática ambiental del estado de Michoacán. Cuenca del Lago de Cuitzeo. LXVIII legislatura y U.M.S.N.H. México. p. 78-81.
- Ávila-Figueroa, C., 1979. Obtención de hidróxido de sodio a partir de las sales minerales del Lago de Cuitzeo. Tesis profesional para obtener el título de ingeniero industrial. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán México.
- Ávila, P., 1998. El Lago de Cuitzeo: El patito feo de la política del agua. *Ecología: agua, medio ambiente y desarrollo en México*.
- Bacon, P., 1996. Wetlands, Biodiversity and the Ramsar Convention: The role of the Convention of Wetlands in the Conservation and Wise Use of Biodiversity. Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland. 196 pp. Wetlands and biodiversity. Chapter 1. In: Hails, A.J. (ed.). p. 1-17.
- Bhatia, M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone: *Journal of Geology*, 91: 611-627.
- Bayern, P., 2002. *Handbuch der technischen Gewässeraufsicht Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft*.
- Bradley, E. and D. Mc Conchie, 2001. Implications of sedimentological studies for environmental pollution assessment and management; examples for fluvial systems in North Queensland and Western Australia. In: *Current research in Fluvial Sedimentology: papers from the 5<sup>th</sup> International Conference in Fluvial Sedimentology* Fielding C.R. Editor Elsevier, Amsterdam. p. 235-252.
- Bourgeois, J., V. Arnard, J. Auboin, E. Barried, W. Bandy, T. Calmus, J.C. Carfantan, J. Guerrero, J. Mammerrickx, B. Mercier De Lepinay, F. Michaud and M. Sossom, 1988. Fragmentation en cours du bord Ouest du Continent Nord-Américain. *Les frontières sous marines du Block Jalisco (Mexique comptes Rendus Academie des Sciences)*, Paris, 307: 617-626.
- Carranza-Edwards, A., 1997. La granulometría y su uso en estudios geoquímicos y ambientales. Instituto Nacional de Geoquímica. A.C. México. p. 235-243.
- Carrera, E. y G. de la Fuente 2003. *Inventario y Clasificación de Humedales en México. Parte 1. Ducks Unlimited de México A.C., México*.
- Ceballos-Corona, J. G., M. R. Ortega-Murillo, M. Medina-Nava, M. Martínez-Trujillo, L. S. Rodríguez-Jiménez y S. González-Santoyo, 1994. *Análisis limnológico del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México*. Secretaría de Difusión Cultural, Editorial Universitaria, Morelia, Michoacán, México.
- Clesceri, L., A. Greenberg, R. Trussell, 1989. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 17<sup>th</sup> edition
- Cervantes, M., 1999. *Suplemento la Jornada Ecológica*. [www.planeta.com/ecotravel/méxico](http://www.planeta.com/ecotravel/méxico).
- CONABIO, 2004. *Pátzcuaro y cuencas endorreicas cercanas*.

- Cowardin, L. M., V. Carter, F.C. Golet and E. T. LaRoe, 1979. Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U.S. Department of the interior. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C.
- Cox, R. A., F. Culkin and J.P. Riley, 1967. *Reep Sea Res.*14: 203-220.
- Chacón-Torres, A., J. Alvarado y M. B. Rendón López, 2002. Trophic Webs in a Mexican Hipereutrophic shallow lake. En: Padisak J. (Ed.) Abstracts of international conference on Limnology of Shallow Lakes 25-30 may VE22/2002, Vezprém University Press Balatonfüred, Hungary.
- Chacón-Torres, 2006. Periódico El Cambio de Michoacán del 27 de marzo de 2006.
- De-Mets, C. and S. Stein, 1990. Present day's kinematics of the Rivera Plate and implications for tectonics in Sourthern Mexico. *Journal of Geophysical Research* 95: 931-948.
- Dickinson, R., L.S. Beard, R. Brakenridge, L. Erjavec, C. Ferguson, F. Inman, A. Knepp, A. Lindberg & T. Ryberg, 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting: *Geological Society of America, Bulletin*, 94: 222-235.
- Eraso-Romero, A. y Taylor de Lima M., 1990. El karts en cuarcitas del Grupo Italocomi Ouro Prieto, Minas Gerais, Brasil. Aplicación del método de predicción de drenaje subterráneo, *Boletín Geológico y Minero*, 101 (29): 277-281.
- Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII: 84-92.
- Flashka, H. A., 1975. Química analítica cuantitativa 1: CECOSA. México.
- Folk, Robert L., 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company. Austin Texas 78703.
- Galindo, M., 2005. Water Quality and its Spatial Variability in Lake Cuitzeo, Mexico, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, the Netherlands.
- Gobierno del estado de México, 1997. Norma oficial mexicana NOM-001 ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- GPPVEM, 2005a. Proposición con punto de acuerdo relativo a la construcción del tramo carretero Copándaro-Uriangato de la carretera Morelia-Salamanca. Senado de la República LIX legislatura. Grupo Parlamentario, proposición con punto de acuerdo relativo al Lago de Cuitzeo y la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago. Senado de la República, LIX legislatura, Grupo Parlamentario del Partido Verde Ecologista de México.
- GPPVEM, 2005b. Última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII: 84-92.
- Gutiérrez-Elorza, M., 2001. Geomorfología climática. Editorial Omega, Barcelona, 1: 664 p.
- Hernández-Montaña y Arellano-Torres, 2002. Alternativas del desarrollo pesquero en el Lago de Cuitzeo. Mem. I Foro Científico de Pesca Ribereña.
- Horowitz, A. J., and K. Elrick, 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Applied Geochemistry*. 2: 437-451.
- ILWIS, Integrated Land and Watershed Management Information System, 1998. User's Manual. International Institute for Aerospace and Earth Science (ITC), Eschede, The Netherlands.
- INEGI, 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán.
- INEGI, 2003. Carta topográfica, Morelia E14-1, Esc. 1:250,000. Michoacán de Ocampo.
- INEGI, 2005. Carta topográfica, Cuitzeo del Porvenir, E14A13, Esc.1:50,000. Michoacán de Ocampo.
- INEGI, 2006. Información hidrológica, Regiones Hidrológicas. [www.inegi.gob.mx/geo/default.aspx](http://www.inegi.gob.mx/geo/default.aspx)
- Israde-Alcántara, I., 2001. Lago de Cuitzeo. *Ciencia y Tecnología*.

- Israde-Alcántara, I., V. H. Garduño y R. Ortega, 2002. Paleoambiente lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del Lago de Cuitzeo. *HidroBiología*, 12 (1): 61-78.
- Israde-Alcantara I., V. H. Garduño Victor H., (1999). Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: The evolution of the Late Neogene Cuitzeo Basin System (Central Western Mexico, Michoacán). 1999. Special Issue. Ancient and Recent lacustrine systems in convergent margins. Edit. By L. Cabrera and A. Saez. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 151, 1-3. pp. 209-227.
- Kasper-Zubillaga, J.J., B. Acevedo, O. Morton and G. Ortiz, 2008. Rare earth elements of the Altar Desert dune and coastal sands, Northwestern Mexico. *Elsevier, Chemie der Erde* 68: 45-59.
- Kasper-Zubillaga, J. J. and W. Dickinson, 2001. Discriminating depositional environments of sands from modern source terranes using modal analysis. *Elsevier Science. Sedimentary Geology* 143: 149-167.
- Kasper-Zubillaga J.J. and H. Zolezzi-Ruiz, 2007. Grain Size, mineralogical and geochemical studies of coastal and inland dune sands from El Vizcaino Desert, Baja California Peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V 24 num 3. 3, 2007, p. 423-438.
- Kasper-Zuloaga, J.J., H. Zolezzi, A. Carranza, P. Girón, G. Ortiz and M. Palma, 2007. Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico. *Earth surf. Process. Landforms* 32: 489-508.
- Lafragua, J., A. Gutiérrez, A. Baena, G. Moriel and S. Fernandez, 2003. Bathymetric curve, (5 years old) validation using the soil erosion transportation at Cuitzeo Lake Watershed, *Geo. Environment and Landscape Evolution II*.
- Lecuanda, R., 1993. Un triángulo para la representación poblacional e interpretación genética de los sedimentos arenosos. *Ciencias Marinas*, 19 (1): 1-14.
- Libes, S. M., 1992. An introduction to marine biogeochemistry. *Jhon Wiley & Sons, Inc.* p1 68-172.
- López-Granados, E. y M. Mendoza-Cantú, 2002. Cambio de la cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del Lago de Cuitzeo, Michoacán. *Gaceta Ecológica, INE, SEMARNAT, México*, p. 9-64.
- Lum, K., 1999. Suplemento, la Jornada Ecológica. [www.planeta.com/ecotravel/méxico](http://www.planeta.com/ecotravel/méxico).
- Martínez-López, E., 2004. Análisis de los patrones espaciales de la contaminación por metales y de la materia orgánica en los sedimentos del Lago de Cuitzeo, del estado de Michoacán. Tesis para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Ambiental. UAM Azcapotzalco.
- Mendoza-Cantú, M., 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Doctoral del Postgrado en Ciencias de la Tierra: Instituto de Geofísica, UNAM.
- Mendoza-Cantú, M., G. Bocco, M. Bravo y E. López-Granados, 2004. Evaluación de la Calidad Espacial y Temporal de Estaciones Meteorológicas: El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. *Ciencia Nicolaita* 39: 79-80.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink, 2000. *Wetlands* (3<sup>rd</sup> ed.). John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Nesbitt, H.W. and G.M. Young, 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299: 715-717.
- Normativa Holandesa de suelos contaminados para metales y suelos contaminados. Elaboración del mapa geoquímico de la comunidad autónoma de La Rioja.
- Olmos-García, C., 2000. Eutrofización en embalses de altura. Incachaca-Jhampaturi. Problemática del siglo XXI. [www.bilboved.com/biodepur/campos.htm](http://www.bilboved.com/biodepur/campos.htm)

