



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

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

**“Propuesta de valoración de la calidad del agua en los
sistemas lénticos en el Estado de Michoacán”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta la

I.Q. María Eugenia Vega Farfán

Director de Tesis:

Doctor en Ciencias en Recursos Bióticos. Ricardo Miguel Pérez Munguia

Co-Directora de Tesis:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Química Anabel Cruz Flores

Morelia, Michoacán, febrero del 2014

Dedicatoria

Ofrezco este logro fruto de mi esfuerzo e imposible de realizar sin su colaboración:

Principalmente a mis padres que son mi mejor ejemplo de tenacidad, amor, lucha y perseverancia, porque me han enseñado que en la vida hay situaciones difíciles, pero jamás imposibles de superar.

A mi hermano por ser como un padre y siempre un guardián en mi vida; y que junto con Gaby me han dado los tres más hermosos tesoros que día con día avivan mi corazón.

A mis abuelos que con sus cuidados definieron parte importante de la mujer que orgullosamente hoy soy.

A mi familia y amigos por celebrar mis aciertos y darme la mano en los tropiezos, por ser incondicionales en los momentos difíciles cuando el camino fue complicado.

A todas y cada una de las personas que formaron parte importante de esta etapa en mi vida tanto personal como profesional.

Para ustedes con todo mi cariño, pasión y entrega.

RESUMEN

PROPUESTA DE VALORACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS SISTEMAS LÉNTICOS EN EL ESTADO DE MICHOACÁN

Por

MARÍA EUGENIA VEGA FARFÁN

Febrero 2014

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Dirigida por: Dr. Ricardo Miguel Pérez Munguía

Se presenta la metodología para la elaboración del Índice de valoración fisicoquímica de la calidad del agua en los sistemas lénticos en el Estado de Michoacán, llevado a cabo a partir de la información fisicoquímica que la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua, ha medido en los últimos seis a 10 años en los lagos Michoacanos. Siendo el objetivo general del presente, desarrollar un modelo regional de valoración de la calidad del agua mediante un análisis histórico en sistemas lénticos en el estado de Michoacán. Se presentan seis etapas para su obtención: 1. Análisis descriptivo de los datos; 2. Imputación de datos, para generar una matriz consistente; 3. Selección preliminar de las variables, para eliminar redundancia; 4. Normalización de las variables por definición de escalas, eliminando unidades en los parámetros; 5. Ponderación y agregación de los sub-índices, que permitan resumir la información generada en una simple ecuación matemática; y 6. Finalmente la validación del índice, la cual muestra si en efecto el índice permite clasificar a los sitios de acuerdo a las condiciones en las concentraciones determinadas para los sitios de referencia. Como resultado se obtuvo un índice que consiste en una sumatoria ponderada de los valores de un pequeño grupo de variables, estas son

Sulfatos, Sólidos Disueltos Totales, Cloruros, Demanda Química de Oxígeno, Alcalinidad, Dureza de Magnesio, Coliformes Fecales Nitratos y Nitritos; las cuales representan la mayor variación del modelo que considera las condiciones geológicas y contaminación orgánica antropogénica.

Palabras clave: índice, valoración fisicoquímica, modelo regional, sistemas lenticos, calidad del agua, condiciones de concentración.

ABSTRACT

PROPOSED EVALUATION OF WATER QUALITY IN LENTIC SYSTEMS STATE MICHOACÁN

By

MARÍA EUGENIA VEGA FARFÁN

February 2014

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Leaded by: Dr. Ricardo Miguel Pérez Munguia

It presents the methodology to develop the physicochemical assessment rate of the water quality in the lentic systems of Michoacan, which was made from the physicochemical data measured in the past six to ten years in the lakes of Michoacan by the CNA's Water Quality Measurement National Net.

The main goal of the work reported in this study is to develop a regional model of water quality assessment by making a historical analysis in lentic systems in Michoacan. The model has been constructed in a series of steps; the first is the data descriptive analysis; the second step is the data imputation to generate a consistent matrix; the third is a preliminary selection of the variables, to minimize redundancy. The fourth step is database normalization by scale definition, to eliminate units in the parameters. The fifth step is weighing and aggregation of the subscripts, to allow the summary of the generated data into a simple mathematical equation. Finally, the sixth step is the rate validation, which shows if the rate allows classifying the locations according to the determined conditions for the reference locations.

The result was a rate consisting of a weighted sum of the values from a little group of variables, such as: Sulfates, Total Dissolved Solids, Chlorides, Chemical Oxygen Demand, Alkalinity, Magnesium Hardness, Total Coliform, Nitrates and Nitrites. They represent most of the model variation that considers the geological conditions and the anthropogenic impact on the environment.

Key Words: rate, physicochemical assessment, regional model, lentic systems, water quality, concentration conditions.

AGRADECIMIENTOS

Quiero disponer de estas líneas primeramente para expresar mi más sincero agradecimiento a Dios y a la vida, por darme como padres a dos personas extraordinarias, que son mi motor personal, al igual que lo es mi hermano.

Merece un especial reconocimiento La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo “Cuna de Héroes, Crisol de Pensadores”, por la formación profesional y personal que me ha dado a lo largo de los últimos once años de mi vida.

Al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por alimentar mi formación. Así mismo a quienes asesoraron atinadamente mi investigación: el Dr. Ricardo Miguel Pérez Munguía y la Maestra Anabel Cruz Flores, por su apoyo y colaboración.

A la Maestra Reyna y el Dr. Medardo por apoyarme en la dirección y orientación de la investigación participando como sinodales.

A la Comisión Nacional del Agua por proporcionar los datos de la Red Nacional de Monitoreo y a todo el personal que colaboro con la generación de ellos ya que son el esqueleto de este estudio.

De forma muy particular quiero reconocer al Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, por el apoyo que se me brindó, en especial a la Dra. Gloria Lariza Ayala Ramírez y la Maestra Martha Beatriz Rendón López por el interés mostrado en mi trabajo y las aportaciones recibidas.

Con una mención muy especial para el Dr. José Apolinar Cortés, a quien aprecio y admiro profundamente, quiero agradecer la confianza depositada en mí, su orientación, consejos y apoyo en todo momento.

Finalmente le agradezco al cielo por dejar llegar las morusitas que se le caen a Dios en uno que otro descuido. Gracias a mi estrella, pedazo de cielo, luz que llevo dentro, gracias por estar siempre conmigo.

MAESTRÍA EN CIENCIAS INGENIERÍA AMBIENTAL

CONTENIDO

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
CONTENIDO DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Justificación	8
1.4 Hipótesis	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 El agua: importancia y distribución en el planeta	10
2.2 Los lagos: estructura y clasificación	14
2.3 Situación del estado de Michoacán en materia de Lagos	20
2.4 Gestión de los recursos hídricos.....	21
2.5 Índices de calidad del agua.....	22
2.6 Parámetros característicos en los sistemas lénticos	34
CAPITULO 3. ANTECEDENTES	48
CAPITULO 4. AREA DE ESTUDIO.....	59

4.1 Cuitzeo	60
4.2 Lago de Pátzcuaro	61
4.3 Lago de Zirahuén	62
CAPITULO 5. METODOLOGÍA.....	66
5.1 Análisis descriptivo	66
5.2 Imputación de Datos Perdidos	69
5.3 Selección preliminar de las Variables	71
5.4 Normalización de las Variables.....	72
5.5 Ponderación y Agregación de los Sub-Índices.....	74
5.6 Validación del Índice de Calidad del Agua.....	76
CAPITULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	77
6.1 Análisis descriptivo de los datos.....	77
6.2 Imputación de Datos	85
6.3 Selección preliminar de las variables	88
6.4 Normalización de las Variables.....	100
6.5 Ponderación y Agregación de los Sub-Índices.....	122
6.6 Validación del Índice de Calidad del Agua.....	129
CONCLUSIONES.....	143

BIBLIOGRAFÍA	147
--------------------	-----

CONTENIDO DE CUADROS

Cuadro 2. 1 Estimación del volumen total del agua en la Tierra (Marsyli 2003).....	13
Cuadro 4. 1 Locañlización de los Sitios con contenido de información fisicoquímica.....	65
Cuadro 5. 1 Normas Mexicanas para la toma, preservación y análisis de muestras de agua.....	66
Cuadro 5. 2 Fórmulas de agregación	75
Cuadro 6. 1 Cuantificación de datos perdidos para valoración de métodos de análisis de datos perdidos	77
Cuadro 6. 2 Patrón de Omisión de Datos Univariado Para el caso del Lago de Zirahuén	78
Cuadro 6. 3 Agrupación de variables por clases porcentuales de datos para Matriz General, y por cada Lago.	80
Cuadro 6. 4 Estadística Básica comparativa para cada variable	82
Cuadro 6. 5 Resultados de Análisis de Diferencias de Medias.....	84
Cuadro 6. 6 Imputación con Medias no Condicionas.....	86
Cuadro 6. 7 Imputación con Medias Condicionas.....	87
Cuadro 6. 8 Imputación con Medias Condicionas y Distribución no Condicionada.	87
Cuadro 6. 9 Correlaciones Alcalinidad.....	89

Cuadro 6. 10 Correlaciones Sólidos	91
Cuadro 6. 11 Correlaciones Conductividad	92
Cuadro 6. 12 Correlaciones Ion Sodio	93
Cuadro 6. 13 Correlaciones Dureza	94
Cuadro 6. 14 Correlaciones Demanda de Oxígeno	94
Cuadro 6. 15 Variables posibles a omitir en primera selección	95
Cuadro 6. 16 ACP primer análisis.....	96
Cuadro 6. 17 Unidades de las Variables.....	101
Cuadro 6. 18 Variaciones en la distribución de los datos conforme a su reducción, basada en el análisis de datos aberrantes.....	102
Cuadro 6. 19 Análisis de Componentes Principales con Conductividad Eléctrica y sin ella.....	104
Cuadro 6. 20 Estadística Básica de las Variables consideradas.	106
Cuadro 6. 21 Análisis de comparación de medias, con base en las pruebas de hipótesis de varianza de una sola vía (ANOVA), comparación de todos los pares de Tukey-Kramer y análisis de varianza no paramétrica de Wilcoxon/Kruskal Wallis.....	108
Cuadro 6. 22 Intervalos de variación para cada categoría de las variables candidatas para generar el índice.	114
Cuadro 6. 23 Ecuaciones de Calidad para cada Sub Índice.....	121

Cuadro 6. 24 Análisis de Componentes Principales.	124
Cuadro 6. 25 Análisis de Correlaciones.	125
Cuadro 6. 26 ACP para ponderación.	126
Cuadro 6. 27 Ponderación de las variables.	127
Cuadro 6. 28 Clasificación a priori de los sitios.	129
Cuadro 6. 29 Análisis de discriminantes para clasificación a priori.	130
Cuadro 6. 30 Intervalos de Clasificación para el IFCA	136
Cuadro 6. 31 Clasificación de los sitios de acuerdo a las categorías establecidas.	137
Cuadro 6. 32 Análisis de discriminantes para clasificación IFCA	139
Cuadro 6. 33 Comportamiento de datos mal clasificados.	140
Cuadro 6. 34 Clasificación global de los Sitios	142

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 2. 1 Efectos de la media en la imputación de datos (Medina y Galván 2007)	27
Figura 4. 1 Provincias Fisiográficas del Estado de Michoacán (CONABIO, 2005)	59
Figura 4. 2 Descripción Visual de los Sitios con contenido de información fisicoquímica.....	64
Figura 5. 1 Función de distribución de la variable.....	70
Figura 6. 1 Comportamiento de Solidos Sedimentables en función del tiempo: a) con outlier; b) sin outlier.	98
Figura 6. 2 Comportamiento de Solidos Sedimentables respecto a los sitios: a) con outlier; b) sin outlier.	99
Figura 6. 3 Gráfico de salida del análisis de Correlación paramétrica, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson Prob >F 0.05.....	103
Figura 6. 4 Gráfico de salida de las pruebas de ANOVA y Tukey Kramer.....	109
Figura 6. 5 Gráfico de salida del Análisis de ANOVA y Tukey Kramer para Dureza de Ca y Mg y Sulfatos.....	110
Figura 6. 6 Gráfico de salida del Análisis de ANOVA y Tukey Kramer para Nitratos y Nitrógeno Amoniacal.	111
Figura 6. 7 Gráfico de Comparación de Intervalos entre lagos para cada Variables	112

Figura 6. 8 Gráfico de salida de la Regresión Lineal entre SDT y Cloruros.	113
Figura 6. 9 Gráfico de Calidad para Sólidos Disueltos Totales.....	115
Figura 6. 10 Gráfico de Calidad para Demanda Bioquímica de Oxígeno .	116
Figura 6. 11 Gráfico de Calidad para Demanda Química de Oxígeno.....	116
Figura 6. 12 Gráfico de Calidad para Alcalinidad Total.....	117
Figura 6. 13 Gráfico de Calidad para Dureza de Ca.....	117
Figura 6. 14 Gráfico de Calidad para Dureza de Mg	118
Figura 6. 15 Gráfico de Calidad para Nitratos.....	118
Figura 6. 16 Gráfico de Calidad para Nitrógeno Amoniacal.....	119
Figura 6. 17 Gráfico de Calidad para Sulfatos	119
Figura 6. 18 Gráfico de Calidad para Cloruros	120
Figura 6. 19 Gráfico de Calidad para Coliformes Fecales	120
Figura 6. 20 Comparación de medias Clasificación vs I.DOQ, I. Dza Mg, I. N_NO3	131
Figura 6. 21 Análisis de varianza por tipo de lago para parámetros integrantes del modelo final (panorama general).	132
Figura 6. 22 Análisis de varianza para variables de: a) primer componente; b) segundo componente; c) tercer componente	134

Figura 6. 23 Análisis de varianza por sitio para parámetros integrantes del modelo final (panorama individual): Índices fisicoquímicos de calidad del agua: a) sin ponderar; b) ponderado	135
Figura 6. 24 Análisis de discriminantes para la clasificación IFCA.	138
Figura 6. 25 Análisis de discriminantes para la clasificación IFCA.	141

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El agua es el compuesto químico más abundante de la biósfera e imprescindible para nuestro planeta, debido a su abundancia y a las propiedades que presenta, favorece el desarrollo de una gran variedad de procesos químicos y biológicos en la naturaleza. En el planeta, se encuentra contenida en la forma siguiente: 97.39% en océanos, 2.0% es agua sólida (cubiertas continuas y glaciares), 0.58% se encuentra circulando en la corteza (acuíferos-suelo), en la atmósfera se encuentra solo el 0.0008%; las aguas epicontinentales como lagos de agua dulce, lagos de agua salada y ríos, únicamente contienen el 0.0167% (Margalef, 1983). La disponibilidad de éste líquido está determinada por la distribución de los ríos y cuencas, así como por la acumulación en los lagos, presas y acuíferos naturales.

La estructura y polaridad de la molécula de este líquido, le proporcionan un elevado valor para su constante dieléctrica, lo que le da una alta capacidad como disolvente, principalmente para compuestos iónicos; razón por la cual se encuentra una gran variedad de soluciones y compuestos inmersos en agua, dándole diversos grados de complejidad en los sistemas acuíferos (Ramos *et al.* 2002). Las propiedades químicas y fisicoquímicas del agua son una función directa de los componentes contenidos en ella y se ve reflejado en su caracterización. En los ríos y lagos se encuentran disueltos diversos minerales, gases atmosféricos y gran variedad de químicos liberados por el hombre, algunos de estos compuestos son necesarios para las plantas y los animales acuáticos, pero cuando estos interfieren, para el uso de este líquido, alterando o modificando su composición natural y degradando su calidad, fácilmente se transforma en un contaminante (Domenech 2006).

De tal forma que en los sistemas, cuando hay alteración del equilibrio, se transforma en un problema de desorden que puede modificar un sistema limpio a contaminado. En el caso de los sistemas acuáticos es importante acotar que todos tienen capacidad de autodepuración; sin embargo, cuando las cantidades de sustancias químicas presentes en solución sean lo suficientemente altas para romper el equilibrio estos cuerpos de agua se contaminan y degradan la calidad de las columnas del recurso hídrico. Este fenómeno es redundante y por lo mismo la falta de percepción temprana o de interés son causa del notable incremento de cuerpos de agua contaminados y de la consecuente reducción de espacios disponibles para soportar la diversidad biológica, especialmente la nativa, además de la cada vez mayor escasez de recursos hídricos. Existen diversos índices numéricos para evaluar la condición de las columnas de agua o de los ecosistemas acuáticos, que frecuentemente se hacen a partir de las ponderaciones de parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y de calidad ambiental seleccionados de acuerdo al uso que se le da al agua. El diagnóstico a través de monitoreos de la calidad del agua, conlleva al cumplimiento de los requerimientos de la normatividad ambiental sobre calidad de vertimientos de aguas a fuentes naturales (OSACPyT, 2005 en Molina, 2011).

En nuestro país, la única forma normalizada para evaluar la calidad del agua, es mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual también puede ser utilizado para expresar el grado de contaminación de las columnas de agua en un ecosistema acuático. Este índice es una valoración directa de la cantidad de agua pura contenida en la columna estudiada en un momento determinado y está orientado hacia los usos que puede darle el ser humano, los cuales se clasifican conforme a las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-ECOL/SEMARNAT 96 y CE-CCA-01/86 en: apta para todos los usos, uso agrícola, para consumo humano, para sostenimiento de la vida acuática, recreación con contacto primario, pecuario, refrigeración y no apta para ningún uso (DOF,1989).

El ICA se basa en la estimación de tres tipos de variables: organolépticas, como el color, turbiedad y olor; fisicoquímicas, que consta de 18 variables, entre las que destacan el pH, temperatura, oxígeno disuelto, demanda biológica y química de oxígeno, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, cloruros, sulfatos; así como biológicas, basadas en la cantidad de bacterias coliformes totales y fecales. Este tipo de valoraciones, se hacen respecto a una serie de normas oficiales que regulan los procedimientos desde la toma y preservación de la muestra hasta la forma como se obtienen e interpretan los resultados.

Sin embargo, este índice aunque es muy preciso presenta limitaciones como el proporcionar información incompleta sobre la calidad del agua, mediante un porcentaje; además, se basa en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal, valora la condición de la columna de agua, particularmente por degradación de origen antrópico en términos casi exclusivamente de contaminación orgánica y no es informativo sobre impactos que afecten físicamente a los ecosistemas acuáticos. Por otro lado, no es costo eficiente, puesto que demanda procedimientos certificados que incrementan el costo de la obtención de dicho índice.

Debido a la inequitativa distribución del recurso acuático y la poca disponibilidad que de este se tiene, es urgente la necesidad de desarrollar metodologías que permitan valorar con claros límites de certidumbre las condiciones de las columnas de agua en sistemas lénticos, ya que estos son fuentes de agua superficial para el consumo humano y además de usos no consuntivos que tienen que ver con servicios ambientales tales como el alto valor escénico que estos ecosistemas tienen. Por otro lado, la enorme variación que existe en el país en cuanto al origen y condiciones geológicas y edáficas que rodean a estos cuerpos de agua hace indispensable que estas metodologías sean locales, puesto que no es posible valorar de igual modo a ecosistemas con cargas iónicas muy elevadas, como es el caso del sistema de Charco Azul, S.L.P., en

donde la dureza total puede tener valores mayores a 1000 mg/L (Pérez-Munguía 2004), con lagos como Zirahuén en Michoacán de aguas blandas con menos de 80 mg/L (Alvarado 2003) de este mismo parámetro, o al menos estos métodos de valoración deben estar asociados a regiones fisiográficas, las que tienen un mismo origen geológico, posibilitándose la comparación entre diversos ecosistemas lénticos.

El agua es el factor que en todos los ecosistemas regula la productividad, estabilidad y salud de los organismos que lo habitan (Badii, *et al*, 2008). De esta forma por sus propiedades y variación, el agua superficial toma importancia en el nivel ecosistémico tales como lagos y otros cuerpos epicontinentales de características lenticas, que se reconocen en la categoría de aguas quietas, y por lo regular son cuerpos de agua dulce. En estos la erosión y acumulación de sedimentos, que pueden ser de origen autóctono o bien, de origen alóctono, son causa de su tendencia a desaparecer, debido a que al disminuir la profundidad y aumentar el espejo de agua, se favorece la superficie de evaporación.

La estructura de estos sistemas lacustres consta de tres zonas, litoral, lentic y profunda (Roldán-Perez y Ramírez-Retrepo, 2008). La morfología, la composición química, la posición geográfica, la profundidad, el clima, pero principalmente el sistema térmico, clasifican a los lagos en: *dimícticos* o *templados*, cuando presentan dos periodos de mezcla vertical; *monomícticos* o *subtropicales*, presenta un solo periodo de mezcla vertical durante la estación fría; *holomícticos*, estos se mezclan completamente una o dos veces por año; *meromícticos*, llegan a mezclarse una vez cada cuatro años, el límite inferior de la mezcla con las demás capas; *polimícticos*, son sistemas que presentan un régimen irregular, estos se presentan comúnmente en lagos de montaña; y *amícticos* se encuentran cubiertos permanentemente por hielo, presentando baja turbidez y poca intensidad de luz (Margalef 1983). También es importante clasificarlos de acuerdo a su productividad trófica, esta dependerá

fundamentalmente de las aportaciones de nutrimentos al sistema y de la renovación de las capas reproductoras del lago, clasificándose en:

Oligotróficos. Cuando la carga de nutrimentos es baja, lo que hace que las aguas sean poco productivas y transparentes. En general son lagos profundos.

Mesotróficos. Con cargas intermedias de nutrimentos, las aguas son productivas y ligeramente turbias. Con profundidades medias.

Eutrófico. Con altas cargas de nutrimento, son sistemas muy productivos y sus aguas son turbias y se trata de lagos someros.

Hipereutrófico. Estos sistemas han rebasado su capacidad de carga de nutrimentos y se trata de sistemas geológicamente viejos. Esta condición puede ser alcanzada en corto tiempo, apenas unos dos o tres años, si los lagos son convertidos en reservorios de aguas orgánicamente contaminadas. En los que frecuentemente se abate el oxígeno disuelto por el incremento de la DBO₅, este fenómeno es redundante y cada vez más intenso puesto que los periodos de anoxia conducen a la muerte de los habitantes del ecosistema incrementando notablemente el contenido de materia orgánica.

En el caso de Michoacán, existen tres lagos totalmente contenidos dentro del territorio estatal: Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén; así como una porción del lago de Chapala; además de varios lagos cratéricos, manantiales de tipo limnocrenos, pozas y charcas permanentes que pueden ser considerados como sistemas lénticos. En el presente estudio, se han considerado únicamente las columnas de agua de los tres lagos Michoacanos mayores, debido a que en estos se encuentran los sitios de referencia de la RENAMECA. El lago de Pátzcuaro se encuentra clasificado como polimíctico cálido continuo y mesotrófico; el lago de Zirahuén es monomíctico con un solo periodo de mezcla suscitado entre los meses de menor temperatura (Diciembre-Marzo), está catalogado como oligo-

mesotrófico; y el lago de Cuitzeo es de tipo polimíctico y eutrófico (Orbe y Acevedo, 2002), que ha pasado por periodos recientes de hipereutrofía y de desecación total en el vaso oeste.

Estos lagos forman parte de la Red Nacional de Medición de la Calidad del agua (RENAMECA), que concentran 16 puntos de monitoreo, además estos ecosistemas se encuentran vinculados a la historia y cultura de los pueblos Purépechas, al tiempo que representan escenarios de importantes ingresos para el sostenimiento de más de 4000 familias de pescadores y artesanos. Sin embargo la degradación y presión ambiental al que han sido sometidos, han provocado notables disminuciones en las pesquerías y extracción de los recursos de estos ecosistemas.

Por lo anterior en el presente estudio, se utilizarán los datos de calidad del agua y biológicos, extraídos de estos cuerpos de agua durante la última década, con la finalidad de plantear procesos y estrategias costo eficiente de valoración de la calidad del agua.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo regional de valoración de la calidad del agua mediante un análisis histórico en sistemas lénticos en el estado de Michoacán.

Objetivos Particulares

1. Identificar y detallar las variables fisicoquímicas que aporten información para evaluar la calidad del agua.
2. Obtener una matriz de datos completa y consistente para poder ser analizada mediante técnicas estadísticas tradicionales.
3. Determinar los parámetros que mejor definan las características fisicoquímicas generales de la región.
4. Generar las funciones de calidad de cada parámetro.
5. Determinar el modelo de calidad fisicoquímica del agua regional, integrando de forma ponderada las ecuaciones de calidad de cada variable.
6. Clasificar a los sitios de la RENAMECA (Red Nacional de Medición de Calidad del Agua), con base en las variables propuestas y validar del Modelo Propuesto.

1.3 Justificación

Las valoraciones hechas con el ICA, están principalmente orientadas hacia los usos del agua; sin embargo, en el caso de los lagos, existen modelos de valoración de la calidad o del estado de conservación con base en el contenido de materia orgánica en las columnas de agua, estas valoraciones no solo han sido hechas desde la perspectiva fisicoquímica, sino que se han empleado a los seres vivos, principalmente a los componentes del fitoplancton para su diseño. Sin embargo, se tiene poco conocimiento sobre las relaciones entre los índices biológicos y el ICA en los lagos de Michoacán. Además, por su naturaleza el ICA es poco informativo del estado trófico de estos cuerpos de agua, puesto que expresa primordialmente los efectos de la contaminación orgánica en las columnas de agua omitiendo la importancia de los nutrimentos y sus efectos de acumulación, de esta forma aprovechando el potencial que tienen los análisis realizados por la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA), el presente estudio se orienta al análisis de los datos históricos de las valoraciones fisicoquímicas y bacteriológicas reportados por la RENAMECA para los tres lagos Michoacanos, para reconocer relaciones entre las variables fisicoquímicas y sus ponderaciones con las condiciones fisicoquímicas de la región, a fin de proponer alternativas de valoración ambiental y del estado trófico de estos ecosistemas acuáticos, bajo una perspectiva primordialmente fisicoquímica.

1.4 Hipótesis

Es posible que la información contenida en el ICA, sea redundante y poco explicativa de la condición natural de los lagos michoacanos, y tomando en cuenta que la determinación de las condiciones de los ecosistemas, pueden explicarse a partir de la variación de un pequeño grupo de variables; entonces la determinación de un Índice de Calidad del Agua, para valorar la condición ambiental general podrá lograrse a partir de las variables que de manera múltiple expliquen variaciones en las columnas de agua.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 El agua: importancia y distribución en el planeta

El agua cubre el 7% de la superficie terrestre y es considerada primordial para los procesos metabólicos; ya que interviene directa e indirectamente en ellos, debido a las propiedades fisicoquímicas que presenta.

El agua es conocida como el solvente universal, dicho reconocimiento tiene sus orígenes en la estructura química del vital líquido, la cual está dada por un átomo de Oxígeno y dos átomos de Hidrogeno adheridos por enlaces covalentes (H-O-H) formando un ángulo de 104.5° , los átomos se encuentran dispuestos en forma triangular, lo cual le permite crear una nube de electrones alrededor de los tres átomos, ocasionándole una carga parcialmente positiva hacia los Hidrógenos y negativa al Oxígeno, concibiéndola una molécula bipolar, lo que le permite hacer solubles en ella gran cantidad de compuestos de forma total o parcial. Esta propiedad permite llevar a cabo importantes procesos como el transporte de minerales en la superficie terrestre; la difusión de Oxígeno y Nutrimientos en los ecosistemas acuáticos que permiten la vida acuática; y la vida como tal, ya que es el medio de transporte de nutrimentos y sustancias de desecho en las células (Gavidia y Rueda, 2004).

Las moléculas de agua se encuentran adheridas entre sí por acción de las cargas contrarias de una molécula y otra, mediante enlaces denominados “Puente de Hidrógeno”, en el agua los puentes de Hidrógeno son más estables ya que los electrones que intervienen en sus enlaces están más cerca del Oxígeno que de los Hidrógenos, por lo que se genera doble carga parcial al lado del Oxígeno y doble carga parcial positiva hacia los Hidrógenos, esto hace que las moléculas de agua se comporten como imanes de cargas contrarias, una molécula de agua puede estar unida a cuatro moléculas más por medio de puentes de Hidrógeno, esta peculiaridad estructural le concede diversas propiedades que la colocan

como un compuesto esencial para la vida, los fenómenos naturales y el desarrollo de las sociedades.

El agua puede encontrarse en forma líquida, sólida o gaseosa; tiene alta capacidad calorífica en comparación con otras sustancias, el coeficiente de calor específico de agua pura es 1.0, cuando para el agua de mar es de 0.93, 0.66 para el lodo, 0.20 para roca sólida y para el cobre de 0.09 (Roldán-Perez y Ramirez-Retrepo, 2008), por esto, puede mantener el calor absorbido por períodos de tiempo considerables lo que le permite influir en diversos fenómenos climáticos, (Marsily, 2003) como la regulación térmica del planeta; la densidad es también una característica física del agua que le confiere ciertas particularidades, la relación entre la densidad y la temperatura es inversa si la temperatura disminuye la densidad aumenta, pero a los 3.94°C el agua toma su máximo valor de densidad, al seguir disminuyendo la temperatura y llegar al punto de congelación (0°C) las moléculas de agua se expanden, haciéndose menos densa en forma de hielo permitiéndole flotar -la diferencia de densidad debida a la temperatura genera la llamada estratificación química en el agua-; al igual que la densidad la viscosidad es una propiedad del agua que se ve influenciada por la temperatura, cuando esta incrementa disminuye la viscosidad, la cual al mismo tiempo y en menor grado depende de la concentración de sales disueltas en el agua; la tensión superficial es otra propiedad presente en el agua, que así como la densidad y la viscosidad se ve influenciada inversamente por la temperatura, es decir al incrementar la temperatura la tensión superficial disminuye, colaborando con ciertos procesos naturales como la extracción de agua por las raíces de las plantas subiendo por el xilema, el cual transporta el agua desde la raíz hasta las hojas, en este fenómeno influyen las fuerzas de adhesión al igual que la capilaridad (Monge-Nájera *et al.* 2002).

El balance del agua está en función de las estaciones del año, condiciones climáticas, localización y altura respecto al mar, así como del régimen del viento;

éste genera las condiciones ideales para el desarrollo de los ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos y se lleva a cabo mediante el ciclo hidrológico.

El ciclo del agua o ciclo hidrológico está integrado principalmente por los procesos de precipitación, evaporación y escorrentía: la precipitación es la caída del agua en estado líquido en forma de lluvia o en estado sólido en forma de granizo o nieve; la evaporación es el proceso físico por el cual el agua regresa como vapor a la atmósfera de manera lenta y gradual; al flujo de agua que circula por la corteza terrestre, el cual puede desembocar en los ríos o infiltrarse, se le conoce como escorrentía.

El ciclo hidrológico se conduce de manera distinta dependiendo si se lleva a cabo en zona terrestre o zona marítima, puesto que, en ésta última no hay procesos intermedios, motivo por el cual la nieve o granizo que precipitan en ella se evaporan con mayor facilidad.

El ciclo hidrológico en zona terrestre pasa por estados intermedios:

Animales (incluido el ser humano) regresan el agua adquirida mediante la transpiración, respiración y orina; el agua que es absorbida por las plantas, una vez asimilada por el metabolismo es regresada nuevamente a la atmósfera, este proceso se conoce con el nombre de evapotranspiración; los lagos retienen otra parte del agua de las precipitaciones retornándola de forma progresiva mediante la evaporación; la tierra está provista de partículas de agua que le proporcionan cierta humedad, que con el calor de las radiaciones es lentamente evaporada; el agua que por escorrentía llega a los ríos es evaporada en una parte en el trayecto y la otra desemboca en lagos o estanques, otra es infiltrada y la restante desemboca al mar; la que se infiltra en la tierra puede permanecer por tiempo variado dependiendo del grado de infiltración, si es superficial la mayor parte se evapora, pero, si la infiltración es alta, contribuye a los mantos acuíferos (Roldán-Perez y Ramírez-Retrepo, 2008).

El tiempo de residencia de cada partícula de agua varía dependiendo del sistema en el que se encuentra y sus múltiples variables como lo es el clima, formando un papel importante en el balance de agua.

De acuerdo con “*World Resources*”, 1990-1991 en Marsily 2003, se estima que el volumen de agua en la tierra se aproxima a los $1.386 \times 10^9 \text{ Km}^3$ de la cual el 97.4% se encuentra en los océanos como agua salada y la restante como agua dulce en aguas interiores y casquetes polares. Del agua dulce el 76.39% se encuentra en forma de glaciares, el 22.79% en aguas subterráneas, 0.574% se encuentra en agua superficial en forma de lagos y ríos; el 0.246% restante en humedad de los suelos, aire y seres vivos.

Cuadro 2. 1 Estimación del volumen total del agua en la Tierra (Marsyli 2003).

	Existencia (en km3)	% del total	Tiempo de residencia
Océanos	1 350 000 000	97.410	2 500 años
Glaciares	27 500 000	1.984	De 1 600 a 9 700 años
Aguas subterráneas	8 200 000	0.592	1 400 años
Mares interiores	105 000	0.00758	Se desconoce
Lagos de agua dulce	100 000	0.00722	17 años
Humedad de suelos	70 000	0.00505	1 año
Humedad del aire	13 000	0.00094	8 días
Ríos	1 700	0.00012	16 días
Agua de células vivas	1 100	0.00008	Algunas horas
Total	1 385 990 800	100	

De las aguas superficiales menos del 50% pertenece a lagos (Marsyli 2003).

2.2 Los lagos: estructura y clasificación

Los lagos se encuentran en la categoría de aguas quietas o sistemas lénticos; de acuerdo con Margalef, 1983, son “un prototipo de ecosistemas acuáticos epicontinentales que presuponen una extensión y una profundidad mínima”

Roldán-Pérez y Ramírez-Retrepo, (2008), mencionan que “los lagos se caracterizan por ser típicamente ecosistemas de agua dulce, los cuales presentan un vaso bien definido con zonas litoral y bental profunda perfectamente diferenciadas; sedimento propio poblado por especies características del medio; se encuentran divididos por gradientes verticales de luz, densidad, y temperatura sujetos a la variación estacional que repercute en procesos biológicos y calidad del agua”.

Interfase agua-aire: es la zona por la cual entran al sistema acuático los gases atmosféricos y la luz.

Región costera o riparia: en ésta se aporta la mayor parte de los elementos a la fase litoral.

Región litoral: contribuye la principal fuente de energía, se extiende desde la orilla hasta la profundidad donde se encuentran las plantas acuáticas con raíces. Presenta una alta colonización por microalgas, pteridófitos y microfitas acuáticas; el tamaño de esta zona es variable en cada lago dependiendo de la geomorfología de la cubeta y la tasa de sedimentación y acumulación, interviniendo el oleaje y el nivel del agua. Las características fisicoquímicas están dadas especialmente por la naturaleza del entorno, las precipitaciones atmosféricas, los vientos, el oleaje y la química del agua.

Región limnética o pelágica: en esta zona se encuentran el plancton y el necton y se divide a su vez en tres zonas; en la primer zona se da la producción

primaria, en ella penetra la luz solar y se denomina “zona fótica”, después de esta zona se da una etapa de transición o una especie de equilibrio en la cual la producción es igual al consumo y es conocida como “zona de compensación” y la última zona que compone la región denominada “zona trófica o afótica” se caracteriza por la ausencia de luz, por lo que le es imposible se presenten en ella el desarrollo de procesos fotosintéticos dándose principalmente el consumo y la mineralización de materia orgánica.

Región profunda o bental: está en función de las regiones anteriores en lo concerniente a producción primaria orgánica, carece de organismos fototróficos y se caracteriza por la presencia de organismos acuáticos de producción secundaria y terciaria (Roldán-Pérez y Ramírez-Retrepo, 2008).

Conforme a Margalef (1983), los lagos pueden ser clasificados de distintas formas, pero fundamentalmente se emplea el origen, el régimen térmico y el estado o nivel productivo.

2.2.1 Clasificación de Acuerdo al Origen de Formación

El origen de formación del cuerpo de agua le confiere características distintivas y propias que se deben a su origen, entre estas particularidades destacan la forma y dimensión de la cubeta, así como la calidad de sus aguas. En 1985 Hutchinson realizó un trabajo en el cual clasificó a los lagos según su origen y logró identificar 11 grupos con 76 tipos diferentes de formación (Roldán-Pérez y Ramírez-Retrepo, 2008), entre los cuales describe los siguientes:

Lagos de origen tectónico:

Son cuerpos de agua formados por fallas, hundimientos, desdoblamientos, fracturas o bien movimientos de la corteza terrestre, dentro de éstos se encuentran lagos de gran tamaño y profundidad como lo es el Lago Baikal en Rusia y el Tanganica en África Oriental. El fenómeno en el cual se da el

levantamiento de grandes masas de corteza terrestre se denomina epirogénesis, en cuyas cuencas o depresiones se da la formación de lagos.