ANEXOS

Anexo I. Parámetros fisicoquímicos del agua del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	X (UTM)	Y (UTM)	Z (msnm)	pH	Cond. (mS)	Temp. (°C)	Transp. (cm)	Batimetría (cm)
32	258231	2205461	1836	9.4	3.97	24.9	10	60
33	260000	2204000	1837	9.4	4.8	26	14	75
34	260000	2206000	1839	9.5	5.4	29.1	14	95
35	260000	2207254	1837	9.6	5.4	27.1	14	75
36	262057	2208921	1834	9.5	5.72	26	14	86
37	262000	2207000	1834	9.7	5.64	21.8	15	1.05
38	262000	2205000	1835	9.7	5.09	23.3	15	80
39	264000	2204000	1838	9.7	6	24.3	15	1.01
40	264000	2206000	1838	9.7	6	23.2	14	1.09
41	264000	2208000	1837	9.6	5.6	25.4	15	1.03
42	264263	2209917	1839	9.7	5.44	24.3	15	66
43	266000	2208500	1840	9.7	5.85	25	15	90
44	266000	2207000	1834	9.6	5.87	29.6	15	1.08
45	266000	2205000	1839	9.6	4.6	30.7	15	1.02
46	266000	2203000	1840	9.7	5.3	28.4	14	68
47	268000	2202500	1839	9.7	5.8	33.2	14	76
48	268000	2204500	1836	9.6	5.9	32	15	1.02
49	268000	2006500	1837	10.1	5.9	29.8	15	1.05
50	268000	2208500	1839	9.9	5.6	26.8	15	82
51	270000	2208000	1835	9.56	5.85	25.2	15	99
52	270000	2206000	1839	9.57	5.82	27.2	15	1.04
53	270000	2204000	1836	9.63	5.8	26.5	13	98
54	270000	2202000	1839	9.43	5.9	26.4	13	85
55	272000	2202500	1839	9.55	5.75	25.9	13	86
56	272000	2204500	1838	9.61	5.75	26.6	12	18
57	272000	2206500	1840	9.56	5.8	27.3	12	1.02
58	272000	2208500	1841	9.57	5.9	27.1	13	88
59	273533	2209021	1839	9.6	5.1	31.1	10	46
60	274000	2206000	1838	9.57	5.1	28	10	89
61	274000	2204000	1837	9.55	4.5	25	10	95
62	275480	2205106	1837	9.33	2.7	29	11	87
63	275358	2206768	1838	9.25	2.4	27.6	10	93
64	275241	2208548	1837	9.28	2.75	26	10	68
65	276082	2208161	1840	9.28	2.75	25.9	10	70
66	277000	2206050	1837	9.02	1.35	28.2	12	1.2
67	277000	2205000	1837	9.67	1.73	28.2	12	1.32
68	279000	2203500	1837	9.1	1.86	25	12	1.44
69	279000	2205000	1836	9.1	1.96	27.9	12	1.41
70	279000	226500	1836	9.28	0.99	28.7	13	1.25
71	281000	2207000	1839	9.05	2.6	27.9	11	1.26
72	281000	2205000	1839	8.95	2	29.3	12	1.52
73	281000	2203000	1838	9.11	1.86	27.8	12	1.45
74	283000	2203500	1838	9.09	2.01	29.6	12	1.4
75	283000	2205500	1839	9.02	2.02	30.9	13	1.47
76	283000	2207500	1837	8.94	1.15	31	22	1.25
77	284000	2207011	1839	9.32	0.65	34.4	37	1.25
78	284916	2208293	1839	8.91	0.6	32.5	37	1.19

Anexo II. Parámetros Estadísticos de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Fracciones ( % )						Parámetros estadísticos			
	X	Y	(MzØ)	(σ <sub>1</sub> Ø)	(SK <sub>1</sub> )	(K <sub>G</sub> )	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
C-1	273150	2208960	3.11	1.15	0.26	2.16		86.38	10.40	3.22
C-2	270241	2208680	1.26	3.34	-0.02	1.07	26.09	55.55	15.34	3.02
C-3	267135	228588	1.35	3.02	-0.01	0.91	27.26	54.75	15.19	2.81
C-4	265418	2209048	0.33	3.87	-0.19	0.84	30.36	53.80	13.27	2.57
C-5	262754	2210533	4.44	2.50	-0.18	1.01		37.28	56.34	6.38
C-6	273328	2201823	1.64	2.15	-0.12	1.66	12.57	76.92	8.12	2.39
C-7	274250	2202904	4.38	2.49	-0.22	0.96		37.05	57.38	5.57
C-8	271513	2200919	3.06	1.27	0.23	1.75		83.21	14.27	2.52
C-9	269684	2200835	4.61	3.03	-0.09	0.84		39.62	46.74	13.64
C-10	268496	2201658	1.72	4.21	-0.25	0.54	38.15	22.40	35.80	3.65
C-11	266533	2202193	1.92	3.36	-0.13	1.32	18.31	57.81	20.94	2.93
C-12	258265	2207691	6.04	2.22	-0.06	0.98		18.43	62.65	18.92
C-13	257468	2206976	2.52	2.42	0.74	1.21	25.21	57.14	12.49	5.17
C-14	265382	2202911	5.02	2.24	-0.20	1.37		24.28	68.51	7.21
C-15	261530	2203034	5.22	1.89	0.27	1.16		24.58	65.71	9.72
C-16	258786	2203041	3.92	2.96	0.16	0.83		53.72	35.78	10.51
C-17	256804	2205313	5.24	2.60	-0.05	0.93		31.85	53.80	14.36
C-18	277784	2207434	0.91	2.71	-0.28	1.19	22.81	69.24	7.03	0.92
C-19	278858	2207521	4.07	1.69	0.18	1.31		52.99	43.37	3.64
C-20	279541	2207695	2.25	2.33	0.06	1.38	9.33	71.76	16.50	2.41
C-21	281262	2207777	1.72	2.05	0.04	0.98	9.27	78.42	11.28	1.04
C-22	283616	2208247	-2.02	2.41	0.66	1.26	79.06	18.72	1.95	0.27
C-23	284478	22208946	0.53	3.97	0.39	0.67	47.96	27.18	20.80	4.06
C-24	277236	2203789	4.67	1.89	0.13	1.14		37.70	56.54	5.76
C-25	277926	2203160	3.13	2.04	0.00	1.36		69.72	27.16	3.12
C-26	278095	2202665	4.74	1.68	0.13	1.62		28.75	65.69	5.56
C-27	278682	2202015	4.00	2.10	-0.15	1.13		43.29	52.36	4.35
C-28	279540	2201617	4.33	1.91	0.05	1.23		42.20	52.55	5.25
C-29	280496	2201311	4.83	1.94	0.02	1.19		31.34	62.58	6.08
C-30	281639	2201463	4.69	2.10	0.05	0.99		37.57	55.64	6.78
C-31	282785	2201544	3.02	2.80	-0.10	0.95	10.02	51.78	35.32	2.89
C-32	258231	2205461	4.58	2.23	0.16	1.13		41.35	49.45	9.20
C-33	260000	2204000	3.34	1.96	0.25	1.00		64.91	31.35	3.74
C-34	260000	2206000	4.17	2.57	0.19	0.93		52.10	38.70	9.21
C-35	260000	2207254	4.98	2.26	0.20	0.88		37.96	50.51	11.53
C-36	262057	2208921	4.04	2.05	0.41	1.20		60.49	32.15	7.36
C-37	262000	2207000	3.31	2.10	0.36	1.28		71.28	23.47	5.25
C-38	262000	2205000	3.49	2.29	0.33	0.98		62.78	31.07	6.15
C-39	264000	2204000	3.80	2.52	0.22	0.97		58.18	34.55	7.27
C-40	264000	2206000	2.98	1.94	0.43	1.42		77.30	17.96	4.74
C-41	264000	2208000	3.86	2.42	0.43	1.04		64.33	27.20	8.47
C-42	264263	2209917	4.00	1.54	0.33	1.59		59.28	36.28	4.44
C-43	266000	2208500	4.04	2.31	0.14	1.08		51.29	41.45	7.26
C-44	266000	2207000	2.75	1.96	0.38	1.41		79.66	16.51	3.84