Lagos de Origen Volcánico:

Estos cuerpos de agua pueden formarse por la acción de la lava producida por la actividad volcánica, la cual puede formar barreras en depresiones del terreno dando la formación del lago, regularmente con forma circular.

Lagos formados por deslizamiento del terreno:

Su origen radica en el represamiento de ríos, inundaciones de valles, desprendimiento de rocas o deslizamiento de terreno en partes altas de las montañas adyacentes. La erosión y construcción de vías influye en la formación de este tipo de lagos.

Lagos de Origen Glaciar:

Fueron formados en el período de deshielo, en el cual se presentaron altas precipitaciones, baja nubosidad y bajas temperaturas, provocando que las placas de hielo se deslizaran lentamente arrastrando consigo rocas y vegetación, formando depresiones que posteriormente se llenaron de agua. Estos cuerpos de agua se caracterizan por su gran tamaño, baja productividad, aguas ácidas, alta transparencia y comúnmente se encuentran entre los polimícticos fríos.

Lagos Formados por Disolución de Sustrato:

Se forman en terrenos de composición calcaría, de formas y tamaños diferentes, comúnmente en regiones de altas precipitaciones, debidas a las aguas cargadas de ácido carbónico (H_2CO_3) formado por la hidratación del dióxido de carbono (CO_2). En Yucatán, México se encuentran los Cenotes los cuales tienen éste origen.

Lagos Formados por Acumulación de Materia Orgánica:

Estos lagos se formaron principalmente por acumulación de organismos resistentes a la descomposición, los cuales formaron presas o diques. Se caracterizan por ser lagos de tamaños pequeños.

Lagos Formados por Actividad Animal:

Estos lagos se encuentran comúnmente en Canadá y al Norte de Estados Unidos, se forman principalmente por la actividad de castores que con ramas y troncos construyen diques.

Lagos Creados por el Hombre: Represas

Son lagos artificiales creados con fines diversos como: energéticos, consumo, control de inundaciones, recreativos, entre otros. Este tipo de cuerpos de agua modifican el paisaje natural, el régimen climático, la migración de los peces, afectando la biodiversidad y generando problemas sociales y económicos en algunas regiones.

Lagos de Origen Meteorítico:

Este tipo de Cuerpos de agua son de las formas menos comunes, son formados por el impacto del choque de un meteorito en la tierra, el cual provoca una onda de alto calor, evaporando el agua de las rocas expandiendo los demás gases presentes ocasionando una explosión incrementando el tamaño del cráter, conservando su forma circular.

Lagos Formados por Acción del Viento:

Debidos al movimiento de arena fina y arcilla realizados por el viento comúnmente en regiones áridas, generan la formación de cuencas bloqueando

corrientes dando lugar a lagos o lagunas, el viento puede acumular arena localmente, causar depresiones y formar cuerpos de agua de origen eólico.

Lagos Formados por Actividad en la Línea de la Costa:

En la formación de estos cuerpos de agua influyen: las ondas y olas, la resaca, las mareas alta y baja, las corrientes marinas, los levantamientos y hundimientos locales y regionales de la costa y la forma local de la costa.

Lagos Originados por Acción de Ríos:

Debido a la erosión y descomposición de sedimentos las corrientes de los ríos forman cuencas y algunas acciones de estas tienden a formar lagos o lagunas, como lo son las barreras originadas por sedimentos aportados por los ríos al desembocar al mar.

2.2.2 Clasificación de Acuerdo a su Condición Térmica

En cuanto a importancia biológica, otra forma destacada de clasificar a los cuerpos de agua pertenecientes a sistemas de características lenticas, es mediante el fenómeno de estratificación térmica. La diferencia de densidades en el agua ocasionada por el gradiente de temperatura, el cual se encuentra principalmente regido por el clima de la región e influye con el fenómeno de convección en la circulación de las masas de agua, siendo esta la forma mediante la cual se da el flujo de energía calorífica en un sistema acuático de carácter léntico, dándose con ella la mezcla de componentes fisicoquímicos del agua.

La temperatura del agua en los sistemas lénticos está dada principalmente por la radiación solar y en menor grado por acción del viento. Durante el verano y el otoño, en épocas de estiaje y fuerte irradiación solar, existe un marcado gradiente de temperatura con respecto a la profundidad del agua. Las aguas más profundas presentan una temperatura sensiblemente menor que las aguas

superficiales. La zona intermedia delimita casi perfectamente las dos zonas (superficial de aguas cálidas, y profunda de aguas frías), es considerada la zona de gradiente máximo y se denomina “termoclina”. A la llegada del invierno y la temporada de precipitación, entran al lago aguas superficiales de menor temperatura y mayor densidad, las cuales descienden al fondo del lago, propiciando la mezcla de las masas de agua denominada situación de mezcla térmica y fisicoquímica del lago. De acuerdo con esto y dependiendo de la dinámica en el comportamiento de la temperatura del agua en el lago a lo largo del año pueden clasificarse como:

Amícticos: comúnmente encontrados en latitudes polares, se caracterizan por la presencia de una capa permanente de hielo en la superficie, no presentan cambios apreciables entre el exterior y el cuerpo de agua.

Monomícticos Fríos: este tipo de lagos presentan temperaturas inferiores a los 4°C en la capa superficial, incluso en la estación cálida y en la estación fría se encuentran cubiertos por una capa de hielo.

Monomícticos Calientes: Presentan temperaturas superiores a los 4°C tanto en la superficie como en el fondo, el periodo de estratificación térmica se da en verano y durante la estación fría se da el periodo de circulación.

Dimícticos: En ellos se presentan dos periodos de estratificación térmica uno en verano y otro en invierno y entre cada uno de estos un periodo de circulación, uno en primavera y otro en otoño.

Oligomícticos: Son considerados aguas cálidas a cualquier profundidad, presentan periodos irregulares de circulación térmica y son comunes en regiones tropicales.

Polimícticos: Se encuentran en regiones intertropicales y presentan varios periodos de mezcla a lo largo del año.

2.2.3 Clasificación de Acuerdo al Estado Trófico

La productividad trófica depende de los aportes del exterior y de la tasa de renovación de las capas productoras del lago. El flujo del agua y su capacidad nutritiva provienen principalmente de la erosión y son dependientes de energía externa.

Margalef (1983), señala que la clasificación de acuerdo a la productividad trófica pasa a primeros lugares de interés para la biología y la producción, agrupándose principalmente en: Oligotróficos, Mesotróficos, Eutróficos y Distrófico. Los primeros son caracterizados por baja productividad primaria, alta transparencia y una limitada concentración de nutrimentos y sustancias húmicas; las aguas de los sistemas mesotróficos se caracterizan por presentar niveles medios de nutrimentos y producción primaria, comúnmente con aguas claras y lechos de plantas acuáticas sumergidas; los eutróficos presentan elevada biomasa algal, aguas turbias con altas concentraciones de nutrimentos y baja concentración de sustancias húmicas; y por último los distróficos se caracterizan por una baja biomasa algal y escasa disponibilidad de nutrimentos, pero con alto contenido de sustancias húmicas, con altos contenidos de materia orgánica en el fondo y condiciones ácidas.

La ordenación del eje Oligotrofia-Hipereutrofia refleja de modo creciente la influencia humana, cada lago o grupo de lagos tiene su propia individualidad, pero comúnmente los cambios asociados a la eutrofización ocurren de forma gradual y en función del gradiente de nutrimentos.

2.3 Situación del estado de Michoacán en materia de Lagos

Dentro del estado de Michoacán se encuentran dos importantes cuencas hidrográficas húmedas (el sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago RH12 y el río Balsas RH18), el clima de la región ha permitido que los cuerpos de agua se

mantengan de forma natural principalmente al norte de esta región (CONABIO, 2005).

Los cuerpos de agua del estado han favorecido el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias e industriales y son el soporte para el desarrollo de las poblaciones circundantes, la cuenca del Lerma es la de mayor relevancia socioeconómica para el estado. De acuerdo con Israde-Alcántara (2005), los cuerpos de agua con que cuenta el estado se pueden clasificar en: Lagos tectónicos, lagos vulcano-tectónicos, lagos cratéricos, ríos y cuerpos de agua artificiales.

2.4 Gestión de los recursos hídricos

En México, al igual que en otras poblaciones su desarrollo se encuentra ampliamente vinculado al agua, debido al crecimiento demográfico y la economía del país, siendo que el agua es abundante donde el desarrollo económico es insignificante, y escasa en sitios con densidades de población altas, coloca al país en una situación de pobreza en materia de recurso hídrico.

De esta manera resulta indispensable conjuntar elementos que permitan establecer un patrón de desarrollo sustentable en cuanto a materia de recurso hídrico respecta. La Autoridad Federal del Agua (CONAGUA) “Comisión Nacional del Agua” es la responsable de la gestión nacional de los recursos hídricos, esta se ha visto enfocada principalmente a avances en materia de usos del agua, aunque su función original es la gestión del agua como recurso, este descuido ha generado que la situación en materia de agua se vea agravado con sobre explotación, contaminación, extracciones clandestinas y desórdenes en las cuencas y acuíferos (De la Lanza y Hernández, 2007).

“Sin una gobernabilidad adecuada que contemple los recursos hídricos, no será posible resolver la encrucijada del deterioro de los cuerpos de agua en

México y sus consecuencias tanto en ecosistemas frágiles como en otros hábitats, poniendo en riesgo la propia sustentabilidad” (Mestre en De La Lanza y Hernández, 2007).

La normatividad para la calidad del agua en efluentes está establecida mediante Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y por condiciones particulares de descargas, en la práctica se ha probado que son instrumentos insuficientes para la prevención, revisión y control de la contaminación del agua.

Entre las herramientas útiles en la gestión del recurso hídrico se encuentran los denominados índices de calidad, los índices de contaminación y los índices de estado de conservación, estos consisten en una explicación simple que permite evaluar y orientar sobre la situación en la cual se encuentra el vital líquido. De igual forma permiten monitorear la calidad del agua que permita determinar el estado de salud de los ecosistemas.

2.5 Índices de calidad del agua

Los índices de calidad del agua son una síntesis de los datos brutos del sistema, por lo que tienen la capacidad de resumir y transmitir la información haciéndola de fácil comprensión para la población, los medios, los usuarios y sobre todo para los responsables de la gestión de los recursos hídricos. Los datos arrojados mediante programas de monitoreo de naturaleza química, física y biológica llegan a ser robustos y de difícil comprensión, por lo que los índices intentan representar en un número, intervalo, símbolo, color o frase, el estado de calidad o contaminación del agua, niveles de productividad o estado trófico, representados por una expresión simple conformada por un número reducido de parámetros de manera agrupada.

El carácter de un índice puede ser ambiental, biológico o bien fisicoquímico, esto dependerá de la información que se requiera destacar y las variables a

evaluar, estos tres factores de forma agrupada proporcionan “la condición del ecosistema”. Los índices ambientales evalúan el estrés ambiental con factores como la erosión, actividades antrópicas, incendios, evaluando los componentes impactados y los conservados en torno a la cuenca y el cuerpo de agua; los indicadores biológicos, expresan los efectos de las alteraciones sobre una comunidad biológica y se basan en la capacidad de los organismos de revelar las condiciones ambientales del medio en el que se encuentran, indican la condición de la columna de agua referida a un periodo prolongado de tiempo; los índices fisicoquímicos, no toman en consideración la vida acuática, expresan la naturaleza de las especies químicas presentes en la muestra, son rápidos y puntuales, por lo que sus monitoreos pueden ser más frecuentes.

De acuerdo con Ball y Chorch (1980 en Samboni *et al.* 2007), los índices se clasifican de acuerdo al uso para el que fueron diseñados, y propone cuatro grupos principales:

Índices aplicados a los tensores: de dos tipos los que indican en la fuente y los que indican puntos diversos a la fuente.

Índices medidores de capacidad de estrés: consta de tres tipos, los indicadores de medias simples, los basados en criterios o estándares y los índices multiparámetro (determinados por la opinión de expertos).

Indicadores para lagos.

Índices enfocados a las consecuencias: estos se clasifican a su vez en tres: indicadores de la vida acuática, indicadores del uso del agua e indicadores basados en la percepción (por opinión pública y usos del agua).

La estructura de formación de un índice requiere evaluar distintas cuestiones las cuales son principalmente: la selección de las variables para la construcción del indicador, tomando en consideración los principios de cada

variable a considerar, las fuentes responsables de calcularla, el tipo de variable, así como las unidades de medida con que encuentra expresada. Debido a que la pérdida de datos puede ser ocasional o sistémica, comúnmente es requerido un procedimiento para la imputación de datos perdidos y con ello generar matrices consistentes que permitan hacer la normalización de las variables seleccionadas. Este proceso, se hace debido a que las variables se miden en distintas escalas, siendo necesario estandarizarlas para ser agregadas al índice de manera comparable. Lo anterior, permite generar los subindicadores que son ponderados de acuerdo a los factores de peso de cada variable. De tal forma que en el modelo final (índice), la agregación considera los subíndices ponderados. El diseño de cualquier Índice concluye con la validación del instrumento generado mediante análisis de sensibilidad.

2.5.1 Imputación de datos perdidos

Es un caso común en investigación y análisis de información con gran cantidad de datos la pérdida o no disponibilidad de cierta información, dicha ausencia de datos puede repercutir de forma significativa en los resultados arrojados por el estudio. Otra limitación presente por la ausencia de estos datos, es que los modelos estadísticos tradicionales están diseñados para matrices completas.

En análisis históricos la falta de datos es común, por diversas razones las cuales varían desde la falta de uno o varios muestreos, la omisión de la captura del valor resultante, cuestiones administrativas o criterios considerados al momento del análisis. Los valores históricos no pueden ser determinados de nueva cuenta y su ausencia es una significativa limitación, que dependiendo de sus características y proporción, pueden afectar de forma importante tanto la precisión, como la validez del estudio en cuestión, debido a esto es necesario implementar técnicas para cubrir estos espacios faltantes de información

denominadas “análisis de recuperación de datos” o bien “imputaciones estadísticas”.

Cuando se presentan conjuntos grandes de datos y una baja proporción de valores faltantes puede considerarse la omisión de esta información, caso contrario cuando la proporción de datos faltantes es significativa no es posible ignorar este problema (Useche y Mesa, 2006). Existen diferentes metodologías que permiten matemáticamente reemplazar los valores perdidos, con enfoques basados en modelos como: funciones de verosimilitud, regresión y descomposición de matrices en valores singulares. La precisión de las estimaciones varía dependiendo de las características de los datos perdidos, la distribución de los datos, el método utilizado y las decisiones del investigador (Medina y Galván, 2007; Useche y Mesa, 2006; Salazar y Delgado, 2003).

La ausencia de datos puede seguir o no un cierto comportamiento, a esto se le denomina patrón de comportamiento de datos omitidos y se clasifica en:

- Patrón univariado, cuando la ausencia de respuesta se concentra en una variable en específico.
- Patrón escalonado o monótono, que se caracteriza porque la falta de información ocurre de forma escalonada en las variables de respuesta; patrón aleatorio, este se puede encontrar en cualquier celda ya que no están dispuestas de forma predeterminada.
- Patrón con parámetros no identificados, cuando la omisión de datos está dada en dos o más variables en diferentes períodos.

De acuerdo con Salazar y Delgado (2003), los tratamientos que pueden aplicarse, son los siguientes:

- a) Eliminar los eventos (filas) que cuenten con datos faltantes, siempre y cuando estos no sean un porcentaje significativo dentro del

conjunto de datos, este criterio utiliza el nivel de confianza de la investigación delimitado por el investigador, para considerar los límites de la decisión. Esta técnica tiene como desventaja la posible pérdida de información importante para otras variables.

- b) Ignorar los datos faltantes en cada caso, ponderando la variable convenientemente, teniendo la cautela de no tomar datos inconsistentes como valores que no tengan sentido que ocurran.
- c) Imputar datos ausentes o faltantes.

Modelos de Recuperación de Datos

Cuando al repetir la imputación en varias unidades bajo las mismas condiciones se producen respuestas similares, es conveniente utilizar “modelos determinísticos de recuperación de datos” (Goicoechea, 2002).

- a) Imputación por medias no condicionadas

En 1932, Wilks propuso como método de imputación, el uso de la media de los datos presentes para sustituir los faltantes. Esta técnica es la más simple y es aplicada cuando la cantidad de faltantes es poco significativa ya que al sustituir una gran cantidad de datos con la media puede originar cambios en la distribución de las variables, disminuyendo la desviación, acumulando datos en la media e incrementa la curtosis (figura 1). Esta técnica también ha sido denominada media de los valores disponibles (Little y Rubín, 2002) y es adecuada cuando la omisión de datos presente sigue un patrón de datos perdidos completamente al azar (Cepa y Pacheco, 2009).

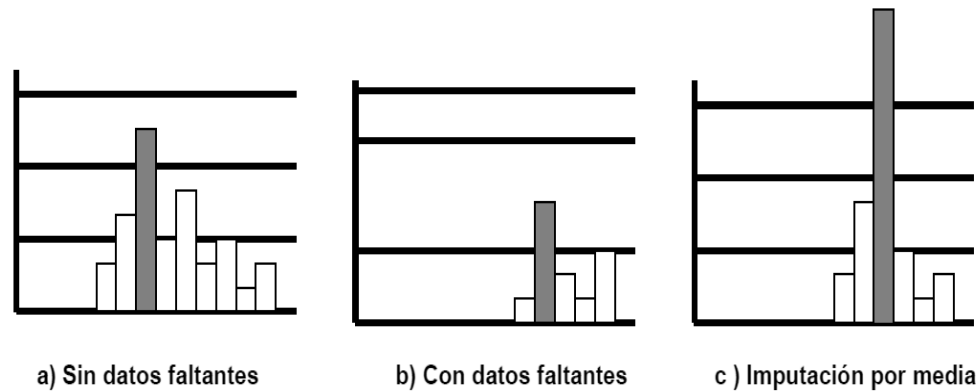


Figura 2. 1 Efectos de la media en la imputación de datos (Medina y Galván 2007)

El método de medias condicionadas, consiste en formar categorías o grupos de covariables correlacionadas con la variable de interés, posteriormente imputar los datos faltantes con observaciones provenientes de una sub-muestra que comparte características en común (Acock y Demo 1994); agrupando el conjunto de datos general en clases distintas con medias diferentes correspondientes a cada clase, esto reduce el sesgo que se origina en la imputación con la media general. Si los datos faltantes en cada categoría son bajos los sesgos disminuyen pero no desaparecen.

b) Imputación por Regresión

Esta técnica propuesta por Burck (1960), parte de la suposición de que las filas de la matriz o del conjunto de datos constituyen una muestra aleatoria de una población normal multivalente. El vector de las medias y la matriz de varianzas y covarianzas de los datos completos son utilizados como parámetros poblacionales, con los cuales se ajustan ecuaciones de regresión para cada una de las variables con datos perdidos en función de los restantes.

c) Imputación por Componentes Principales

Dear (1959), sugiere esta técnica que posteriormente detallaron Beale y Little (1974), teniendo inicialmente una matriz de datos estandarizada con datos completos mediante el método de Imputación por Medias, aplicando posteriormente un Análisis de Componentes Principales ACP sobre la matriz imputada, determinando las distancias entre cada unidad con datos perdidos y las restantes basándose en puntuaciones sobre el primer componente, el valor observado para el componente más cercano al que contiene la información perdida será el valor asignado para imputar el valor faltante, esta técnica también se conoce como imputación por el vecino más cercano.

d) Algoritmo de EM (Expectación-Maximización)

Este método está basado en la función de máxima verosimilitud y permite obtener estimaciones máximo verosímiles (MV) de los parámetros cuando están presentes datos incompletos con estructuras determinadas. En este algoritmo se asume que los datos completos siguen un determinado modelo multivariante. Este método factoriza la función de verosimilitud permitiendo obtener máximos verosímiles y permite resolver de forma iterativa, para el valor esperado: se calcula de los datos completos basándose en la función de verosimilitud y para la maximización se asigna a los datos perdidos el valor esperado obtenido y se calcula en función de máxima verosimilitud, esto se realiza de forma iterativa.

e) Imputación Mediante una Distribución no Condicionada

Este pretende la conservación de la distribución de probabilidad de las variables con datos incompletos, en este método se completan los espacios faltantes con información existente, denominados donantes a partir de la identificación de características comunes entre los donantes y los receptores y con ello decidir el valor que se puede imputar a los datos faltantes.

La imputación o análisis de datos faltantes es necesaria ya que la precisión se ve afectada por la reducción del total de casos de una o más variables, los métodos estadísticos tradicionales están diseñados para conjuntos de datos completos siendo esta otra limitante para las matrices incompletas, la validez también puede verse afectada debido a los sesgos posiblemente existentes en las variables.

2.5.2 Selección de las Variables

El sentido de un índice se encuentra determinado por las variables que lo conforman, por lo que se debe realizar una adecuada selección de parámetros; es necesario considerar la disponibilidad y validez de las variables, así como adecuadas frecuencias de muestreo, información estadística disponible, características e importancia de las variables y las unidades en que se expresan. Aunado a estos criterios es importante revisar la naturaleza interna de los datos y las posibles relaciones existentes entre ellos con métodos de síntesis estadística (Schuschny y Soto, 2009).

Análisis de Relación entre Variables

La implementación de estos análisis permite indagar en la estructura anidada en las variables, la interrelación estadística presente se puede determinar mediante análisis exploratorios simples como: tablas de frecuencias y promedios simples, correlaciones simples y de forma multivariada mediante Análisis de Componentes Principales, Análisis Factorial, Coeficientes Alpha de Cronbach y Análisis de Conglomerados la cual permite clasificar por grupos con características en común mediante distancias de similitud entre grupos. A continuación se describen los análisis empleados dentro de este trabajo:

a) Correlaciones Simples

Las correlaciones simples son una medida de asociación entre dos variables, se considera un relación perfectamente lineal, cuando el valor del coeficiente de correlación es 1 (ó -1, en correlaciones negativas), cuando dicho valor se aproxima a cero no existe relación lineal entre las variables.

El nivel de correlación entre variables puede ser determinado mediante:

Coeficiente de correlación de Pearson: cuando se trata de variables cuantitativas y con distribución normal.

Coeficiente de Correlación de Spearman: alguna de las variables es de ordinal o dicotómica o bien cuando se trata de variables cuantitativas de muestras pequeñas.

El contraste de hipótesis en cada caso puede realizarse tal qué: si el coeficiente es igual a cero:

$$H_0: \rho=0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Con ello, pueden ser establecidos aquellos coeficientes estadísticamente significativos, cabe mencionar que aun con la presencia de una correlación altamente significativa entre dos variables, la relación causante de dicho resultado deberá ser justificado con el significado físico de tales variables.

b) Análisis de Componentes Principales (ACP)

Este análisis consiste en encontrar transformaciones ortogonales de las variables originales partiendo del supuesto que todas las variables juegan el mismo papel y con ello conseguir un nuevo conjunto de variables incorreladas,

denominadas componentes principales, los cuales se obtienen en orden decreciente de importancia. Estos componentes extraen la información común que contiene las variables, por lo que se da la reducción de la dimensión del conjunto original de variables, de tal manera que quedan expresadas en un sistema de referencia como vectores, los cuales definen a las nuevas variables (Jolliffe, 2002).

2.5.3 Normalización de las Variables

La determinación del subíndice para cada variable también denominada estandarización o normalización de las variables, busca transformar a la variable dimensional a un parámetro adimensional, algunos métodos para ello son:

- a) Curvas basadas en ecuaciones matemáticas: se genera una curva de calidad para cada parámetro a partir de una fórmula matemática o bien, a partir de la curva se genera una ecuación matemática.
- b) Curvas basadas en la normatividad: generadas a partir de los valores de los parámetros recogidos, este método intenta ser más objetivo.
- c) Formulación matemática de los parámetros: transforma los valores de cada parámetro a una nueva escala en la cual no se ven alteradas las unidades originales.

El presente trabajo desarrolla la normalización de los datos mediante el primer método, generando ecuaciones matemáticas a partir de las curvas de calidad de cada variable.

i) Datos Aberrantes (Outliers)

Previo a la normalización de los datos es necesario identificar los puntos cuyo valor se encuentra alejado del comportamiento presentado por la distribución de la variable, estos son de tipo multivariado cuando el mismo punto en diferentes variables se encuentra fuera de la masa de datos, jalando con él las distribuciones de más de una variable, un método apropiado para la determinación de valores

aberrantes es mediante el cálculo de la distancia de Mahalanobis, la cual se encuentra definida como un vector multivariado $X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)^T$ de un grupo de valores con media $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N)^T$ y matriz de covarianza $D_M(X) = \sqrt{(X - \mu)^T S^{-1} (X - \mu)}$. Este método asume que los puntos de la muestra se distribuyen alrededor del centro de la masa (o término medio) en forma esférica, cuanto más lejos se encuentra el punto del centro de masa, la probabilidad de que el punto se encuentre fuera del conjunto de datos es mayor. La distancia es determinada con respecto a la estructura de correlación de los datos, así como de la media y desviación estándar (Wicklin, 2012).

Los Outliers univariados pueden ser determinados mediante la observación del histograma de frecuencias, analizando los puntos más alejados a la distribución de los datos.

ii) Categorización por definición de escalas

Consiste en la determinación del subíndice para cada variable, también denominado estandarización, la cual busca transformar la variable dimensional a un parámetro adimensional (Fernández, *et al.* 2003), la categorización o definición de escalas consiste en asignar a cada categoría un intervalo de valores dentro del cual está es válida, comúnmente estos intervalos se encuentran fijados por medidas de localización como deciles, cuantiles y percentiles. Una vez establecidos los intervalos de cada variable es posible generar los diagramas de calidad, en los que se indica la correlación entre la concentración de la variable y su intervalo de calidad, que generalmente se expresan en intervalos de 0 a 1, o bien de 0 a 100. Una vez obtenido el gráfico es posible encontrar la ecuación de calidad de cada variable, observando el comportamiento de los datos Concentración vs Calidad se llega a generar para cada parámetro una ecuación matemática (NAS, 1975).

2.5.4 Ponderación de los Subíndices

Consiste en establecer factores de peso tomando en cuenta la importancia de la variable de acuerdo al interés del índice, esta etapa es determinante ya que define el valor final del índice. Aplicar pruebas estadísticas permite tener en cuenta la correlación entre las variables y poder seleccionar las que muestren menor correlación posible entre sí, o bien atenuar las que demuestran correlación. Una alternativa para esta etapa es realizar ACP, esta técnica arroja como componentes principales, nuevas variables que conservan la variabilidad inicial:

La proporción de variabilidad explicada por un componente es el cociente entre su varianza, el valor asociado al vector que lo define, y la suma de los valores propios de su matriz.

Las covarianzas entre cada componente principal y las variables x vienen dadas por el producto de las coordenadas del vector que define al componente por su valor propio.

Las correlaciones entre un componente principal y una variable x es proporcional al coeficiente de esa variable en la definición del componente y el coeficiente y la desviación típica de la variable

Las r componentes principales ($r < p$) proporcionan la predicción lineal óptima con r variables del conjunto de variables x .

Si se estandarizan los componentes principales, dividiendo cada uno por su desviación típica se obtiene la estandarización multivariante de los datos originales, la cual puede interpretarse como:

- Obtener los componentes principales
- Establecerlos de modo que tengan todos la misma varianza

- Si se estandarizan los componentes, las variables originales son obtenidas de forma multivariante.

2.5.5 Agregación de los Subíndices

Una vez realizada la ponderación, los subíndices con sus respectivos pesos deben ser agregados en una formulación matemática que le permita su simplicidad, dentro de las principales técnicas de agrupación de información se encuentra la comparación entre la media aritmética ponderada y el promedio geométrico ponderado, siendo esta la opción más acertada ya que permite comparar ambas respuestas.

2.5.6 Validación del índice de calidad

El número de factores incluidos en el índice como lo son: la forma de transformación de los subíndices, el esquema de normalización de los datos así como, los métodos empleados en la imputación de datos pueden aportar incertidumbre al modelo; por ello es necesario juzgar lo realizado y evaluar la sensibilidad frente a cambios en la elección de las variables; puesto que podría ocurrir que pequeños cambios de la arquitectura del indicador compuesto, den lugar a grandes alteraciones de los valores obtenidos.

Por lo que debe llevarse a cabo un análisis de sensibilidad para incrementar la transparencia del proceso de diseño del indicador (Schuschny y Soto, 2009).

2.6 Parámetros característicos en los sistemas lénticos

Por medio de un “parámetro” puede evaluarse o comprenderse una circunstancia, ya que es un valor o dato orientativo que permite evaluar o valorar una determinada situación, permitiendo reconocer dentro de un conjunto de elementos, a cada unidad por medio de un respectivo valor numérico. Para poder

caracterizar un sistema léntico y conocer la situación en la cual se encuentra, es necesaria la evaluación de ciertos parámetros.

2.6.1 Parámetros morfológicos y morfométricos

Conforme a Vidal-Abarca, *et al.* (1994), los parámetros morfológicos estudian la forma de un elemento, organismo o sistema. En el caso de los ecosistemas lénticos comprende el origen y la influencia de la forma sobre las características físicas, químicas y biológicas. Los parámetros morfométricos son las dimensiones utilizadas para representar las medidas del sistema y se dividen en: Primarios (dimensiones superficiales) obtenidas en campo por medición directa, y secundarios (dimensiones sub-superficiales) son obtenidos a partir de los primarios.

- a) Dimensiones Superficiales: longitud máxima, es la distancia entre los dos puntos más separados del continuo del mapa; longitud máxima efectiva, se considera a la longitud de la línea recta que conecta los puntos más remotos del lago; ancho máximo y ancho efectivo, medidos en un ángulo recto aproximado a la longitud respectiva; ancho medio, definido mediante la razón superficial y la longitud máxima; área total, es la superficie del lago incluidas las islas y promontorios limitados por el cuerpo de agua; área superficial, es el área total restando el área de islas y promontorios; perímetro o longitud de la línea costera, es la medida del contorno del lago; y fetch efectivo, que es la distancia de activación del viento sobre las olas en el espejo de agua a partir de un punto determinado.
- b) Dimensiones Sub-superficiales: profundidad máxima, constituye la parte más profunda del lago; profundidad media, es la relación entre área y volumen; profundidad relativa, está dada por la relación entre profundidad máxima y diámetro del lago; Volumen, identificación del volumen total del lago implicando conocer su volumen a cada profundidad determinada;

curva hispografica, es la representación gráfica de las relaciones entre profundidad, área y volumen.

2.6.2 Material suspendido

Consiste en limos, arcillas, partículas finas de materia orgánica e inorgánica y se ve reflejado o responde a las variables de color, turbidez, sólidos totales, sólidos suspendidos fijos y grasas y aceites.

a) Color

El color se encuentra dividido en “color aparente” y “color verdadero”, el primero es el que presenta la muestra tal cual, por lo que detecta las sustancias suspendidas y las sustancias disueltas, el segundo se determina a partir de la muestra una vez filtrada por lo que elimina las partículas suspendidas y detecta las sustancias disueltas. Esta variable presenta relación con la capacidad del cuerpo de agua para absorber radiación solar y transformarla en energía. El color del agua en los lagos dependerá de biofactores, tipo de cuenca y el origen del lago principalmente, iones metálicos como el Fe y Mg también proporcionan tonalidades al cuerpo de agua. El color en los lagos es una variable de interés ya que altos valores de color impide el paso de la luz solar al cuerpo de agua, limitando la productividad primaria, las partículas que dan coloración al agua pueden captar la radiación solar favoreciendo el incremento de la temperatura del cuerpo de agua y afectando en otros factores como la concentración de oxígeno disuelto ya que al aumentar la temperatura este es desprendido paulatinamente del cuerpo de agua. Por lo cual es importante no solo determinar el color sino la distancia a la cual se extingue penetra la luz. La NMX-AA-045-SCFI-2001 (Secretaría de Economía 2001), marca los lineamientos para la toma, preservación y análisis de color para una muestra de aguas naturales.

b) Turbidez

Esta es causada por las partículas en suspensión o coloidales de tamaños variados como lo son: arcillas, limos, arenas, plancton, microorganismos y materia orgánica. En la naturaleza de esta variable influye el tipo de suelo del cuerpo de agua y las características de las fuentes tributarias. La turbidez está relacionada con el color aparente, influye sobre la incidencia de la luz en el cuerpo de agua y por ende en la productividad primaria ya que limita la penetración de la luz. La turbidez es determinada mediante un turbidímetro o nefalómetro en unidades nefalométricas de turbidez UNT. En México la determinación de esta variable está especificada en la norma NMX-AA-038-SCTF-2001 (Secretaría de Economía 2001a).

c) Sólidos Totales

Los sólidos totales están constituidos por sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales, la presencia de estos en el cuerpo de agua está regida por el origen del cuerpo de agua, tipo de cuenca, influentes provenientes de descargas industriales y sanitarias (Mendoza, 2000). Los sólidos disueltos totales están conformados por las sustancias que se encuentran en solución como el sodio, potasio, nitritos, sulfatos y nitratos. Se evalúan mediante la determinación en peso de la muestra filtrada una vez evaporada. En los sólidos suspendidos se encuentran las sustancias coloidales o en suspensión y son determinadas cuantitativamente por litro de muestra de agua.

d) Sólidos Suspendidos Fijos

Estos sólidos están conformados por partículas inorgánicas como lo son las arcillas y arenas, se determinan mediante calcinación de los sólidos suspendidos totales ya que los que se conservan son los provenientes de sustancias inorgánicas.

La norma NMX-AA-034-2001 marca la determinación de sólidos y sólidos disueltos en aguas naturales, especificando desde la toma, hasta el análisis de la muestra.

e) Grasas y Aceites

Son compuestos inorgánicos, insolubles en agua, con baja densidad y difícil biodegradación, estas interfieren en el intercambio de gases entre la capa superficial de agua y la atmosfera. La norma NMX-AA-005-SCFI-2000, establece la metodología de análisis de grasas y aceites en la muestra, la cual se lleva a cabo mediante una extracción de hexano, ya que es un buen solvente de estos compuestos (Secretaría de Economía 2001b).

El material suspendido influye en la penetración de la luz sobre el cuerpo de agua, ya que las radiaciones solares al incidir contra las partículas inmersas en el cuerpo de agua pueden ser absorbidas, refractadas o dispersadas, esto repercute en el comportamiento térmico, la productividad y la biodiversidad del ecosistema, y en algunas variables como lo es el pH. Estas partículas del mismo modo interfieren en la solubilidad del oxígeno, las grasas y aceites impiden el intercambio atmosférico y al no haber intercambio de CO₂ del agua a la atmosfera el agua tiende a acidificarse.

En el material suspendido se encuentran: la materia orgánica, los nutrimentos y el material iónico por este motivo es que son parámetros ligados entre sí.

2.6.3 Materia Orgánica

Son todos aquellos residuos que provienen de animales y vegetales (o cualquier ser viviente) que sufrieron descomposición a tal grado que el material original se desconoce. Los productores primarios fotoautótrofos utilizan la luz solar como energía para sintetizar la materia orgánica. Los productores primarios

quimioautótrofos usan la energía de las reacciones de oxidación para sintetizar la materia orgánica.

El consumo es el proceso en el cual los organismos obtienen energía directa o indirectamente a partir de materia orgánica sintetizada por productores primarios foto o quimioautótrofos.

Se conoce como detrito a las pérdidas de carbono en cualquier nivel trófico ocasionada por factores ajenos a la depredación. La descomposición es realizada por hongos o bacterias que convierten la materia orgánica en sales minerales y agua. Estos procesos presentan un alto grado de dependencia. En los lagos eutróficos predomina la producción, en los oligotróficos existe teóricamente un equilibrio entre producción y consumo y la descomposición. Los parámetros comúnmente empleados para determinar la materia orgánica son Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno, estos se basan principalmente en la cantidad de oxígeno necesario para descomponer u oxidar los compuestos orgánicos.

a) Oxígeno Disuelto

De acuerdo con la Secretaría de Economía (2001c) es la cantidad de oxígeno disponible y libre presente en el agua, es esencial para la vida acuática, su concentración varía en cada ecosistema dependiendo de diversos factores como las características fisicoquímicas, del agua, la actividad bioquímica de los organismos acuáticos y la altura por mencionar algunos. El oxígeno entra en el cuerpo de agua como oxígeno atmosférico y por generación de Oxígeno a través de los organismos fotosintéticos, en los lagos el Oxígeno Disuelto se debe principalmente a esta última, debido a las condiciones de los sistemas lénticos.