Anexo II (Cont.). Parámetros Estadísticos de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Fracciones ( % )						Parámetros estadísticos			
	X	Y	(MzØ)	( $\sigma_1$ Ø)	(SK <sub>1</sub> )	(K <sub>G</sub> )	Gravas	Arenas	Limos	Arcillas
C-45	266000	2205000	3.68	2.20	0.29	1.08		61.94	31.81	6.25
C-46	266000	2203000	5.01	2.24	0.16	1.17		33.45	55.55	11.00
C-47	268000	2202500	3.62	1.96	0.30	1.13		65.31	30.84	3.85
C-48	268000	2204500	2.64	1.64	0.38	1.58		82.87	14.11	3.02
C-49	268000	2006500	2.68	1.74	0.40	1.44		81.27	15.69	3.04
C-50	268000	2208500	3.12	2.13	0.30	1.29		72.82	22.93	4.25
C-51	270000	2208000	3.22	2.18	0.36	1.09		69.65	25.22	5.14
C-52	270000	2206000	2.36	1.68	0.42	1.46		84.46	12.61	2.94
C-53	270000	2204000	2.34	1.48	0.31	1.75		87.42	10.05	2.52
C-54	270000	2202000	3.56	1.81	0.39	1.44		69.39	25.26	5.35
C-55	272000	2202500	3.46	1.70	0.32	1.33		69.10	26.96	3.94
C-56	272000	2204500	2.88	1.93	0.43	1.53		78.50	16.35	5.15
C-57	272000	2206500	2.61	2.04	0.41	1.34		79.07	16.58	4.35
C-58	272000	2208500	3.05	1.65	0.32	1.60		78.58	17.48	3.94
C-59	273533	2209021	3.52	2.30	0.52	1.39		73.17	19.46	7.37
C-60	274000	2206000	3.26	1.79	0.25	1.41		71.99	23.98	4.04
C-61	274000	2204000	2.85	1.99	0.43	1.41		77.97	17.49	4.54
C-62	275480	2205106	3.99	2.59	-0.05	0.84		48.36	46.55	5.08
C-63	275358	2206768	3.13	2.41	0.48	1.13		73.02	21.32	5.66
C-64	275241	2208548	4.03	1.90	0.28	1.32		55.91	38.03	6.06
C-65	276082	2208161	3.24	1.78	0.33	1.45		73.83	21.94	4.24
C-66	277000	22060500	3.22	2.43	0.56	1.07		72.34	20.98	6.68
C-67	277000	2205000	3.10	2.47	0.59	1.04		72.62	21.00	6.37
C-68	279000	2203500	3.29	2.41	0.60	0.95		70.34	23.19	6.47
C-69	279000	2205000	3.26	2.42	0.58	1.08		72.42	20.89	6.68
C-70	279000	226500	3.13	2.21	0.50	1.29		75.06	19.19	5.76
C-71	281000	2207000	2.61	2.16	0.40	1.40		79.36	16.20	4.45
C-72	281000	2205000	3.67	2.71	0.47	0.76		61.66	29.14	9.21
C-73	281000	2203000	3.18	2.39	0.58	1.02		72.32	22.00	5.67
C-74	283000	2203500	2.92	2.50	0.61	0.85		70.71	24.23	5.06
C-75	283000	2205500	3.32	2.46	0.52	0.91		69.12	24.80	6.07
C-76	283000	2207500	3.12	2.51	0.49	0.97		70.06	24.17	5.77
C-77	284000	2207011	3.78	2.18	0.21	0.76		54.32	41.43	4.25
C-78	284916	2208293	4.14	2.41	-0.09	0.89		44.68	50.16	5.16

Anexo III. Porcentajes de los tipos de transporte del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Tracción (%)	Saltación %	Suspensión (%)	Muestra	Tracción (%)	Saltación %	Suspensión (%)
1	10	80	10	40	3.8	81	15.2
2	26.4	58.6	15	41	3.5	74.6	21.9
3	28.8	60	11.2	42	9.2	70.8	20
4	32.5	47.6	19.9	43	5.3	79.7	15
5	0.2	94.8	5	44	6.1	72.7	21.2
6	12.8	76.1	11.1	45	2.6	79.8	17.6
7	0.2	94.3	5.5	46	12.8	63.1	24.1
8	2.5	86.7	10.8	47	6.5	89.3	4.2
9	0.2	96.5	3.3	48	4.1	80.7	15.2
10	47.7	50.3	2	49	4.2	77.1	18.7
11	18.4	76.1	5.5	50	18	54	28
12	5.8	88.5	5.7	51	6.1	71.7	22.2
13	25.6	54.9	19.5	52	3.5	82.4	14.1
14	11.8	83.5	4.7	53	7.9	82	10.1
15	5.8	62.2	32	54	4	78	18
16	0.2	95.3	4.5	55	1.4	80.6	18
17	0.3	97.2	2.5	56	4.8	77.7	17.5
18	23.1	69.8	7.1	57	2.6	80.6	16.8
19	11	82.5	6.5	58	2.4	84.4	13.2
20	8	76.9	15.1	59	6.1	65.7	28.2
21	9.5	87.5	3	60	5.8	81	13.2
22	83	14.6	2.4	61	5.5	78.4	16.1
23	48	50.8	1.2	62	0.5	97.5	2
24	9.1	85.9	5	63	8.8	58	33.2
25	0.5	85.1	14.4	64	11.2	70.1	18.7
26	9	84	7	65	4.2	80.4	15.4
27	7	86.9	6.1	66	5	61.8	33.2
28	5	82.8	12.2	67	3	62.3	34.7
29	12	83.5	4.5	68	3.6	59.8	36.6
30	2	94.5	3.5	69	4.6	62.8	32.6
31	10	86.3	3.7	70	4.1	70.7	25.2
32	4.2	74	21.8	71	0.5	78.7	20.8
33	5	87.6	7.4	72	4.3	47.2	52.5
34	7.8	91	1.2	73	4.8	60.5	34.7
35	5.9	91.4	2.7	74	2.7	54.5	42.8
36	11	68	21	75	5.8	56.2	38
37	6.3	77.2	16.5	76	9	55	36
38	4.7	81.8	13.5	77	3.5	39.3	57.2
39	9	85.6	5.4	78	9.5	37.9	52.6