La técnica de medición de este parámetro para aguas naturales se basa en la fijación de oxígeno en una muestra para así llevarlo a reaccionar con hidróxido

de magnesio, acidificar la muestra, para producir la oxidación del yodo y poder valorarlo, esta técnica se especifica en la norma NMX-AA-012-SCFI-2001.

b) Demanda Bioquímica de Oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno es una determinación indirecta de la cantidad de materia orgánica biodegradable, los métodos de medición tienen fundamento en la descomposición de materia orgánica por medio de microorganismos, mediante la cantidad de oxígeno empleado para llevar a cabo esta degradación. En México la especificación de este parámetro desde su toma preservación y análisis se especifica en la norma NMX-AA-028-SCFI-2001 (Secretaría de Economía 2001d).

c) Demanda Química de Oxígeno

Determina indirectamente la cantidad de los materiales oxidables, sean de origen orgánico y/o inorgánico. Casi todos los materiales son oxidados en esta determinación con excepción de algunos compuestos aromáticos como el benceno, tolueno y la piridina. Este parámetro se basa en la oxidación biodegradable forzada de los compuestos oxidables por medio de compuestos químicos oxidables. La norma NMX-AA-030-SCFI-2001 especifica el procedimiento para su determinación (Secretaría de Economía 2001e).

2.6.4 Nutrientes

La principal fuente natural de nutrientes es la materia orgánica, que al desmineralizarse pone de nuevo a disposición de las plantas y algas iones de nitratos y fosfatos, siendo los principales responsables de la productividad primaria. Otra fuente de nutrientes son los desechos originados de industrias, estos al ser una fuente importante de eutrofización en los ecosistemas acuáticos, causan serios problemas como: la desoxigenación en el fondo de los lagos,

acelerando su proceso de extinción. Entre los principales nutrimentos se encuentran el nitrógeno y el fosforo (Camargo y Alonso, 2007).

a) Nitrógeno

El nitrógeno se encuentra en los aminoácidos y los ácidos nucleicos esenciales para los seres vivos, se puede encontrar como nitrógeno orgánico o bien como nitrógeno inorgánico el cual está formado a su vez por nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Se denomina Nitrógeno total a la cantidad de Nitrógeno encontrado en todas las especies nitrogenadas (nitrógeno orgánico y nitrógeno inorgánico). En los cuerpos de agua la cantidad de nitrógeno amoniacal es nula o casi nula, las altas cargas de nitrógeno amoniacal en un cuerpo de agua son indicio de una contaminación reciente o descargas de tipo residual o agrícola. El nitrógeno orgánico se encuentra principalmente en forma de ácidos nucleicos, aminas y ureas. En las aguas residuales el nitrógeno se encuentra en las cuatro formas básicas, si las aguas residuales son frescas, el nitrógeno se encuentra en forma de urea y compuestos proteicos, pasando posteriormente a formar nitrógeno amoniacal por descomposición bacteriana, a medida que el agua se estabiliza, por oxidación bacteriana en presencia de oxígeno, se generan nitritos y posteriormente nitratos. El predominio de la forma de nitrato en el agua residual, es un indicador de la estabilización del agua con respecto a la demanda de oxígeno.

En los cuerpos de agua los compuestos nitrogenados toman un papel muy importante, puesto que participan en el desarrollo de organismos animales y vegetales. En condiciones normales los compuestos nitrogenados del agua provienen fundamentalmente de la degradación de la materia orgánica muerta, que a su vez ha sido absorbida de la atmosfera, en condiciones alteradas las cargas de nutrimentos provienen de descargas agrícolas principalmente por las altas cantidades de fertilizantes y descargas industriales y urbanas con compuestos como los detergentes. La norma NMX-AA-026-SCFI-2001 establece

la toma de la muestra, preservación y análisis para los parámetros de Nitrógeno Total kjeldahl y Nitrógeno Orgánico (Secretaría de Economía 2001f).

Los Nitritos están considerados como los compuestos de nitrógeno más inestables, esta variable se ve afectada por las concentraciones de oxígeno disuelto, ya que de este depende el comportamiento del nitrógeno en cada una de sus formas. La norma NMX-AA-099-SCFI-2006 especifica el métodos de prueba espectrofotométrica para su determinación (Secretaría de Economía 2006).

Los Nitratos son la forma de nitrógeno más estable, abundante y de mayor interés en los cuerpos de agua, encontrándose en concentraciones pequeñas. La norma NMX-AA-79-SCFI-2001 establece dos métodos de prueba de análisis de nitratos para aguas naturales los cuales son: el método de reducción con cadmio cuperizado y el método de sulfato de brucina (Secretaría de Economía 2001g).

b) Fosfatos

Son sales de esteres de ácido fosfórico. El fósforo inorgánico provienen de diversas fuentes como los procesos de tratamiento de aguas que utilizan trazas de fosfatos condensados como floculantes, de los fertilizantes como residuo de procesos agrícolas, detergentes y productos de limpieza a nivel doméstico e industrial. El fósforo orgánico es resultado de la descomposición de la materia orgánica. Los niveles de fósforo en regiones montañosas de morfología cristalina son menores, pero estos aumentan en tierras bajas derivadas de depósitos de rocosos sedimentarios. Lagos con altas cargas de materia orgánica presentan altas concentraciones de fósforo de forma natural. En México la norma NMX-AA-029-SCFI-2001 establece su determinación, con los métodos: de cloruro estanoso y ácido vanadomolibdefosforico (Secretaría de Economía 2001h).

c) Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)

Se catalogan dentro de los nutrimentos, son de origen alóctono: insecticidas, fertilizantes, descargas domésticas e industriales entre otros. Son catalogados como surfactantes y se encuentran entre las más destacadas sustancias que presentan actividad ante el azul de metileno, están compuestos por sulfatos y Nitratos. La determinación en México de este parámetro esta especificada en la norma NMX-AA-039-SCFI-2001 para aguas naturales (Secretaría de Economía 2001i).

2.6.5 Material Iónico

a) pH

Permite conocer las condiciones de acidez o alcalinidad y se define como el potencial de hidrógeno, que indica la concentración de ion hidronio en una solución. Las fuentes de ion hidronio en los cuerpos de agua naturales son el ácido carbónico (H_2CO_3) y sus disociaciones, siendo las fuentes naturales la difusión del CO_2 atmosférico, procesos catabólicos, mineralización de CaCO_3 , los cuales tienen efecto sobre el pH del medio. Los lagos volcánicos con formaciones sulfurosas activas, son fuente de acidez y lagos de zonas áridas, presentan pH alcalino, los ácidos húmicos presentan un medio ácido aún más que con el ácido carbónico. La fotosíntesis también puede influir en el pH del agua, cuando estas contienen altas cantidades de bicarbonatos de calcio, la remoción del CO_2 por fotosíntesis ocasiona un incremento en el pH del agua. En ambientes cársticos los ecosistemas acuáticos contienen los más altos valores conocidos de pH. Esta variable puede ser determinada por tiras indicadoras de pH, comparadores de bolsillo o electroquímicos (Secretaría de Economía 2001j).

c) Conductividad Eléctrica

Refleja la capacidad de conducir la corriente eléctrica en una solución, responde a la presencia de iones disueltos como: cloruros, nitratos, sulfatos, fosfatos, sodio, magnesio y calcio. La variación de ésta depende de la concentración total de los iones disueltos, su movilidad, valencia, concentraciones relativas y la temperatura de medición. Es una variable general que depende de otras, pero es indicativo de eventos puntuales de contaminación, cuando detecta variaciones significativas. La norma NMX-AA-093-SCFI-2000 establece el método y toma de la muestra para su determinación en aguas naturales (Secretaría de Economía 2001k).

d) Dureza

Expresa mediante equivalentes de carbonato de calcio la concentración de cationes metálicos no alcalinos como lo son el calcio, el estroncio, el bario y el magnesio. En un cuerpo de agua la Dureza se rige principalmente por los iones calcio y magnesio. El calcio es indispensable para la formación de conchas y huesos, pero *“no es considerado un nutrimento limitante para el ecosistema”*. El magnesio es importante para la formación de la molécula de la clorofila. Ambos iones determinan la dureza del agua, de acuerdo con Ohle (1934), valores por debajo de 10 mg/L indican baja productividad, entre 10 y 20 mg/L productividad media, y mayores a 25mg/L hablan de productividad alta. La dureza del agua en cada ecosistema dependerá de los factores del lugar en el que se encuentre. La normativa en México que señala los métodos para la determinación de dureza en cuerpos de agua naturales está señalada en la norma NMX-AA-072-SCFI-2001.

e) Alcalinidad

Refleja la capacidad del cuerpo de agua para amortiguar sustancias ácidas y regular el pH, es indicadora de los carbonatos necesarios para realizar la fotosíntesis dentro del ecosistema. Por lo que este parámetro desempeña un papel importante en la productividad de los cuerpos de agua naturales, indica la fuente de reserva para la fotosíntesis. Los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, son las especies que contribuyen en mayor parte a la alcalinidad. Los primeros, dos compuestos presentes en los cuerpos de agua se generan por desgaste y disolución de rocas pertenecientes a la cuenca del cuerpo de agua. El CO_2 reacciona con el agua formando pequeñas cantidades de ácido carbónico con esto las rocas de carbonato son disueltas contribuyendo a la alcalinidad del lago (Secretaría de Economía 2001l).

El origen de estas especies puede ser principalmente por dos fuentes: la atmósfera y la respiración celular de las plantas. La determinación de la acidez y alcalinidad en aguas naturales, es con base a la NMX-AA-036-2001.

f) Cloruros

El ion cloruro en los cuerpos de agua está asociado a elementos como el sodio, potasio, magnesio y calcio. Los cloruros llegan al cuerpo de agua de forma natural y antrópica. Dentro de las naturales está la escorrentía, influyendo el tipo de cuenca y el origen geológico, se encuentra en concentraciones bajas, por lo que es regularmente un indicador de contaminación antrópica como descargas domésticas, plantas de sosa caústica, plantas desalinizadoras, fábricas de bacterias, entre otras. Este ion es un factor limitante para el crecimiento vegetal. La determinación de este parámetro está dada por técnicas volumétricas como el método de Mohr y el de Volhard, la NMX-AA-073-SCFI-2001 especifica la técnica normalizada para la determinación de cloruros en los cuerpos de agua naturales mediante la valoración con nitrato de plata y como indicador cromato de potasio.

g) Sulfatos

El azufre (S) es un elemento abundante en el agua, pero cuando escasea puede ser un factor limitante para la síntesis de ciertas proteínas que lo incorporan en sus moléculas. En los ecosistemas acuáticos los compuestos azufrados se encuentran de forma natural, incorporándose por medio del ciclo biogeoquímico en diferentes formas y concentraciones. Parte del sulfato de los lagos es originado por la mineralización de las rocas en la cuenca, otra forma por la cual ingresa es mediante las precipitaciones, derivado del dióxido de azufre presente en la atmosfera. La norma NMX-AA-074-SCFI- establece la determinación del ion sulfato en aguas naturales, teniendo su principio en métodos gravimétricos y turbidimétricos, precipitando cloruro de bario en un medio ácido, para formar cristales de sulfato de bario.

h) Sólidos Disueltos Totales

Esta variable incluye a otros parámetros como el sodio, magnesio, sulfato y carbonatos, de igual forma que la conductividad son una herramienta informativa de la condición pero no cualitativa. Dentro de los sólidos disueltos totales se encuentran los sólidos disueltos volátiles comúnmente conformados por compuestos orgánicos, y los sólidos disueltos fijos son los remanentes que permanecen después de haber sido sometidos a altas temperaturas. La norma NMX-AA-034-SCFI-2001, establece el procedimiento para la determinación de este parámetro.

2.6.6 Bacteriológicos

La presencia de bacterias coliformes es un indicio de contaminación por aguas negras o desechos en descomposición, ya que estas se encuentran comúnmente en plantas, suelo y animales, principalmente de homeotermos incluyendo el ser humano. Comúnmente, las bacterias coliformes se encuentran

dentro de la columna de agua con mayor abundancia en la capa superficial o bien en los sedimentos (Munn, 2004).

En el grupo de coliformes se incluyen varios géneros, por lo que no es indicador exclusivo de organismos fecales. Algunas especies coliformes son asociadas frecuentemente a desechos vegetales o pueden ser habitantes comunes del suelo o de las aguas superficiales, principalmente en países con temperaturas altas, que permiten el desarrollo de bacterias coliformes de origen fecal. Estos pueden reproducirse en presencia de materia orgánica.

Se determina de acuerdo a la norma mexicana (NMX-AA-42-1987), la cual indica los procedimientos para la valoración de los organismos coliformes totales y fecales; también, los define de la siguiente manera:

a) Coliformes Totales:

Considerados organismos capaces de desarrollarse en medio aeróbico ya sea a 35 °C en un medio de cultivo líquido lactosado con producción de ácido y gas dentro de un periodo de 48 h.

b) Coliformes Fecales:

Son organismos termotolerantes que presentan las mismas propiedades fermentativas a 44 °C.

CAPITULO 3. ANTECEDENTES

Si la valoración del grado de contaminación en un cuerpo de agua se presenta de forma simple, de tal manera que sea fácil de interpretarlo, será más sencillo clasificar este líquido para algún posible uso; por esta razón ha sido una necesidad el desarrollar formas de evaluar la calidad del agua. Desde la perspectiva de la fisicoquímica, los primeros estudios realizados al respecto fueron los aportados por Horton (1965) y Liberman (1969) en la búsqueda de una metodología unificada que estimara los patrones o condiciones de contaminación en el agua con técnicas multiplicativas; años más tarde Brown *et al.* (1970) realiza una aportación de mayor amplitud proponiendo una agrupación de dos técnicas: la aritmética y la multiplicativa, y como parámetros más significativos: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, turbidez, sólidos totales, nitritos, fosfatos, pH, temperatura, coliformes fecales, plaguicidas y elementos tóxicos. Este índice fue mejorado para el año de 1975 por Deininger para la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NAS, 1975).

Landwehr y Deininger (1976), realizaron comparaciones entre las técnicas multiplicativas y las técnicas aritméticas, demostrando que las primeras son más sensibles a las variaciones en los parámetros y por ende reflejan una mayor precisión en la calidad del agua. Ott (1978), hace un estudio sobre los índices usados en Estados Unidos, proponiendo asignar pesos específicos a los parámetros, tomando en consideración los usos del agua y el significado en los cambios de concentración reflejados en los parámetros.

Para 1980, una importante aportación fue realizada por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF), con la formulación del índice de calidad de agua “Water Quality Index” (WQI) empleando la técnica de investigación Delphi (Ball y Church 1980). Este índice de carácter multiparamétrico, fue diseñado por la colaboración de 142 expertos, con tres estudios consecutivos, en el primer estudio cada experto evaluó 35 variables, indicando si el parámetro debía ser: no incluido,

indeciso o incluido, los parámetros considerados como incluidos debían ser calificados del 1 al 5 de acuerdo al grado de importancia de la variable siendo 1 el valor de mayor importancia; en el segundo estudio se analizaron las respuestas del primero, arrojando nueve parámetros como los de mayor importancia: fósforo total, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes fecales, nitratos, pH, cambio de temperatura, sólidos disueltos totales y turbiedad; en el tercer estudio cada experto realizó curvas de función para los parámetros seleccionados, con la finalidad de producir una curva promedio por parámetro, con intervalos de cero (calidad muy pobre) a 100 (calidad excelente). El índice fue agrupado mediante un promedio aritmético ponderado.

Posteriormente para 1980, se diseñó el Índice de Calidad de Agua de Oregon (OWQI), a partir del NSF con el fin de evaluar los impactos de las fuentes de contaminación en los cursos de agua de Oregon, Estados Unidos; en dicho índice se incluyeron inicialmente seis variables: Porcentaje de Saturación de Oxígeno Disuelto, DBO, pH, Sólidos Totales, Amonio más Nitratos y Coliformes Fecales, para su formulación se empleó la técnica Delphi, en el un panel de expertos se determinó la importancia estadística de la categorización de cada variable (ponderación), los subíndices fueron obtenidos de tablas de transformación logarítmica, estas transformaciones tienen como ventaja cambiar en magnitud los niveles bajos de deterioro que generan gran impacto, para la agregación del OWQI inicialmente se empleó una función de promedio geométrico ponderado, la cual fue modificada posteriormente a uno aritmético, este índice fue discontinuado dada la dificultad de cálculo en computadores de primera generación (DEQ, 1980). A partir de este índice se determinó el denominado Índice RIP (*River Physiochemical Index*), el cual consideró una sola ecuación para sólidos disueltos a diferencia del índice de Oregon que consideraba varias ecuaciones en razón a sus diferencias geomorfológicas, este índice presentó correlaciones con índices bióticos, actualmente dicho índice es útil al sur de Idaho y se desea ampliar su utilidad al resto del estado. Entre otros trabajos realizados

en Estados Unidos se encuentra el Índice de Calidad del Agua Para El Valle Del Río Miami, el cual fue diseñado con el objeto de educar a la comunidad acerca de la calidad y cantidad de agua del área, este índice evalúa los aspectos del río como sistema ecológico para la vida acuática, la seguridad humana y la estética del paisaje (WEP, 1996). El Índice de Calidad de Agua para el Río Des Moines (DRM WQI) es otro de los trabajos realizados en Estados Unidos diseñado a partir del índice NSF bajo los criterios de la EPA, presenta una escala de calidad de 0 a 100 para cada variable y estas fueron tomadas de registros de monitoreos realizados en un período de 20 años; el Índice de Calidad de Agua para Washington expresa los resultados relativos a los niveles exigidos para mantener los usos adecuados, su utilidad está en indicar si la calidad del agua es menor que la esperada o necesariamente da soporte a usos benéficos, tiene en consideración las variables: Temperatura, pH, coliformes fecales oxígeno disuelto, nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos y turbidez, de igual manera se basó en el índice de la NSF y su forma de agregación está dada mediante un promedio armónico.

Una de las aportaciones más relevantes, es realizada por Dinius (1987), en la cual elabora un índice de calidad de agua que evalúa los niveles de contaminación, estimando la cantidad de los contaminantes, este refleja la calidad e importancia de cada variable en la contaminación global formando un sistema compuesto por parámetros agrupados en un índice tipo multiplicativo, para reflejarse así en un solo sistema. Existen algunos otros trabajos como el de Kung *et al.* (1992) y Dojlido *et al.* (1994) los cuales han propuesto herramientas para el desarrollo de nuevos índices.

El Índice de British Columbia (BCWQI) fue desarrollado en 1996 en Canadá, el cual puede ser aplicado en ríos, arroyos, áreas marinas como bahías y acuíferos; enfocado tanto en la columna de agua como en los sedimentos y la vida acuática. Este índice está basado en límites de las variables, dados por la

legislación con la finalidad de proteger los usos de los cuerpos de agua, toma en consideración los criterios de calidad de agua y la calidad natural, así como las cargas residuales a las cuales puedan exponerse los cuerpos de agua, está diseñado para describir la calidad del agua de manera continuada, este observa en conjunto el cuerpo de agua, por lo que este índice no determina variaciones del agua localizadas inmediatamente, el modelo para este índice es una mezcla de: factores conocidos por afectar la calidad del agua y relaciones empíricas establecidas por la determinación de datos históricos de monitoreo (BCWQI, 1996). Este índice presenta una amplia flexibilidad, está diseñado para aplicarse en 140 cuerpos de agua de la región, fija su atención en las características más importantes de riesgo en el cuerpo de agua y permite una aplicación consistente en aguas dulces, marinas y subterráneas; este índice reconoce seis usos del agua: bebida humana, recreación, irrigación, brebaje, vida acuática y vida silvestre; con una clasificación en cinco criterios: excelente, buena, aceptable, marginal (en el límite) y pobre.

Van Helmond y Breukel (1996), han observado que existen índices de uso común en todo el mundo que toman en cuenta un intervalo de tres a 72 variables en las cuales incluyen al menos tres de los siguientes parámetros: OD, DBO₅, DQO, NH₄-N, PO₄-P, NO₃-N, pH y sólidos totales. Los índices de calidad del agua han sido modificados con fines específicos, en el Índice de Dalmatia se aplicó la metodología de índices de contaminación, este considera cuatro clases de aguas: primera clase, aguas subterráneas y superficiales que puedan ser usadas en estado natural o después de ser tratadas; segunda clase, aguas subterráneas y superficiales, que no pueden ser usadas para propósitos potables sin haber sido tratadas; tercer clase, aguas que no pueden ser usadas en estado natural o después de haber sido tratadas; y cuarta clase: aguas que no pueden ser usadas (Stambuk-Giljanovc 1999). Este índice incluye nueve variables: DBO, OD, coliformes fecales, pH, Temperatura, Nitratos totales, Fósforo total, Sólidos totales,

y Turbidez; las variables fueron elegidas por una comisión de expertos en la región.

Mientras tanto en los países bajos se desarrollaba la metodología AMOEBA (A General Method Of Ecological and Biological Assessment), el cual nace como resultado de un proyecto de cooperación internacional entre la India y Holanda, enfocado en establecer un programa de monitoreo en el río Yamuna en la India. AMOEBA es una técnica de representación gráfica para la descripción y valoración de ecosistemas acuáticos (Kuik y Verbruggen, 1991), con un concepto de desarrollo sustentable tuvo en consideración tres enfoques: producción y rendimiento agrícola sustentable, diversidad sustentable de especies y regulaciones o normatividades sustentables. Los subíndices incorporados en esta metodología fueron: índice de contaminación bacterial, índice de contaminación por nutrientes, índice de producción- respiración, índice saprobio bentónico, índice de diversidad biológica, índice de contaminación industrial e índice de contaminación por pesticidas. Así, estudios realizados en Sudáfrica por Cooper *et al.* (1994) y en Australia por Richardson (1997), están enfocados a generar índices locales para sus estuarios; o en el caso específico del río Kaya en Taiwan, Mey-Lio Shioh (2004) el cual propone un índice de calidad del agua compuesto por la media geométrica de tres aspectos definidos y multiplicados por tres coeficientes, la media aritmética e incorporando una media mixta por medio de la cual asegura que la puntuación del índice refleje información útil sin ocultar datos relevantes.

En Colombia, la medición de parámetros fisicoquímicos es una actividad rutinaria, para el año 2002, el Sistema de Información Ambiental Colombiano comenzó a trabajar en el desarrollo de 14 indicadores ambientales, de ellos tres corresponden a la oferta hídrica, dos a la sustentabilidad del recurso, seis a la calidad del agua dulce y tres para aguas marinas y costeras (IDEAM *et al.*, 2002). Años más tarde un estudio desarrollado por Fernández y Solano (2005), presenta una comparación entre 30 índices de calidad del agua, basándose en su

estructura matemática y a la semejanza entre los parámetros con lo que tuvo como respuesta que existen variaciones importantes en las determinaciones aportadas entre unos índices y otros y que cuentan con al menos tres de las siguientes variables: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno o demanda química de oxígeno, nitrógeno amoniacal, fosfatos, nitratos, pH y sólidos totales.

Los indicadores de calidad del agua, en su mayoría están principalmente enfocados a evaluar la contaminación de carácter fisicoquímico, haciendo hincapié en los posibles usos del agua, pero dichos índices no son indicadores del estado de eutrofia en que se encuentran los cuerpos de agua pertenecientes a sistemas lénticos, que son fuente importante de recurso hídrico para los asentamientos humanos. Los índices de cambios ecológicos en sistemas acuáticos, han sido desarrollados principalmente con variables que intervienen en la eutroficación acelerada. (Duncan y Rzoska, 1980); por lo que para determinar la situación en que se encuentra un lago, es indispensable conocer no solo las condiciones de contaminación orgánica sino de igual importancia determinar su estado trófico. Existen índices que buscan determinar esta condición de los cuerpos de agua como el propuesto por Vollenweider (1968), el cual introduce el concepto de carga de nutrimento con relación a la profundidad del lago, evaluando las comunidades de organismos bénticos, la profundidad y el fósforo total con la finalidad de determinar el estado trófico del lago en función del fósforo total.

Posteriormente Carlson (1977), propone un índice para la determinación del estado trófico de lagos templados, el cual evalúa los parámetros (correlacionados) de concentración de fósforo y clorofila “a” superficiales y disco de Secchi, asentando la diferencia entre los niveles tróficos mediante ecuaciones de regresión entre estos parámetros, para ello empleó la información de 150 cuerpos de agua, y estableció una escala que va de 0 a 100, en la cual cada subdivisión de 10 representa una duplicación de la biomasa algal, el fósforo total o

bien de los valores del disco de Secchi, de acuerdo con Lorenzen (1980) y Megard *et al.* (1980), este índice no toma en consideración otro tipo de sustancias lo que le hace impreciso. Gliwicz y Kowalczewski (1981), diseñaron un índice trófico basado en el déficit de oxígeno y la profundidad del disco de Secchi en lagos de diferente estado trófico.

En 1977, Castagnino realiza una aportación para el conocimiento de coeficientes de exportación de nutrimentos para estimar la carga dispersa de nutrimentos en los lagos cálidos tropicales de América Latina, dependiendo del uso de la cuenca, teniendo en cuenta que toda actividad realizada en ella se verá reflejada en el lago (Salas *et al.*, 1996). Thomman y Mueller (1987), señalan que existen factores fisicoquímicos los cuales limitan o favorecen el crecimiento fitoplanctónico, siendo éste el principal responsable de la eutrofización de los cuerpos de agua; los componentes responsables de la tasa de crecimiento del fitoplancton son la Temperatura, la Radiación solar y los Nutrimentos. Schindler *et al.*, (1988), afirma que índices basados en la concentración de clorofila, volúmenes de fitoplancton y lecturas del disco de Secchi, responden sensiblemente al incremento en las cargas de nutrimentos en ecosistemas con aguas oligotróficas o etapas tempranas de eutrofia, pero es impredecible para lagos con tendencias eutróficas.

Para México, también es una necesidad determinar el nivel de contaminación de un cuerpo de agua, motivo por el que resulta ineludible el desarrollo de un índice que determine la calidad del agua, que además de específica sea una herramienta confiable; en el Lago de Chapala el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1974), sugirió el estudio de doce parámetros basándose en los resultados de la NSF. En la búsqueda de una herramienta que indicara la situación ecológica y ambiental del estado de Jalisco respecto a sus sistemas acuáticos. Montoya *et al.*, (1997), realizaron una importante aportación al desarrollo de los índices en México, el índice propuesto, define el grado de

contaminación en función del contenido de agua pura presente en la muestra ...“el agua totalmente contaminada tiene un valor de calidad igual o cercano a cero, de lo contrario el agua totalmente pura un valor de calidad de 100”... Este índice está integrado por 18 variables asignadas a cuatro categorías: cantidad de materia orgánica, en esta se encuentra el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno; materia bacteriológica presente, evaluando coliformes totales y coliformes fecales; características físicas, color y turbiedad; y finalmente los iones disueltos, englobando alcalinidad, dureza, cloruros, conductividad específica, pH, grasas y aceites, sólidos suspendidos, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, nutrimentos (nitratos, nitrógeno amoniacal, fosfatos y detergentes); el grado de contaminación determinado en este índice determina el posible uso del recurso.

Tomando como referencia el modelo elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM de 1974, León (1992), propone un modelo en el cual agrupa los parámetros más representativos para la cuenca Lerma – Chápala y tomando como base el modelo propuesto por Dinius (1987), realiza modificaciones agregando un mayor número de parámetros que permiten evaluar la calidad del cuerpo de agua.

Rodríguez et al. (1997), establece un estudio específico enfocado en la región del Estado de Tabasco por medio de 28 variables temporales, con el objeto de determinar la sensibilidad de las ecuaciones mediante la importancia de las variables con la finalidad de proponer un índice de calidad para dicha zona, este estudio fue realizado aplicando el índice de calidad propuesto por Walski y Parker (1974), el cual está basado en una media geométrica para los valores de los parámetros en un intervalo de cero a uno, proponiendo la temperatura, nutrimentos, sólidos en suspensión, pH, turbidez, bacterias coliformes, oxígeno disuelto, color, grasa y toxicidad como los parámetros de utilidad.

De acuerdo con De la Mora *et al.*, (2001), la evaluación de la calidad del agua (ICA), implica un gran número de parámetros físicos, químicos y biológicos,

que por sí solos, no proporcionan un diagnóstico apropiado en el grado de contaminación de un cuerpo de agua, solo proporcionan información sobre las características presentes en el agua; motivo por el cual no es sencillo establecer patrones que valoren la contaminación, ya que no da los instrumentos necesarios para la localización de problemas en zonas puntuales. Considera que debe establecerse también la variación espacial en la distribución del ICA, debido a que intervienen otros factores como los atmosféricos, meteorológicos, antropológicos y dinámicos mismos del cuerpo de agua.

La mayoría de los cuerpos de agua superficiales en el país presentan descargas de tipo residual, que les ocasiona diversos grados de contaminación. Para determinar la cantidad de agua pura en estos cuerpos, desde 1974 comenzó a operar un monitoreo de la calidad del agua de los cuerpos más importantes y en los que se habían detectado problemas de contaminación, para el año 2000 la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) disponía de una red primaria con 403 estaciones permanentes, 215 ubicadas en cuerpos de agua superficiales, 45 en zonas costeras y 143 en acuíferos; una red secundaria de 244 estaciones semifijas o móviles, 227 localizadas en aguas superficiales y 17 en zonas costeras (CONAGUA, 2010).

De acuerdo con la CONAGUA (2010), a partir de 1995, esta red emplea un sistema de agrupación de parámetros de manera ponderada denominado Índice de Calidad del Agua (ICA), basado en el índice de Montoya (1977) de 18 variables fisicoquímicas: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), oxígeno disuelto, coliformes, fosfatos, pH, sólidos suspendidos, nitratos, grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno, color, turbiedad, nitrógeno amoniacal, cloruros, alcalinidad, coliformes totales, dureza total, conductividad eléctrica, sólidos disueltos y temperatura. Desde el año 2005, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), autoridad del agua en México implementa la valoración de las columnas de aguas superficiales, empleando principalmente tres variables:

Demanda Biológica y Química de Oxígeno, así como los Sólidos Suspendidos Totales, las cuales no dan la certeza de reflejar un valor verídico de la calidad del agua; únicamente en playas se valora la cantidad de bacterias coliformes, debido a la cantidad de parámetros que son excluidos del análisis. La realización de determinaciones fisicoquímicas y biológicas se lleva a cabo en la Red Nacional de Laboratorios, la cual está constituida por 13 laboratorios regionales, 16 estatales y un Laboratorio Nacional de Referencia, ubicado en la Ciudad de México.

La palabra Michoacán tiene dos posibles orígenes, de la voz náhuatl “michihuacán”, que quiere decir, “lugar de pescadores” o de la voz tarasca “Michmacuán”, que significa, “lugar junto al agua” (e-local.gob 2014); en ambos casos es una clara alusión a la disponibilidad de agua sustentada por la presencia de los llamados “lagos Michoacanos”; sin embargo, conforme a Alcocer y Bernal-Brooks (2010), tal disponibilidad no debe considerarse en la actualidad, ya que en general los lagos de México se encuentran sometidos a procesos de desecación vinculados a la disminución en la precipitación que se ha observado en los últimos 8, 500 años de manera natural y a efectos antrópicos en las últimas décadas. Tal proceso de desecación cobra mayor relevancia en términos de concentración de contaminantes, si es asociado al aumento de las descargas de aguas residuales que están ingresando a los cuerpos de agua y al efecto de la tala inmoderada en las cuencas que ha incrementado el ingreso de partículas sólidas a estos ecosistemas.

El presente estudio propone a partir de un análisis histórico de la calidad del agua de los lagos michoacanos, una propuesta para valorar los cuerpos de agua lénticos, ya que en el estado se carece de un modelo regional que oriente a la condición de calidad o degradación en que se encuentran, por lo que estudios en estos cuerpos de agua son evaluados con modelos diseñados para sistemas con características naturales no comparables a los lagos regionales, como lo son los diseñados para la determinación de estado trófico propuestos por Carlson o

Vollenweider, los cuales arrojan resultados ambiguos para aguas de carácter no oligotróficos debido a que los sistemas lénticos michoacanos desde su origen presentan características oligo-mesotróficas, mesotróficas y en algunos eutróficas, casos como lo es el lago de Cuitzeo.

CAPITULO 4. AREA DE ESTUDIO

El estado de Michoacán de Ocampo se encuentra localizado en la región centro occidente de la República Mexicana, colindando al norte con los estados de Querétaro y Guanajuato, al noroeste con Jalisco, al suroeste con Colima, al este con el Estado de México y al sur con el Océano Pacífico representando el 3% de la superficie total del Territorio Nacional (PHI2030EMO, 2009 en Molina, 2011).

Los Lagos Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén, se encuentran localizados en el eje neovolcánico transversal, una franja volcánica localizada al sur de la altiplanicie mexicana y que se extiende a lo largo de México, de este a oeste (Antaramián y Correa, 2003 en: SE-UMSNH, 2003, en CONABIO, 2005).

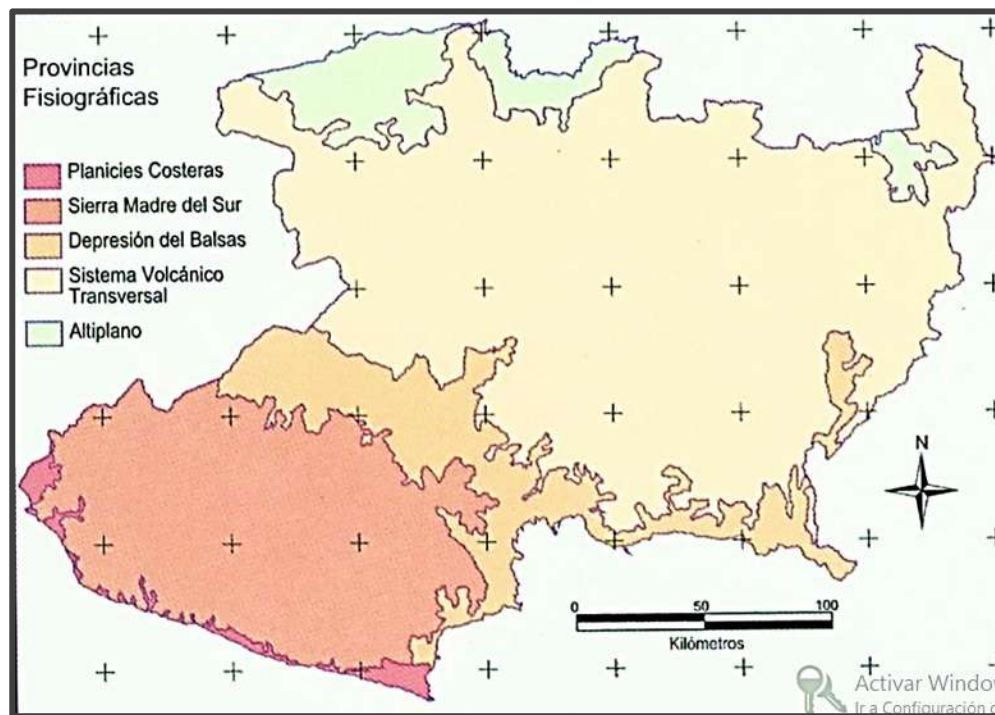


Figura 4. 1 Provincias Fisiográficas del Estado de Michoacán (CONABIO, 2005)

4.1 Cuitzeo

Dentro de los lagos tectónicos se encuentra al noroeste del estado el Lago de Cuitzeo, siendo de los depósitos lacustres más antiguos formados hace aproximadamente 6 y 8 millones de años (Isrrade-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999); comprende parte de los municipios de Huandacareo, Chucándiro, Copándaro de Galeana, Santa Ana Maya, Zinapécuaro y Álvaro Obregón en Michoacán y Acámbaro en Guanajuato se encuentra localizado al sureste del Estado de Guanajuato y al noroeste del Estado de Michoacán. Se ubica entre las coordenadas extremas del sistema de proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) 0256900 E; 2203132 N y 0307561 E y 2202055 N.