Anexo IV. Índice de Madurez y Procedencia del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Fragmentos de roca (%)	Índice de Madurez	Índice de Procedencia
C-1	26.57	60.14	13.29	0.36	4.53
C-2	37.63	28.87	33.51	0.60	0.86
C-4	19.84	61.90	18.25	0.25	3.39
C-6	28.57	43.63	27.80	0.40	1.57
C-8	22.56	60.06	17.38	0.29	3.46
C-10	24.12	44.75	31.13	0.32	1.44
C-11	25.52	44.76	29.72	0.34	1.51
C-13	34.16	33.81	32.03	0.52	1.06
C-15	36.44	36.44	27.13	0.57	1.34
C-17	31.22	42.33	26.46	0.45	1.60
C-18	46.31	37.25	16.44	0.86	2.27
C-20	41.02	26.17	32.81	0.70	0.80
C-21	31.25	17.86	50.89	0.45	0.35
C-23	15.85	29.27	54.88	0.19	0.53
C-24	18.73	45.69	35.58	0.23	1.28
C-30	28.33	31.67	40.00	0.40	0.79
C-31	25.10	46.15	28.74	0.34	1.61
C-26	28.97	53.27	17.76	0.41	3.00
C-27	34.33	37.31	28.36	0.52	1.32
C-29	25.47	60.87	13.66	0.34	4.45
C33	22.98	62.73	14.29	0.30	4.39
C-34	18.75	47.92	33.33	0.23	1.44
C-36	24.49	57.14	18.37	0.32	3.11
C-38	27.50	65.00	7.50	0.38	8.67
C-41	37.84	56.76	5.41	0.61	10.50
C-42	18.75	62.50	18.75	0.23	3.33
C-47	27.27	41.82	30.91	0.38	1.35
C-49	20.00	41.43	38.57	0.25	1.07
C-48	6.38	48.94	44.68	0.07	1.10
C-55	40.00	60.00	0.00	0.67	0.00
C-57	10.00	66.67	23.33	0.11	2.86
C-63	2.20	70.33	27.47	0.02	2.56
C-70	41.58	35.64	22.77	0.71	1.57
C-71	15.38	69.23	15.38	0.18	4.50
C-72	23.42	52.25	24.32	0.31	2.15
C-73	27.59	44.83	27.59	0.38	1.63
C-74	11.43	22.86	65.71	0.13	0.35
C-76	26.88	44.09	29.03	0.37	1.52
C-77	12.82	35.90	51.28	0.15	0.70

## Anexo V. Contenido de elementos mayores en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PXC
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
C-1	50.86	0.47	14.70	3.27	0.06	2.53	12.60	2.65	1.63	0.54	11.35
C-3	60.93	0.53	13.82	3.61	0.06	1.69	6.07	3.06	2.71	0.36	7.59
C-4	69.86	0.35	12.18	2.50	0.03	1.06	1.96	2.85	3.81	0.21	5.51
C-5	58.00	0.62	10.70	3.68	0.05	0.83	1.36	1.92	1.82	0.12	19.98
C-6	58.61	0.79	15.75	3.75	0.08	1.52	6.59	3.37	2.36	0.22	6.35
C-7	41.70	0.55	11.85	4.48	0.09	3.12	4.78	2.06	1.88	0.26	28.30
C-9	50.02	0.98	14.51	6.62	0.11	2.91	4.01	2.15	2.06	0.35	16.21
C-10	56.87	0.94	15.87	5.62	0.09	2.19	4.49	2.90	2.24	0.33	8.95
C-12	52.05	0.62	12.87	5.09	0.06	1.92	1.66	0.71	0.93	0.18	24.01
C-14	52.34	0.99	14.69	5.70	0.09	1.88	3.18	2.35	1.74	0.22	17.56
C-16	51.96	0.88	15.63	5.63	0.08	1.04	1.49	1.56	1.40	0.17	19.43
C-17	48.35	1.63	19.51	9.99	0.28	1.30	2.25	1.44	1.13	0.25	13.72
C-19	53.84	0.77	12.43	3.86	0.08	3.00	8.14	1.70	1.44	0.27	14.12
C-22	42.25	0.48	10.88	3.74	0.13	3.97	16.19	1.34	1.27	0.78	19.43
C-23	64.59	1.23	11.33	3.57	0.05	1.28	7.32	2.87	2.21	0.27	6.11
C-24	51.18	1.15	16.01	6.10	0.08	3.09	7.58	2.68	1.70	0.45	9.14
C-27	54.20	0.64	14.57	3.68	0.07	2.52	9.48	2.58	1.54	0.53	9.71
C-29	51.50	0.72	13.99	4.72	0.06	2.94	7.09	1.66	1.19	0.42	15.11
C-31	50.85	0.76	15.40	5.21	0.08	3.35	7.36	2.56	1.57	0.95	11.10
C-32	52.28	0.64	13.75	5.12	0.08	4.03	6.02	1.80	1.85	0.30	14.61
C-33	47.84	0.71	16.52	6.17	0.08	4.38	4.83	1.60	2.45	0.17	14.82
C-34	46.41	0.66	13.26	5.18	0.09	5.09	9.58	1.92	1.93	0.29	16.20
C-36	48.30	0.82	16.60	6.38	0.09	3.79	5.63	2.13	2.44	0.22	14.46
C-37	48.66	0.81	16.40	6.01	0.09	3.80	5.71	2.08	2.23	0.19	14.71
C-39	49.55	0.79	17.47	6.35	0.09	3.79	4.11	2.14	2.48	0.17	13.35
C-40	49.36	0.82	17.52	6.37	0.10	3.89	4.46	2.11	2.36	0.17	13.60
C-41	49.96	0.82	16.56	6.07	0.10	3.69	5.03	2.17	2.38	0.18	13.75
C-42	49.60	0.81	16.95	6.40	0.09	3.60	4.97	2.08	2.39	0.20	13.61
C-43	50.38	0.77	16.44	6.05	0.09	3.59	4.85	2.34	2.45	0.19	13.26
C-44	49.27	0.81	17.05	6.05	0.11	3.64	4.93	2.27	2.34	0.18	14.25
C-45	48.84	0.80	17.71	6.51	0.10	3.70	4.40	2.13	2.35	0.16	13.79
C-48	48.73	0.78	17.91	6.54	0.10	3.89	4.22	2.12	2.37	0.16	13.60
C-49	49.43	0.79	17.10	6.27	0.10	3.85	4.44	2.11	2.37	0.18	13.80
C-51	49.15	0.79	17.39	6.51	0.10	4.02	4.35	2.18	2.37	0.17	13.61
C-52	49.00	0.79	17.09	6.52	0.10	3.99	4.25	2.09	2.35	0.16	13.99
C-54	49.10	0.80	17.24	6.59	0.09	4.02	4.03	1.98	2.58	0.16	13.62
C-55	48.88	0.78	16.93	6.44	0.10	4.22	4.39	2.14	2.48	0.16	14.19
C-56	49.18	0.79	17.66	6.54	0.09	4.06	3.88	1.97	2.39	0.15	13.51
C-59	48.07	0.72	15.80	5.66	0.09	4.01	6.63	2.09	2.38	0.22	14.67

\*La pérdida por calcinación se determinó por diferencias de peso

Anexo V (Cont.). Contenido de elementos mayores en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PXC
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
C-60	48.67	0.76	17.5	6.38	0.09	4.20	4.31	1.95	2.44	0.2	14.04
C-63	48.75	0.76	16.9	6.40	0.08	4.45	4.14	1.55	2.5	0.2	14.53
C-64	51.25	0.8	16.2	5.87	0.08	3.63	5.90	2.29	2.24	0.2	12.35
C-65	48.92	0.73	16.8	6.14	0.08	4.48	4.54	1.67	2.44	0.2	14.39
C-69	48.64	0.73	16.8	5.89	0.09	4.57	5.83	1.13	1.82	0.2	14.53
C-71	48.39	0.65	15	5.36	0.10	6.02	8.14	1.17	1.82	0.2	13.65
C-73	49.28	0.7	15.4	5.28	0.10	4.88	7.08	1.22	1.89	0.2	13.2
C-74	48.5	0.67	14.3	5.12	0.10	5	7.83	1.21	1.78	0.3	15.07
C-75	50.31	0.72	16	5.56	0.09	5.07	6.42	1.26	1.97	0.2	12.71
C-77	48.54	0.67	14.4	5.15	0.12	5.12	7.65	1.2	1.77	0.2	15.14
C-78	47.01	0.59	13	4.46	0.12	5.03	8.32	0.97	1.54	0.3	18.88
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PXC
Promedio	50.8	0.77	15.4	5.52	0.09	3.47	5.68	1.99	2.08	0.3	14.07
Desviación Estándar	4.79	0.2	2.03	1.25	0.03	1.23	2.67	0.57	0.5	0.2	3.98
Máximo	69.86	1.63	19.5	9.99	0.27	6.02	16.18	3.37	3.81	0.9	28.3
Mínimo	41.7	0.35	10.7	2.49	0.02	0.82	1.36	0.71	0.93	0.1	5.51
Coef. Var.	9.44	25.6	13.1	22.71	35.5	35.41	46.94	28.4	24.2	60	28.28

Anexo VI. Contenido de elementos traza en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Muestra	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
C-1	46	1081	557	25	219	8	48	31	14	18	12	46	5	13
C-3	105	433	422	38	195	14	52	29	14	16	19	112	8	33
C-4	189	173	243	62	418	25	34	18	8	10	12	111	18	25
C-5	108	144	287	41	264	9	94	103	38	28	47	117	8	18
C-6	55	737	633	23	204	8	62	51	17	18	13	51	4	10
C-7	128	781	329	27	205	6	91	79	13	27	30	99	5	14
C-9	67	456	543	30	215	12	114	88	26	37	30	109	5	11
C-10	63	467	545	23	216	14	109	68	18	26	29	118	6	20
C-12	87	210	291	27	191	12	139	59	22	33	35	89	4	13
C-14	66	418	529	30	226	12	113	103	29	34	32	99	4	15
C-16	78	215	510	36	258	16	116	87	29	33	36	113	10	19
C-17	59	227	781	40	300	25	221	352	45	75	44	137	7	20
C-19	67	665	426	27	328	12	59	76	17	19	22	60	6	13
C-22	50	964	474	18	176	6	71	40	15	20	17	56	<3	9
C-23	65	463	607	31	514	14	66	157	16	14	8	41	5	10
C-24	50	712	488	18	183	9	145	237	23	36	34	112	<3	28
C-27	52	891	609	19	188	5	61	115	18	21	16	113	4	11
C-29	49	667	452	23	185	8	74	105	16	22	24	73	4	11
C-31	58	660	483	24	173	7	108	71	28	30	32	149	5	25
C-32	78	595	604	26	195	12	79	54	15	25	23	69	5	14
C-33	88	507	470	26	209	14	79	58	19	32	21	96	6	19
C-34	69	804	479	23	211	12	75	57	17	26	21	67	4	11
C-36	79	550	502	27	221	15	89	62	18	32	22	89	5	19
C-37	84	444	458	27	217	15	86	63	18	31	20	93	6	19
C-39	78	544	511	27	223	16	75	54	17	31	23	83	5	18
C-40	83	463	526	26	214	15	74	56	17	31	22	91	6	20
C-41	80	516	523	27	218	15	70	55	17	30	21	86	7	21
C-42	84	523	508	27	221	15	91	66	18	31	22	99	5	18
C-43	85	518	448	29	222	15	91	62	17	30	23	94	5	19
C-44	80	501	525	28	216	15	74	54	16	29	21	87	6	19
C-45	82	459	493	28	215	15	76	60	18	32	22	92	6	22
C-48	84	446	493	26	213	16	77	59	17	33	20	93	5	19
C-49	84	456	495	27	218	15	79	59	16	31	22	91	5	19
C-51	86	454	484	28	216	15	75	57	19	32	22	96	6	21
C-52	86	451	479	28	218	16	78	56	18	32	23	95	7	23
C-54	89	437	474	28	216	17	86	57	19	32	22	99	5	22
C-55	86	466	497	28	214	15	83	56	18	31	22	96	5	21
C-56	85	418	480	25	217	15	84	56	15	32	20	96	6	24
C-59	80	596	472	27	227	14	80	54	19	28	20	88	4	19

Anexo VI (Cont.). Contenido de elementos traza en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Muestra	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
C-60	88	463	464	27	215	15	87	54	18	31	22	96	5	19
C-63	88	451	461	25	213	15	111	57	17	31	21	96	6	20
C-64	74	601	570	27	215	13	84	70	18	29	21	80	6	16
C-65	85	490	460	24	213	16	84	55	16	30	22	93	6	18
C-69	81	568	417	25	211	13	83	62	17	29	23	79	7	16
C-71	77	774	413	25	211	12	88	52	16	27	22	70	5	17
C-73	77	646	453	25	205	12	85	54	15	26	22	72	5	15
C-74	75	702	450	24	199	12	65	51	17	25	25	72	4	14
C-75	80	600	437	25	204	13	76	54	16	28	24	76	7	18
C-77	68	468	439	20	164	4	72	49	15	26	23	71	4	14
C-78	68	582	439	20	168	6	75	58	14	25	21	64	5	16
	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
Promedio	79.06	537	482.7	27.3	223.9	13	85.7	72.8	18.7	28.7	23.4	89.5	5.77	17.76
Desv. Est.	22.1	186	87.3	6.81	57.9	4.175	28.2	52.2	6.09	8.78	7.13	21.4	2.19	4.826
Máximo	189	1081	781	62	514	25	221	352	45	75	47	149	18	33
Mínimo	46	144	243	18	164	4	34	18	8	10	8	41	4	9
Coef. var.	27.95	34.7	18.09	24.9	25.86	32.11	32.8	71.7	32.6	30.6	30.5	23.9	37.9	27.17

Anexo VII. pH en sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Muestra	pH en sedimento	Muestra	pH en sedimento	Muestra	pH en sedimento
C-2	10.38	C-26	9.95	C-50	10.55
C-8	10.09	C-28	9.93	C-61	10.5
C-11	10	C-30	9.7	C-66	9.89
C-13	8.87	C-35	10.18	C-67	9.84
C-15	10.18	C-36	10.52	C-68	9.99
C-21	9.57	C-42	10.4	C-72	9.86
C-25	10.02	C-46	10.55	C-76	9.9

Anexo VIII. Color de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Hue húmedo	Chroma húmedo	Color húmedo	Hue seco molido	Chroma seco molido	Color seco molido
C-1	2.5Y	3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR	7/1	Gris claro
C-2	2.5Y	3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-3	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-4	5YR	2.5/1	Negro	10YR	6/1	Gris
C-5	10YR	2/2	Pardo muy oscuro	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-6	5Y	4/2	Gris olivo	10YR	7/2	Gris claro
C-7	5Y	2.5/1	Negro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-8	5Y	3/2	Gris olivo	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-9	5Y	3/1	Gris oscuro negro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-10	5Y	3/1	Gris oscuro negro	10YR	7/2	Gris claro
C-11	5Y	3/2	Gris olivo	10YR	7/1	Gris claro
C-12	2.5Y	3/1	Gris muy oscuro	10YR	4/1	Gris oscuro
C-13	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/4	Pardo muy pálido
C-14	2.5Y	2/0	Gris oscuro	10YR	6/1	Gris
C-15	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-16	5Y	2.5/1	Negro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-17	2.5Y	3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR	4/4	Pardo amarillento oscuro
C-18	5Y	3/2	Gris olivo oscuro	10YR	5/1	Gris claro
C-19	5Y	3/2	Gris olivo oscuro	10YR	5/1	Gris
C-20	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/1	Gris claro
C-21	5Y	3/2	Gris olivo oscuro	10YR	6/1	Gris
C-22	5Y	2.5/1	Negro	10YR	6/1	Gris
C-23	5Y	2.5/2	Negro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-24	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-25	5Y	3/2	Gris olivo	10YR	7/2	Gris claro
C-26	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-27	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/1	Gris
C-28	10 YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/1	Gris
C-29	10YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/1	Gris
C-30	2.5Y	3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR	6/1	Gris
C-31	2.5Y	3/2	Pardo grisáceo muy oscuro	10YR	6/1	Gris