Este lago es muy susceptible a la alteración, ya que es un vaso plano y extenso produciéndose una mayor evaporación, se encuentra a una altura de 1980 msnm y un área aproximada de 300 Km², actualmente solo es una parte del gran lago que existió originalmente, se han encontrado evidencias que muestran que la zona fue asentamiento de culturas prehispánicas, la cuenca de Cuitzeo no tiene salida al mar, la ribera sur del lago recibe las aguas de sus principales afluentes: Los ríos grandes de Morelia y Queréndaro, algunos manantiales pequeños como Huandacareo, Copándaro, Santa Rita, San Juan Tararamero, Araró y las islas de las Palmas y los Puercos. Actualmente Cuitzeo posee un efluente conocido como el Dren La Cinta, que tenía inicialmente la función de desfogar los excedentes para mantener de forma artificial el nivel del lago, evitando las inundaciones en las zonas de cultivo aguas abajo. El deslave y transporte de lodos (ocasionado por la erosión), provenientes desde las partes altas de la cuenca hacia las riberas del lago, en combinación con los sedimentos y terrígenos transportados por los afluentes, forman parte del proceso de azolve del vaso lacustre, perdiendo profundidad y capacidad de almacenamiento de agua, cuando esta es almacenada en tres porciones: este, central y oeste, existe una corriente que parte del este hacia el oeste, generando significativos efectos en la

dinámica del agua, reducción de materiales en suspensión y en la dispersión de contaminantes, debido a que actualmente el vaso oeste recibe el agua del este por un ducto ubicado en la carretera sin la posibilidad de exportar volúmenes, careciendo de efluentes e influentes de agua limpia proveniente de ríos o arroyos, la cubeta lacustre ha virado a ser una cuenca de evaporación con periodos de desecación total que cada vez se tornan más frecuentes, con la incesante acumulación de sales, sedimentos, materia orgánica y contaminantes. Debido a la poca profundidad y los vientos reinantes los sólidos y lodos depositados inicialmente en el fondo ascienden distribuyéndose en toda la columna de agua, incrementando la turbidez, disminuyendo la capacidad de las plantas para producir alimento y oxígeno para el resto de los organismos acuáticos habitantes del lago. Cuitzeo se clasifica con respecto a otros, como un lago polimíctico ya que existe una circulación del agua, que permite un mezclado de superficie a fondo durante todo el año. Las características de este cuerpo de agua lo catalogan como un lago eutrófico con periodos en los que debido a factores como el enriquecimiento de nutrimentos, la aparición de especies nocivas, la disminución de oxígeno y los periodos de desecación lo han llegado a pasar por un lago con características Hipereutróficas (De la Lanza y Hernández, 2007).

4.2 Lago de Pátzcuaro

Dentro de los lagos más importantes desde el punto de vista social, económico y pesquero está el lago de Pátzcuaro de origen vulcano-tectónico, el cual se encuentra situado en la parte sur del Altiplanicie Mexicana a 360 km al noroeste de la Ciudad de México, con coordenada de proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM): 245000E, 2185000N máxima y 197000E, 2140000N; en el centro-norte del estado de Michoacán, la hidrología de la cuenca depende de las precipitaciones, la evaporación, el escurrimiento superficial, los manantiales del borde sur y del interior del lago y extracciones. Dentro de las corrientes superficiales que alimentan al lago se encuentran los

arroyos de Chapultepec (Tzurumútar), Santa Fe, Quiroga, Ajuno y Huintzio (San Francisco Uricho). De acuerdo con Gómez-Tagle-Rojas, 1997 la profundidad del lago ha disminuido debido a su evolución natural a través del tiempo, sin embargo en los últimos 75 años esta reducción se ha visto acentuada por las acciones antrópicas en la cuenca como lo son la deforestación, ocasionando un aporte considerable de azolves al lago, provocando la pérdida de profundidad y la capacidad de almacenamiento de agua debido a la acumulación, la parte sur del lago es región que más aportes de sólidos percibe, siendo este el motivo por el cual en algunas zonas como Tzurumútar y Erongarícuaro el espejo de agua ha desaparecido, la profundidad máxima del lago se localiza en la parte norte. El lago se encuentra catalogado en los últimos años como embalse mesotrófico, siendo que inicialmente era considerado oligotrófico de aguas claras y limpias, debido a la evolución natural del agua y las acciones antrópicas. La circulación continua del agua a lo largo del año es continua debido a que las variaciones de temperatura del lago varían entre los 18 y 20°C , siendo homogénea desde la superficie al fondo, lo cual permite clasificarlo como un lago polimíctico cálido templado. El lago es receptor de sedimentos, aguas residuales, fertilizantes y detergentes los cuales al irse acumulando fomentan el deterioro del cuerpo de agua, así como de la calidad de sus aguas.

4.3 Lago de Zirahuén

El lago de Zirahuén forma parte de la región hidrológica del río Balsas (Bernal-Brooks, 1998), localizado en la parte central del estado de Michoacán, sobre el Cinturón Volcánico Transmexicano, rodeado por numerosos conos cineríticos y de lava, pertenece al municipio de Salvador Escalante, limitado por las coordenadas UTM 214460-2153500 UTM y mínima 210000-2149600 UTM (Antaramian-Ortega, 1996; Chacón y Rosas, 1998; Bernal, 2002; Ruiz, 2002). Presenta a diferencia de los lagos tectónicos, pendientes abruptas, alcanzando una profundidad máxima de 42 metros. Cuenta con una superficie de 10 km² y

capta escurrimientos superficiales en un área de 260 km², la cuenca hidrológica presenta áreas agropecuarias, bosques y asentamientos humanos. El suministro de recurso hídrico para abastecimiento y actividades productivas es cubierto principalmente por agua de manantiales o pozos y en menor grado directamente del cuerpo de agua. Los desechos son canalizados mayormente al Arroyo de la Palma que conduce al lago. El lago de Zirahuén presenta un período de mezcla el cual se presenta entre los meses de temperaturas menores (Diciembre-Marzo) , entre los meses de Abril y Octubre se da el período de estratificación térmica el cual divide al cuerpo de agua en dos partes: epilimnion e hipolimnion con una diferencia máxima de temperatura de 5°C, en esta etapa el oxígeno del fondo se consume gradualmente, debido a la oxidación de la materia orgánica procedente de la superficie y el aislamiento de las capas profundas del agua con la atmósfera, cerca del mes de Octubre la disminución de oxígeno en el fondo del lago alcanza una condición anóxica, el oxígeno se renueva al final del año en el período de mezcla. Debido a esto el lago de Zirahuén es clasificado como monomítico. Se encuentra clasificado como oligo-mesotrófico de aguas claras. Las condiciones de la superficie catalogan a Zirahuén como un sistema oligotrófico, mientras que las aguas del fondo muestran características de un sistema eutrófico (De La Lanza y García, 2002).

4.2 Ubicación de los sitios

Los sitios con los que se cuenta información se describen en el cuadro y pueden observarse en la figura, se cuenta con siete sitios para el lago de Pátzcuaro, ocho para el lago de Cuitzeo y un solo punto para el lago de Zirahuén.

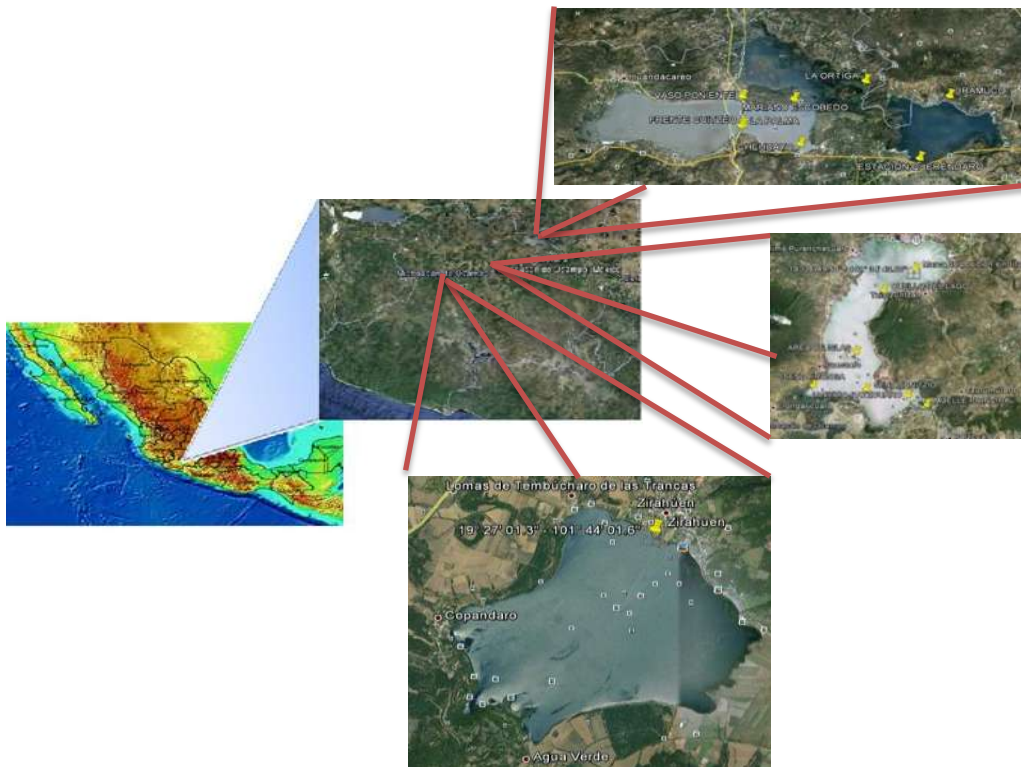


Figura 4. 2 Descripción Visual de los Sitios con contenido de información fisicoquímica.

Cuadro 4. 1 Locañlización de los Sitios con contenido de información fisicoquímica

LAGO	SITIO	LONGITUD Y LATITUD	ALTITUD msnm
PÁTZCUARO	AREA DE ISLAS	19°36'08.40'' N y 101°38'51.20'' O	2036
	CUELLO DEL LAGO	19°38'23.30'' N y 101°36'29.30'' O	2036
	JANITZIO-PATZCUARO	19°33'21.30'' N y 101°37'36.90'' O	2036
	MUELLE PRINCIPAL	19°32'37.80'' N y 101°37'01.60'' O	2036
	SENO ERONGA	19°35'23.60'' N y 101°41'19.30'' O	2036
	SENO JANITZIO	19°34'19.70'' N y 101°39'12.20'' O	2036
	SENO QUIROGA	19°38'49.50'' N y 101°34'43.60'' O	2036
CUITZEO	CHEHUAYO	19°53'57.00'' N y 101°34'30.00'' O	1836
	ESTACIÓN QUERÉNDARO	19°52'57.40'' N y 101°56'22.60'' O	1836
	FRENTE CUITZEO	19°55'29.00'' N y 101°08'23.00'' O	1836
	IRAMUCO	19°57'41.00'' N y 100°54'20.00'' O	1836
	LA ORTIGA	19°58'49.00'' N y 101°00'04.00'' O	1836
	LA PALMA	19°55'25.00'' N y 101°08'33.00'' O	1836
	MARIANO ESCOBEDO	19°57'39.00'' N y 101°04'56.00'' O	1836
ZIRAHUÉN	VASO PONIENTE	19°57'39.00'' N y 101°08'27.00'' O	1836
	LAGO ZIRAHUEN	19° 27' 01.3'' N y 101° 44' 01.6'' O	2084

CAPITULO 5. METODOLOGÍA

5.1 Análisis descriptivo

Los datos fisicoquímicos y bacteriológicos de los tres principales lagos Michoacanos: Pátzcuaro, Cuitzeo y Zirahuén fueron proporcionados por la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua (RENAMECA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), determinados, desde el muestreo hasta el análisis, de acuerdo a las metodologías establecidas por la normatividad mexicana (Cuadro 5.1), con lo que cabe señalar la confiabilidad de los datos, se proporcionaron los valores fisicoquímicos y bacteriológicos para 16 sitios de muestreo de los cuales corresponden: uno al lago de Cuitzeo, siete al lago de Pátzcuaro y ocho al lago Zirahuén, este último presenta muestreos generados a partir del año 1999 y Pátzcuaro y Cuitzeo posteriores al 2001; generando en su totalidad 604 muestreos.

Cuadro 5. 1 Normas Mexicanas para la toma, preservación y análisis de muestras de agua.

Parámetro	Norma Mexicana
Muestreo	NMX-AA-003-1980
Sólidos Sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000
Grasas y Aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000
Ph	NMX-AA-008-SCFI-2000
Oxígeno Disuelto	NMX-AA-012-SCFI-2001
Nitrógeno Kjendal	NMX-AA-026-SCFI-2001
Demanda Bioquímica de Oxígeno	NMX-AA-028-SCFI-2001
Fósforo Total	NMX-AA-029-SCFI-2001
Demanda Química de Oxígeno	NMX-AA-030-SCFI-2001
Sólidos y Sales Disueltas	NMX-AA-034-SCFI-2001

Cuadro 5.1 (continuación) Normas Mexicanas para la toma, preservación y análisis de muestras de agua.

Parámetro	Norma Mexicana
Acidez y Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001
Turbiedad	NMX-AA-038-SCFI-2001
Sustancias Activas al Azul de Metilo	NMX-AA-039-SCFI-2001
Coliformes Totales y Fecales	NMX-AA-042-1987
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001
Dureza Total	NMX-AA-072-SCFI-2001
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfato	NMX-AA-074-1981
Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000
Nitritos	NMX-AA-099-1987

Se verificó la cuantificación de los datos para determinar si la cantidad de datos perdidos era estadísticamente aceptable y poder así realizar la complementación de los datos faltantes (Medina y Galván, 2007). Esta cuantificación de datos perdidos se realizó en primera instancia para la matriz general y posteriormente para cada una de las clases o subgrupos, conformados a partir de criterios que resolvieran con base en la lógica de variación propia de la naturaleza; estos son: cada uno de los lagos por separado, épocas y estaciones del año.

Con las matrices generadas a partir de la clasificación hecha, con el paquete estadístico JMP v. 10 (SAS Institute 2008), se realizaron análisis de varianza de una sola vía (ANOVA) y la prueba de Tukey-Kramer, para variables de distribución normal y pruebas no paramétricas (Wilcoxon/Kruskal-Wallis) para las que mostraron una distribución diferente a la normal.

Ecuación 5.1 Comparación de Medias Pareadas:

$$|t| = \frac{|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j|}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} > q^* \quad H_a: \mu_i \neq \mu_j \quad Vs \quad H_0: \mu_i = \mu_j \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde:

Ho = Hipótesis nula, supuesto de que todas las medias son iguales

Ha = Hipótesis alternativa, supuesto de que al menos una media no es igual.

n= Tamaño de la muestra

s_p= Raíz del cuadrado medio del error

Y=Media maestra

Se realizó la identificación de patrones de omisión de datos en la matriz general (Medina y Galván, 2007) determinando la cantidad de información que podría perderse y la cantidad de imputaciones requeridas para cada caso, en todos los procedimientos se consideró el nivel de significancia $P < 0.05$ (Walpole y Myers, 1992). Se realizó la identificación de las variables que presentan datos perdidos en que cantidad porcentual y se agruparon por categorías en función de la información contenida para cada una de ellas. El primer criterio para decidir sobre imputación es a partir del reconocimiento de información faltante, de este modo si es menor al 20% se acepta un método simple (Useche y Meza, 2006).

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de estadística básica para cada una de las variables, determinando también las distribuciones que presentan las variables con problemas de datos faltantes (Walpole y Myers, 1992), esto se realizó de igual forma a los valores de la Matriz General y a cada uno de Los lagos

Michoacanos y en sitios con datos mayores a 30 mediciones (Barlow, 1989), para poder realizar comparaciones y observar las variantes en los intervalos de cada parámetro y la variación entre un lago y otro y entre sus sitios y estos en conjunto.

5.2 Imputación de Datos Perdidos

Una vez detectadas las omisiones fue necesario realizar técnicas de imputación, simple y múltiple. Los análisis y pruebas estadísticas que se hicieron sobre las matrices generadas para lograr una matriz única imputada, fueron hechos con el paquete estadístico JMP v.8 (SAS Institute 2008). Los procedimientos se realizaron conforme a lo que a continuación se describe.

Se eliminaron las variables que contaban con menos del 5% de los datos ya que el criterio de nivel de confianza de 5% las deja fuera de su análisis y es imposible predecir una probabilidad tan alta (Barlow, 1989). Variables entre 5 y 35% de los datos es imposible trabajar en conjunto con las demás por lo que por el momento se dejan fuera del análisis, las concentradas entre el 65 y 80% pueden ser imputadas con mayor precisión por un método de imputación múltiple, para estas variables se determinó su función de distribución y se imputaron inicialmente con un método simple cuidando las medidas de tendencia de distribución de la función.

Para las variables concentradas entre el 80 y 95% de los datos, debido a que permiten un método simple, se imputaron con la media y la desviación estándar de la variable tomando en cuenta el tipo de función de distribución y los criterios de estación y época del año para el caso de distribuciones normales, siendo este el criterio para considerar, si la desviación estándar se suma o resta a la media. Las variables que no presentan distribución normal dependiendo del tipo de distribución que presenten les corresponderá una media y una desviación estándar como lo es para el caso de la “distribución gamma” en la cual la media y

la varianza de acuerdo con (Walpole y Myers, 1992) son calculadas de la siguiente manera:

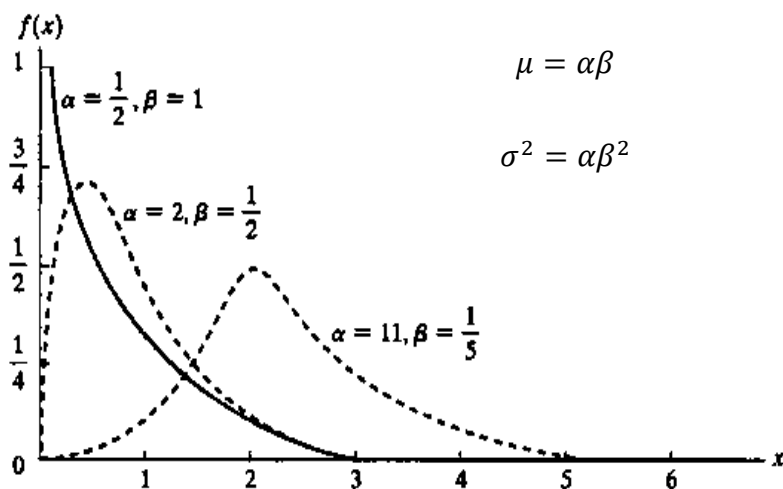


Figura 5. 1 Función de distribución de la variable

Para decidir sobre el método de imputación de datos, se utilizaron los siguientes criterios:

Criterio 1. Cantidad de datos disponibles para cada variable:

Más del 30% imposible de imputar, por deficiencia en la confiabilidad de los datos, ya que se tendería a la reducción de la variabilidad natural.