Anexo VIII (Cont.). Color de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Hue húmedo	Chroma húmedo	Color húmedo	Hue seco molido	Chroma seco molido	Color seco molido
C-32	10YR	4/1	Gris oscuro	10YR	6/1	Gris
C-33	5Y	2.5/2	Negro	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-34	2.5Y	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/1	Gris
C-35	2.5Y	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/1	Gris
C-36	10YR	4/1	Gris oscuro	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-37	10YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-38	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-39	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-40	Y	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/1	Gris claro
C-41	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-42	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-43	5Y	3/2	Gris olivo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-44	10YR	3/2	Gris olivo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-45	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-46	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/1	Gris claro
C-47	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-48	10YR	4/1	Gris oscuro	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-49	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro
C-50	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-51	10YR	3/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	7/2	Gris claro

Anexo VIII (Cont.) Color de los sedimentos del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Hue húmedo	Chroma húmedo	Color húmedo	Hue seco molido	Chroma seco molido	Color seco molido
C-52	10YR	6/2	Gris pardusco claro	10YR	7/2	Gris claro
C-53	10YR	5/1	Gris	10YR	7/2	Gris claro
C-54	10YR	6/1	Gris	10YR	7/1	Gris claro
C-55	10YR	5/2	Gris	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-56	10YR	6/1	Gris	10YR	7/2	Gris claro
C-57	10YR	6/1	Gris	10YR	7/2	Gris claro
C-58	10YR	6/1	Gris claro pardusco	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-59	10YR	6/1	Gris	10YR	7/1	Gris claro
C-60	10YR	6/1	Gris	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-61	10YR	6/1	Gris	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-62	10YR	4/1	Gris oscuro	10YR	6/1	Gris
C-63	10YR	4/1	Gris oscuro	10YR	6/1	Gris
C-64	10YR	6.1	Gris	10YR	7/2	Gris claro
C-65	10YR	6.1	Gris	10YR	6/1	Gris
C-66	10YR	5/1	Gris	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-67	10YR	5/1	Gris	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-68	10YR	5/1	Gris	10YR	6/1	Gris
C-69	10YR	5/1	Gris	10YR	6/1	Gris
C-70	10YR	6/1	Gris	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-71	10YR	5/1	Gris	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-72	10YR	5/1	Gris	10YR	6/2	Gris claro pardusco
C-73	10YR	5/1	Gris	10YR	6/1	Gris
C-74	10YR	4/2	Pardo grisáceo oscuro	10YR	6/2	Pardo grisáceo claro
C-75	10YR	5/1	Gris	10YR	6/1	Gris
C-76	10YR	5/1	Gris	10YR	6/1	Gris
C-77	10YR	5/1	Gris	10YR	6/2	Gris pardusco claro
C-78	10YR	5/1	Gris	10YR	6/1	Gris

Anexo IX. Petrografía del núcleo\* estudiado del Vaso Poniente de Lago de Cuitzeo.

Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad
0.20 m	0.70 m	1.5 m	2.80 m	5.7 m
	Cuarzo			
Plagioclasas (andesina-oligoclasa)	Plagioclasas (andesina-oligoclasa)	Plagioclasas (oligoclasa, andesina) en arcilla aglutinada	Cuarzo (escaso)	Plagioclasas (andesina-oligoclasa)
Piroxenos	Arcillas	Caolinita	Montmorillonita	Biotita
Montmorillonita	Sericita	Feldespatos alterados	Sericita	Diatomeas
Caolinita	Magnetita	Caolinita	Arcillas	Arcilla abundante
Sericita	Casiterita?	Vidrio	Hematita- limonita	Óxidos de fierro
Hematita limonita		Limonita		
Sedimentos lacustres	Sedimentos lacustres	Sedimentos lacustres	Diatomita con oxidaciones	Sedimentos lacustres

Anexo IX (Cont.). Petrografía del núcleo\* estudiado del Vaso Poniente de Lago de Cuitzeo.

Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad
6.3-6.5 m	14.8-14.9 m)	16-16.2 m	17.8-18 m	19.10-19.30 m
Plagioclasas (andesina-oligoclasa)	Plagioclasa Oligoclasa Andesina	Cuarzo	Cuarzo	Cuarzo
Arcillas (como aglutinantes)	Fragmentos de roca andesíticos y basálticos	Plagioclasas y Feldespatos potásicos	Plagioclasas (Oligoclasa-andesina)	Plagioclasas
Diatomita	Biógenos calcáreos y opalinos	Fragmentos de roca plutónica (microdiorita)	Ceniza volcánica	Fragmentos de roca volcánicos andesíticas
Fragmentos de roca de un ambiente ignimbrítico	Abundantes óxidos de fierro	Biógenos calcáreos	Arcilla	Arcilla (abundante)
	Ceniza Volcánica	Ceniza volcánica	Hematita-limonita	Ceniza volcánica
	Arcillas		Ópalo	Sericita
		Hematita-limonita		Hematita-Limonita
		arcillas		
Sedimentos lacustres	Sedimentos lacustres	Sedimentos lacustres	Sedimento lacustre	Sedimento lacustre

Anexo IX (Cont.). Petrografía del núcleo\* estudiado del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo.

Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad	Profundidad
21.6-21.8 m	2.2-22.4 m	23-23.20 m	23.5-23.7 m	24.3-24.5
Cuarzo	Cuarzo	Plagioclasas (Oligoclasa-labradorita)	Plagioclasas	Piroxenos (augita)
Plagioclasas (andesina-oligoclasa)	Plagioclasas	Olivino alterado a Iddingsita	Fragmentos de roca andesíticos	Fragmentos de Andesitas textura traquítica
Feldespatos potásicos	Fragmentos de rocas volcánicos (andesitas) y microdiorita (Hipabisal)	Pigeonita	Ceniza volcánica	Fragmentos de vidrio ignimbrítico vermicular
Fragmentos de roca andesítica	Cenizas volcánicas	Magnetita	Biógenos	Magnetita
Zeolitas?	arcillas		Arcillas	Diatomeas
Sericita (abundante)	Hematita limonita			Desvitrificación a plagioclasa
Hematita-limonita				Ceniza volcánica
Arcillas				Arcillas
Sedimentos lacustres	Sedimentos lacustres	Andesita basáltica de olivino	Sedimentos lacustres	Sedimentos lacustres

\* Proporcionado por La Dra Israde-Alcantara

Anexo X. Petrografía de la fracción arenosa del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Cuarzo	Feldespatos	Fragmentos roca	Vidrio	Accesorios	Secundarios	Carbonatos	Arenas de lodo	Biógenos
C-1	Subredondeado	Oligoclasa-andesina	Volcánicos	Fragmentos	Magnetita, Muscovita, Hornblenda	Illita	Calcita (micrita) y autigénica	Abundantes	Ostrácodos
C-2	Monocristalino, policristalino (escaso), calcedonia	Oligoclasa-andesina	Basaltos, andesitas, microdiorita	Silíceo	Biotita, hornblenda, Magnetita, olivino	Sericita	Calcita	Abundantes	Ostrácodos
C-3	Monocristalino		Riolitas, ignimbritas, microdiorita, andesita					Abundantes	Diatomeas, ostrácodos
C-4	Monocristalino, policristalino (escaso)	Abundante oligoclasa-andesina	Riolitas, ignimbritas, microdiorita, andesita, basalto		Biotita, hornblenda, olivino, piroxenos, tremolita-actinolita		Calcita	En menor cantidad que las plagioclasas	
C-6	Abundante	Oligoclasa-andesina	Basaltos con pigeonita y olivino, ignimbritas	Vidrio en las ignimbritas	Hornblenda, olivino, opacos			En menor cantidad que las plagioclasas	Escasos
C-8	Monocristalino	Abundante oligoclasa-andesina	Volcánicos		Olivino, opacos (magnetita)			escasos	
C-11	Monocristalino	abundantes	Abundantes		Magnetita			Escasos	Escasos
C-13	abundante	abundantes	Volcánicos	escaso	Olivino, magnetita			Escasos	
C-15	Abundante calcedonia	Oligoclasa-andesina	Ignimbritas, riolitas, andesitas	Fragmentos de vidrio	Olivino, hornblenda, opacos, magnetita)		Calcita	Abundante	Ostrácodos

Anexo X (Cont.). Petrografía de la fracción arenosa del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Cuarzo	Feldespatos	Fragmentos roca	Vidrio	Accesorios	Secundarios	Carbonatos	Arenas de lodo	Biógenos
C-17	Cuarzo	Abundantes	Ignimbritas, riolitas, andesitas	Fragmentos de vidrio	Opacos (magnetita). olivino, hornblenda			abundante	
C-18	Muy abundante, calcedonia	Abundante	Rolitas y andesitas		Olivino, augita?, hornblenda, biotita, magnetita opacos (magnetita)			Escaso	Escaso
C-20	Abundante	Oligoclasa-andesina	Riolita, ignimbrita, dacita, microdacitas		Magnetita, hornblenda			Escaso	Escaso
C-21	Monocristalino	Oligoclasa-andesina	Dacitas, microdacitas, ignimbritas andesitas		Olivino, hornblenda			Abundante	Muy abundante
C-23	monocristalino	Oligoclasa-andesina	abundantes	Volcánicos	Opacos (magnetita)			Muy abundante	Ostrácodos
C-24	Monocristalino	Abundante (oligoclasa-andesina)	Abundante (oligoclasa-andesina) alteradas	Dacitas basaltos, andesitas.	Opacos (magnetitas), hornblenda	Sericita		Escasos	Escaso
C-26	Monocristalino	Plagioclasas (abundantes)	Volcánicos		Hornblenda, biotita, piroxenos?			abundante	Ostrácodos
C-27	Monocristalino	Plagioclasas	Volcánicos, plutónicos					Abundante	Abundante
C-29	Monocristalino	Plagioclasas	Microdioritas, volcánicos		Opacos (magnetita), hornblenda, biotita, olivino			Abundantes	Ostrácodos

Anexo X (Cont.). Petrografía de la fracción arenosa del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Cuarzo	Feldespatos	Fragmentos roca	Vidrio	Accesorios	Secundarios	Carbonatos	Arenas de lodo	Biógenos
C-30	Escaso	Escaso	Volcánicos		Opacos			Muy abundantes	Ostrácodos
C-31	monocristalino	Muy abundante (oligoclasa – andesina)	Volcánicos, microdioritas, basaltos, andesitas, riolitas	Vidrio (en desvitrificación)	Opacos			escasos	Ostrácodos
C-33	Cuarzo	Abundantes	Volcánicos	Opacos, hornblenda				Muy abundantes	Abundantes
C-34	escaso	Escasa (oligoclasa andesina, potásicos (sandino))	Volcánicos	Opacos				Muy abundantes	Muy abundantes
C-36	escaso	escaso	Volcánicos	Opacos				Muy abundantes	Abundantes
C-38	Escaso	Escaso	Volcánicos (escasos)	Opacos				Muy abundantes	Escasos
C-41	Escaso	Escaso	Volcánicos (escasos)	Opacos				Muy abundantes	Escasos
C-42	Escaso	Oligoclasa-andesina	Andesitas, basaltos		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos
C-47	Escaso	Oligoclasa-andesina	Andesitas, basaltos		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso)
C-48	Escaso	Oligoclasa-andesina	Andesitas, basaltos, riolitas		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso), diatomeas?
C-49	Escaso	Oligoclasa-andesina	Andesitas, basaltos		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso)
C-55	Escaso	Oligoclasa-andesina			Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso)
C-57	Escaso	Oligoclasa-andesina	Andesitas, basaltos		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso)

Anexo X (Cont.). Petrografía de la fracción arenosa del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	Cuarzo	Feldespatos	Fragmentos roca	Vidrio	Accesorios	Secundarios	Carbonatos	Arenas de lodo	Biógenos
C-63	Escaso	Oligoclasa-andesina (escaso)	En desvitrificación		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso)
C-70	Monocristalino	Oligoclasa-andesina	Riolitas y andesitas		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (Abundante)
C-71	Escaso	Oligoclasa-andesina	Andesita y riolitas con desvitrificación		Opacos			Muy abundante, con fragmentos de plagioclasa, cuarzo y organismos	Ostrácodos (abundante)
C-72	monocristalino	Oligoclasa-andesina	Andesitas y riolitas con desvitrificación		olivino,			abundante	Ostrácodos (muy abundante)
C-74	Escaso	Escaso	Riolitas con desvitrificación		Opacos			Muy abundante	Ostrácodos (escaso)
C-76	Monocristalino, calcedonia	Basalto, andesita, riolita?			Opacos	Sericita		Muy abundante	Ostrácodos (abundante)
C-77	Calcedonia	Escasos	Rocas basálticas y fragmentos en desvitrificación		Opacos, anfíboles y olivino			Muy abundante	Ostrácodos (abundante)

Anexo XI. Minerales observados en las fracciones arenosas en láminas delgadas, determinados en el microscopio petrográfico

Muestra	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)	Fragmentos de roca (%)	Minerales pesados (%)	Biógenos (%)	Arenas de lodo (%)
C-1	12.18	27.56	6.09	6.73	32.05	15.38
C-2	20.00	15.34	18.36	6.03	21.92	18.36
C-4	15.06	46.99	13.86	8.13	9.04	6.93
C-6	18.45	49.13	14.21	5.49	0.50	12.22
C-8	19.02	50.64	14.65	5.66	0.00	10.03
C-10	20.60	38.21	26.58	5.98	0.00	8.64
C-11	21.73	38.10	25.30	2.68	0.60	11.61
C-13	28.49	13.65	28.19	26.71	0.00	2.97
C-15	25.71	25.71	19.71	3.71	10.00	15.14
C17	17.51	23.74	14.84	6.82	10.09	27.00
C-18	37.70	30.33	13.39	4.92	4.64	9.02
C-20	29.58	18.87	24.79	5.92	9.86	10.99
C-21	10.57	6.04	19.03	2.11	35.05	27.19
C-23	7.62	14.08	26.39	2.64	12.61	36.66
C-24	13.23	32.28	25.13	15.87	8.20	5.29
C-26	17.92	32.95	10.98	1.45	11.56	25.14
C-27	6.25	6.79	5.16	0.00	36.41	45.38
C-29	12.02	28.74	6.45	6.45	8.21	38.12
C-30	4.78	5.34	6.74	2.81	17.70	62.64
C-31	18.40	33.83	21.07	5.93	8.01	12.76
C-33	6.94	18.95	4.32	1.88	29.64	38.27
C-34	2.46	6.83	4.37	1.37	39.34	45.63
C-36	2.90	6.76	2.17	1.45	22.95	63.77
C-38	2.28	5.39	0.62	0.41	5.60	85.68
C-41	2.93	4.39	0.42	0.42	0.42	91.42
C-42	2.32	7.72	2.32	0.00	11.97	75.68
C-47	3.58	5.49	4.06	0.48	6.68	79.71
C-48	0.46	5.24	4.78	0.23	11.39	77.90
C-49	3.35	6.94	6.22	0.00	6.22	77.27
C-55	1.00	1.50	0.00	0.00	13.72	83.79
C-57	0.71	4.74	1.66	0.24	11.14	81.52
C-63	0.47	0.94	5.90	0.00	4.01	88.68
C-70	8.35	7.16	4.57	0.20	31.41	48.31
C-71	1.70	7.67	1.70	0.85	21.02	67.05
C-72	6.50	14.50	6.75	1.75	49.25	21.25
C-73	6.19	10.05	6.19	3.87	63.66	10.05
C-74	0.92	1.85	5.31	0.23	5.08	86.61
C-76	5.91	9.69	6.38	1.42	23.64	52.96
C-77	1.47	4.11	5.87	1.47	30.21	56.89

Anexo XII. Geoquímica de sedimentos de arroyos de la Cuenca de Cuitzeo

Estación	Pb (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Estación	Pb (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)
27	47.21	11.58	77.19	137	28.01	17.37	75.6
28	25.03	0.9	58.75	138	56.54	14.47	113
29	42.63	8.62	76.67	144	27.92	15.18	59.31
30	32.02	10.08	67.21	145	20.2	15.13	59.8
31	28.53	6.05	67.9	146	12.53	10.82	47.43
32	19.68	6.1	65.08	147	20.41	3.94	73.35
33	19.59	6.92	58.99	148	35	16.77	85.91
34	45.15	9.69	93.2	149	26.22	14.65	67.86
35	28.59	5.98	64.49	150	18.95	13.3	49.03
36	22.17	6.2	60.2	151	17.44	5.75	53.05
37	19.19	6.77	69.09	152	16.8	0.9	55.86
39	16.47	3.76	56.37	153	18.17	8.68	55.05
40	18.03	6.79	46.33	154	16.62	5.91	60.03
41	18.94	10.36	44.65	155	31.52	19.72	76.81
42	10.47	1.24	25.3	156	17.82	5.78	51.14
43	27.38	4.87	50.2	157	26.07	10.06	50.93
44	16.69	2.72	44.25	158	28.83	13.68	87.42
45	27.44	3.56	44.54	159	89.64	16.56	109.04
46	14.39	0.9	44.03	160	42.09	10.06	157.39
47	30.34	8.98	66.92	205	37.33	26.74	73.62
48	26.48	6.05	36.2	206	35.41	26.24	63.49
136	28.31	16.17	48	Promedio	27.63	9.6744186	64.90

Anexo XIII. Nutrientes del Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Muestra	N-NH4	P-PO4	Si-SiO4	N-NO2	N-NO3	Muestra	N-NH4	P-PO4	Si-SiO4	N-NO2	N-NO3
C-32	0.357	3.809	31.865	0.010	0.026	C-56	0.137	4.144	33.925	0.013	0.045
C-33	0.152	4.906	36.656	0.009	0.028	C-57	0.156	4.463	34.406	0.021	0.040
C-34	0.290	4.828	33.686	0.012	1.042	C-58	0.116	2.967	24.295	0.011	0.032
C-35	0.211	3.732	25.060	0.012	0.074	C-59	0.233	2.620	23.191	0.016	0.149
C-36	0.157	5.392	38.143	0.011	0.081	C-60	0.139	2.217	22.328	0.016	0.041
C-37	0.197	5.141	36.322	0.053	0.080	C-61	0.186	2.580	31.818	0.013	0.089
C-38	0.172	4.348	31.722	0.010	0.061	C-62	0.192	0.861	32.537	0.023	0.049
C-39	0.172	4.376	32.056	0.024	0.042	C-63	0.128	0.740	32.585	0.010	0.054
C-40	0.219	4.345	33.543	0.008	0.076	C-64	0.157	1.112	30.236	0.013	0.073
C-41	0.194	4.392	33.495	0.009	0.035	C-65	0.140	0.935	31.146	0.011	0.049
C-42	0.166	4.680	32.104	0.011	0.032	C-66	0.184	0.483	33.254	0.019	0.030
C-43	0.161	4.751	33.734	0.009	0.116	C-67	0.096	0.375	34.501	0.008	0.029
C-44	0.121	5.590	41.209	0.011	0.040	C-68	0.122	0.338	33.734	0.015	0.044
C-45	0.228	5.643	41.928	0.010	0.173	C-69	0.108	0.334	34.021	0.009	0.031
C-46	0.251	4.875	38.047	0.014	0.039	C-70	0.140	0.235	34.310	0.027	0.046
C-47	0.394	58.874	26.212	0.010	0.102	C-71	0.078	0.195	34.116	0.013	0.022
C-48	0.179	9.570	40.970	0.013	0.094	C-72	0.120	0.390	35.985	0.027	0.021
C-49	0.126	4.819	32.343	0.012	0.054	C-73	0.302	0.254	33.254	0.021	0.487
C-50	0.236	4.735	33.110	0.030	0.044	C-74	0.126	0.204	33.400	0.013	0.038
C-51	0.169	4.875	33.925	0.010	0.053	C-75	0.190	0.304	34.501	0.031	0.029
C-52	0.136	5.057	34.692	0.013	0.031	C-76	0.083	0.545	33.110	0.009	0.025
C-53	0.137	5.695	42.310	0.015	0.058	C-77	0.221	0.561	30.045	0.014	0.039
C-54	0.243	4.816	36.465	0.010	0.027	C-78	0.247	0.836	26.355	0.013	0.042
C-55	0.263	3.298	31.289	0.013	0.023						

Anexo XIV. Nutrientes en manantiales de la Cuenca de Cuitzeo.

Muestra	P-PO <sub>4</sub> (mg/l)	Muestra	Si-SiO <sub>2</sub> (mg/l)	Muestra	N Total (mg/l)	Temperatura °C	pH	Conductividad (mS)
CM-1	0.54	CM-1	63.24	CM-1	2.08	20.00	7.80	0.14
CM-2	0.24	CM-2	63.10	CM-2	0.33	36.50	8.12	0.47
CM-3	0.21	CM-3	68.61	CM-3	0.10	39.80	8.13	1.00
CM-4	0.22	CM-4	70.67	CM-4	0.32	33.50	8.50	0.25
CM-6	0.21	CM-6	69.60	CM-6	0.60	36.00	8.20	0.30
CM-7	0.29	CM-7	70.64	CM-7	0.21	87.00	8.70	0.50

Anexo XV. Índice de alteración química en el Vaso Poniente del Lago de Cuitzeo

Muestra	*IAQ	CUARZO %	Feldespatos %	Fragmentos de roca %	Minerales pesados%	Biógenos %	Arenas de lodos %
C-1	46.55	12.18	27.56	6.09	6.73	32.05	15.38
C-4	58.54	15.06	46.99	13.86	8.13	9.04	6.93
C-6	56.13	18.45	49.13	14.21	5.49	0.50	12.22
C-10	62.24	20.60	38.21	26.58	5.98		8.64
C17	80.20	17.51	23.74	14.84	6.82	10.09	27.00
C-23	47.74	7.62	14.08	26.39	2.64	12.61	36.66
C-24	57.25	13.23	32.28	25.13	15.87	8.20	5.29
C-27	51.72	6.25	6.79	5.16	0.00	36.41	45.38
C-29	58.47	12.02	28.74	6.45	6.45	8.21	38.12
C-31	57.28	18.40	33.83	21.07	5.93	8.01	12.76
C-33	65.06	6.94	18.95	4.32	1.88	29.64	38.27
C-34	49.67	2.46	6.83	4.37	1.37	39.34	45.63
C-36	61.94	2.90	6.76	2.17	1.45	22.95	63.77
C-41	63.36	2.93	4.39	0.42	0.42	0.42	91.42
C-42	64.24	2.32	7.72	2.32		11.97	75.68
C-48	67.31	0.46	5.24	4.78	0.23	11.39	77.90
C-49	65.73	3.35	6.94	6.22		6.22	77.27
C-55	65.26	1.00	1.50			13.72	83.79
C-63	67.37	0.47	0.94	5.90		4.01	88.68
C-71	57.41	1.70	7.67	1.70	0.85	21.02	67.05
C-73	60.22	6.19	10.05	6.19	3.87	63.66	10.05
C-77	57.56	1.47	4.11	5.87	1.47	30.21	56.89

\*Índice de Alteración Química

ANEXO XVI. Concentración y abundancia de elementos en riolitas y basaltos (Libes, 1992)

Elemento	Basaltos	Riolitas	Promedio de rocas ígneas
Na	26,000	18,000	22,000
K	8,000	42,000	25,000
Rb	30	170	100
Cs	1	4	3
Mg	46,000	1,600	24,000
Ca	76,000	5,000	40,000
Sr	470	100	290
Ba	330	840	590
Fe	86,000	14,000	50,000
Mn	1,500	400	950
Ni	130	5	70
Co	50	1	25
Cu	90	10	100
Cr	170	4	87
Th	4	18	11

Anexo XVII. Límites de detección de contaminación en agua y sedimentos (Normativa Holandesa de suelos contaminados)

Elemento	Contenido en suelo mg/Kg en material seco			Contenido en agua subterránea mg/l		
	A	B	C	A	B	C
Bario	200	400	2000	50	100	500
Cinc	0.5	500	3000		200	800
Cobalto	20	50	300	20	50	200
Cobre	0.1	100	500		50	200
Cromo	0.1	250	800		50	200
Níquel	0.1	100	500		50	200
Plomo	0.1	150	600		50	200

A = Límite de detección; B = valores que indican suelos o aguas ligeramente contaminadas; C = Contaminado.

ANEXO XVIII. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales (Gobierno del Estado de México, 1997).

mg/l	Ríos						Embalses naturales y artificiales				suelos			
	Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Protección de vida acuática		Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Uso en riego agrícola		Humedales naturales	
	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD	PM	PD
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.2
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

PM = Promedio mensual, PD = Promedio diario