Entre el 30 y 20% se implementó un método múltiple

Entre el 20 y el 5% se aplicó un método simple de medias condicionadas

Para imputaciones menores al 5% se trataron con la media debido al nivel de confianza

Criterio 2. Estación del año

La diferencia de medias es estadísticamente significativa

La diferencia de medias no es estadísticamente significativa

Criterio 3. Temporada del año. Para cada variable puede ser de dilución o de concentración.

En la dilución se resta la desviación estándar a la media

En la concentración se suma la desviación estándar a la media

5.3 Selección preliminar de las Variables

La selección de las variables se llevó a cabo, mediante una serie de criterios:

- a) Disponibilidad de los datos
- b) Importancia en el cuerpo de agua
- c) Análisis de correlaciones
- d) Análisis de redundancia.

Una vez generada la matriz completa, la reducción y selección de las variables se realizó con base en un análisis de redundancia, empleando el nivel de covariación a partir de la correlación de Spearman (Ecuación 5. 2), así como un Análisis de Componentes Principales (ACP), con la finalidad de reducir la dimensión del modelo inicial, mediante transformaciones ortogonales a partir de las variables originales. En los resultados arrojados se tomó en consideración la importancia de cada variable fisicoquímica en el cuerpo de agua y la relación teórica esperada con las demás variables.

Correlación de Spearman

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{(N - 1)S_x S_y} \quad Ec. 5.2$$

Los análisis y pruebas estadísticas realizados sobre las matrices generadas para lograr una matriz única imputada y la reducción preliminar de variables, fueron hechos con el paquete estadístico JMP v.8 (SAS Institute 2008).

Diseño del modelo de valoración de calidad del agua para ecosistemas lenticos michoacanos.

De acuerdo con Schunchy y Soto (2009), las variables seleccionadas como candidatas a formar parte del modelo de valoración o bien que indicasen calidad pueden estar expresadas en unidades de medida diversas, motivo por el cual resulta necesario la “Normalización” de las variables para así pertenecer a un mismo intervalo y de esta manera puedan ser comparables entre sí, una vez normalizadas las variables es indispensable determinar para cada una un factor de ponderación y finalizar con la agregación del indicador de cada variable en una fórmula simple. Para lo cual se siguió la siguiente metodología.

5.4 Normalización de las Variables

Asignación de unidades para cada parámetro

Antes de trabajar las variables a normalizar es necesario definir las unidades en las cuales deben estar los parámetros para poder ser evaluados por el modelo.

Identificación de datos aberrantes (Outliers)

En la determinación de los outliers multivariados se empleó la distancia de Mahalanobis, considerando como puntos exploratorios los que excedían en 12 unidades del centro de masa.

Una vez determinados los puntos multivariados que presentaban mayor valor en la distancia de Mahalanobis, se verificó a cuales variables se debía la distancia arrojada, los puntos considerados outliers multivariados fueron eliminados de la matriz; cuando los puntos solo generan ruido a una variable son considerados outliers univariados, los cuales se detectaron mediante el histograma de frecuencias de cada variable.

Análisis de relación entre variables

Una vez eliminados los outliers, con la finalidad de reducir variables, dejando las que explican la mayor parte de la variabilidad total observada con el menor número de componentes posibles se realiza un análisis de componentes principales (ACP), esto mediante la transformación del conjunto de variables originales correlacionadas entre sí, en un conjunto de variables no correlacionadas, llamadas factores o componentes principales, relacionados con las primeras mediante una transformación lineal, ordenadas de acuerdo al porcentaje de variabilidad total que explican (Schunchy y Soto 2009).

Comparación de medias pareadas y estadística básica a variables conservadas

A las variables arrojadas del Análisis de Componentes Principales se aplicará a cada una un análisis de estadística básica y un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA), la prueba de Tukey-Kramer, para variables de distribución normal y pruebas no paramétricas (Wilcoxon/Kruskal-Wallis) para las que

mostraron una distribución diferente a la normal, teniendo como propósito observar que variables tienden a formar grupos y permitan clasificar a los sitios.

Categorización por definición de escalas

La categorización o definición de escalas consiste en asignar a cada categoría un intervalo de valores dentro del cual ésta es válida, comúnmente estos intervalos se encuentran fijados por medidas de localización como lo son los deciles, cuantíes y los percentiles, de los cuales los primeros, serán empleados en esta parte del estudio. Una vez establecidos los intervalos de cada variable se generan los gráficos para cada parámetro, para respetar la mayor y tomando en consideración que de manera general cada lago presenta una calidad diferente. Se realizará la categorización por lago, con percentiles de cinco en cinco, generando a partir del conjunto de estos percentiles una categorización única por variable, esto reduce la pérdida de información relevante. Con el paquete gráfico Origin 8 se analizaron las variables de acuerdo a su categoría vs concentración, observando que se siguiera la misma tendencia de los datos, se obtuvo el mejor ajuste al comportamiento de los datos generando un gráfico y una ecuación, tomando como criterio para la aceptación de la ecuación que el valor del coeficiente de correlación sea cercano a uno.

5.5 Ponderación y Agregación de los Sub-Índices

Una vez normalizados los datos y generadas las curvas y ecuaciones de comportamiento para cada variable, los datos son evaluados con la ecuación predicha para cada parámetro con la finalidad de proponer el método y modelo, de ponderación y agregación que mejor defina la calidad de los cuerpos de agua de la región. Un estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia en el Área de Ingeniería e Investigaciones, por Samboni *et al.*, (2007), presenta una revisión del diseño e interpretación de los indicadores de calidad del agua y de contaminación empleados en América y Europa, en éste se hace notar que el

índice de calidad del agua queda determinado por la integración de los subíndices mediante de la fórmula de agregación matemática; señalando como más usuales las presentadas en el cuadro 5.2.

Cuadro 5. 2 Fórmulas de agregación

Método	Fórmula
Promedio ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i$
Promedio aritmético ponderado	$ICA = \sum_{i=1}^n q_i w_i$
Promedio geométrico no ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{1/n}$
Promedio geométrico ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n q_i \right)^{w_i}$
Subíndice mínimo	$ICA = \min(q_1, q_2, \dots, q_n)$
Subíndice máximo	$ICA = \max(q_1, q_2, \dots, q_n)$
Promedio no ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right)^2$
Promedio ponderado modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\sum_{i=1}^n q_i w_i \right)^2$

Fuente: Van Helmond y Breukel, 1997 en Samboni et al., 2007

Para establecer la ponderación de los parámetros se llevaron a cabo análisis de componentes principales para la matriz general y sub-matrices, con la finalidad de establecer las variables que representan mayor variación en el modelo y el papel juegan en cada sub-matriz, a la par fue necesario revisar las correlaciones presentes entre las variables. Una vez determinadas las variables y

teniendo presente la importancia y relación de estas con el cuerpo de agua, se realizó la propuesta de ponderación utilizando los pesos de los eigenvectores arrojados por el análisis de componentes principales.

Se empleó como método de agregación al promedio ponderado, este consiste en dividir la sumatoria obtenida de los sub-indicadores ponderados, entre los factores de ponderación.

5.6 Validación del Índice de Calidad del Agua.

La principal función del índice de calidad es orientar sobre la condición del sistema en cuestión, asignar intervalos de comparación o categorías facilita este objetivo, por ello en el presente estudio se realizó una primera clasificación *a priori* de los sitios en estudio asignando cinco categorías, las cuales se generaron observando las imágenes y haciendo comparaciones con análisis anteriores esperando comportamientos de calidad similares. Se evaluaron los datos usando como herramienta de agrupación el análisis de discriminantes, tomando de variables independientes a los parámetros y como dependiente las categorías *a priori* (Schunchy y Soto 2009).

Se llevaron a cabo análisis de distribución de Ys para el IFCA y las medias por sitio, con los percentiles 0, 10, 25, 50, 75 y 100, se generaron seis intervalos de calidad, asignando a cada intervalo una categoría, la clasificación I está referida a la calidad más alta, y a las condiciones de menor calidad se asignó la clasificación VI, se clasificaron los sitios de acuerdo con la media aritmética por sitio del IFCA para aplicar análisis de discriminantes y ver la capacidad de agrupación, los datos mal clasificados fueron analizados para obtener la clasificación general de los sitios, cumpliendo con el criterio de confianza menor al 30% de los datos mal agrupados por sitio y de forma general. Los análisis fueron realizados con el paquete estadístico JMP v.8 (SAS Institute 2008).

CAPITULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Análisis descriptivo de los datos

Con base en los métodos aplicados en este proyecto se tienen los siguientes resultados. En el cuadro 6.1 presenta de manera concentrada la cantidad de datos contenidos en la matriz original, y las sub-matrices generadas para los Lagos michoacanos, en ella también se puede observar el número de variables determinadas por la Comisión Nacional del Agua, el número de sitios, los años de muestreo, el número de total de muestreos, los datos por imputar para cada matriz de forma completa, se observa que los datos faltantes totales son menores al 20% lo que permite aplicar un método de análisis de datos simple (Useche y Mesa, 2006) y el porcentaje de imputaciones para cada matriz, el cual de acuerdo con Medina y Galvan, 2007 es recomendable no imputar más del 25% de la matriz.

Se observa en el cuadro 6.1 que existe una ausencia de respuesta en muestreos para los años 1999 y 2000 de los Lagos de Pátzcuaro y Cuitzeo, generando un patrón de omisión de datos univariado en la matriz general. El número de muestreos para cada uno de los lagos no es equitativo al igual que el número de sitios muestreados.

Cuadro 6. 1 Cuantificación de datos perdidos para valoración de métodos de análisis de datos perdidos

	Matriz General	Matriz L. Pátzcuaro	Matriz L. Cuitzeo	Matriz L. Zirahuén
Variables	36	36	36	36
Sitios	16	7	8	1
Inicio de Muestreos		2001	2001	1999
Muestreos	604	238	312	54
Datos Faltantes	3945	1486	2041	418
% Datos Faltantes	18.14%	17.35%	18.17%	21.50%

En el Cuadro 6.2, se puede notar que para Zirahuén la pérdida de información es significativa pero el número de imputaciones es alto, esto se debe a que solo se tiene información para un sitio de muestreo, motivo por el cual el conjunto de datos es pequeño y eliminar información en este subconjunto es significativo. Por lo que es necesario aplicar un análisis de datos faltantes al Lago de Zirahuén de forma independiente, en caso contrario se incrementa el sesgo y se verá afectada la variabilidad propia de los datos.

Cuadro 6. 2 Patrón de Omisión de Datos Univariado Para el caso del Lago de Zirahuén

Año de muestreo	1999	2000
No Muestreos	2	5
No Datos	48	120
No imputaciones	24	60
% Información	3.70%	9.25%
% Imputación	33.30%	33.33%

De tal forma que las variables: Ortofosfatos, Nitrógeno Total y Nitrógeno Orgánico presentan un tipo de patrón con parámetros no identificados, ya que la omisión de datos para estas variables no responde a un periodo específico, lo mismo sucede pero en menor intensidad para las variables: Nitratos y Grasas y Aceites. Las variables restantes presentan baja cantidad porcentual de datos faltantes y estas un patrón de omisión aleatorio ya que los datos faltantes presentan un patrón de datos completamente al azar.

En el Cuadro 6.3, se describe en que cantidades porcentuales se encuentran los datos, clasificándolos de acuerdo al contenido de información para cada variable tomando como referencia inicial el nivel de significancia especificado para este estudio. Se observa que SAAM, Nitritos y pH de campo son variables que se encuentran fuera del límite de confianza asignado por lo que no fueron imputadas ni tomadas en consideración para los análisis posteriores. De igual

forma se observa el comportamiento de las imputaciones para cada variable y en cada uno de los cuerpos de agua, y que variable es la que contribuye a la matriz general la mayor cantidad de información. Puede apreciarse que, en los grupos de datos correspondientes a los intervalos del 5 a 20% y 20 a 35% se encuentran las variables: Ortofosfatos, Nitrógeno Orgánico y Nitrógeno Total; las cuales no fueron imputadas, ya que no hay método que permita predecir un comportamiento de los datos mayor al 50%.

El grupo de 65 a 80% de datos concentra Grasas y Aceites y Nitratos, de acuerdo con Medina y Galván (2007) estas variables pueden ser imputadas pero es necesario cuidar: la distribución de las variables, la varianza, la covarianza, los cuantiles, la curtosis y el sesgo. Dado que imputar datos en esa cantidad aumenta el error, es necesario plantear un límite de variación en cada una de las medidas de tendencia de la función de distribución de las variables (Barlow, 1989).

En el cuadro 6.4, se describe el comportamiento de la variable en cuanto a la media, desviación estándar e intervalo de fluctuación.

Cuadro 6. 3 Agrupación de variables por clases porcentuales de datos para Matriz General, y por cada Lago.

% de información	Matriz General			Matriz Pátzcuaro			Matriz Cuitzeo			Matriz Zirahuén		
	Variable	No. Datos	% Datos	Variable	No. Datos	% Datos	Variable	No. Datos	% Datos	Variable	No. Datos	% Datos
0-5%	cond_elec-cam	21	3.48	SAAM	0	0	cond_elec-cam	0	0	cond_elec-cam	0	0
	SAAM	0	0	N-NO2	0	0	SAAM	0	0	SAAM	0	0
	N-NO2	1	1.6				N-NO2	0	0	N-NO2	1	0.18
5-20%	PO4=	101	16.72	cond_elec-cam	21	8.2	PO4=	44	14.1	PO4=	8	14.8
										N-Org	10	18.52
										NTK	10	18.52
20-35%	N-Org	156	25.82	PO4=	49	20.58	N-Org	71	22.75			
	NTK	155	25.66	N-Org	75	31.51	NTK	71	22.75			
				NTK	74	31.09						
35-50%												
50-65%										tem_amb	35	64
65-80%	G y A	436	72.18	G y A	175	73.52	G y A	219	70.19	G y A	42	77.78
										Alcal_ Fenol	39	72.22
	N-NO3	447	74	N-NO3	169	71	N-NO3	241	77.24	N-NO3	38	70.37
80-95%	tem_amb	562	93.04	tem_agua	226	94.95				tem_agua	50	92.59
	pH_camp	533	88.24	tem_amb	226	94.95						
	Turbiedad	562	93.04	pH_camp	208	87.39	pH_camp	275	87.14	pH_camp	50	92.59
	Color	560	92.71				Turbiedad	287	91.98			
	N-NH3	515	85.26	N-NH3	205	86.13	Color	285	91.34			
				SO4=	217	91.17	N-NH3	272	87.17			
	Coli_Fecales	558	92.38	Coli_Fecales	223	93.69	Coli_Fecales	288	92.3	Coli_Fecales	47	87

Cuadro 6.3 (Continuación) Agrupación de variables por clases porcentuales de datos para Matriz General, y por cada Lago.

95-100%	tem_agua	579	95.86			tem_agua	303	97.12				
						tem_amb	301	96.47				
	O.D.	604	100	O.D.	238	100	O.D.	312	100	O.D.	54	100
	pH_lab	604	100	pH_lab	238	100	pH_lab	312	100	pH_lab	54	100
	cond_elec_lab	604	100	cond_elec_lab	238	100	cond_elec_lab	312	100	cond_elec_lab	54	100
				Turbiedad	231	97.06						
				Color	231	97.06						
	S.T.	602	99.66	S.T.	238	100	S.T.	312	100	S.T.	52	96.3
	S.S.T.	602	99.66	S.S.T.	238	100	S.S.T.	312	100	S.S.T.	52	96.3
	S.D.T.	602	99.66	S.D.T.	238	100	S.D.T.	312	100	S.D.T.	52	96.3
	S. Sed.	590	97.68	S. Sed.	231	97.06	S. Sed.	305	97.7	S. Sed.	54	100
	DBO ₅	604	100	DBO ₅	238	100	DBO ₅	312	100	DBO ₅	54	100
	DQO	604	100	DQO	238	100	DQO	312	100	DQO	54	100
	Dza Tot	604	100	Dza Tot	238	100	Dza Tot	312	100	Dza Tot	54	100
	Dza Ca	604	100	Dza Ca	238	100	Dza Ca	312	100	Dza Ca	54	100
	Dza Mg	603	99.83	Dza Mg	237	99.58	Dza Mg	312	100	Dza Mg	54	100
	Alcal_ Total	604	100	Alcal_ Total	238	100	Alcal_ Total	312	100	Alcal_ Total	54	100
	Alcal_ Fenol	589	97.51	Alcal_ Fenol	238	100	Alcal_ Fenol	312	100			
	SO ₄ ⁼	575	95.19				SO ₄ ⁼	306	98	SO ₄ ⁼	52	96.3
	Cl ⁻	599	99.17	Cl ⁻	238	100	Cl ⁻	307	98.4	Cl ⁻	54	100
	CO ₃ ⁼	604	100	CO ₃ ⁼	238	100	CO ₃ ⁼	312	100	CO ₃ ⁼	54	100
	HCO ₃ ⁻	604	100	HCO ₃ ⁻	238	100	HCO ₃ ⁻	312	100	HCO ₃ ⁻	54	100
	Ca ⁺⁺	604	100	Ca ⁺⁺	238	100	Ca ⁺⁺	312	100	Ca ⁺⁺	54	100
	Mg ⁺⁺	604	100	Mg ⁺⁺	238	100	Mg ⁺⁺	312	100	Mg ⁺⁺	54	100
	Na ⁺	603	99.83	Na ⁺	238	100	Na ⁺	312	100	Na ⁺	53	98.15

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 4 Estadística Básica comparativa para cada variable

	MIN	MAX	X	DESVEST		MIN	MAX	X	DESVEST
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES					SULFATOS				
GENERAL	0	2848	157.5	264.71	GENERAL	1.7	1671	95.25	142.54
ZIRAHUEN	0	54	11.74	12.471	ZIRAHUEN	1.696	106.3	7.18	14.28
PATZCUARO	8	248	58.89	36.206	PATZCUARO	3.88	91.3	24.30	12.09
CUITZEO	4	2848	257.03	336.83	CUITZEO	4.91	1671	160.53	170.06
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES					CLORUROS				
GENERAL	2	8090	999.98	957.63	GENERAL	0.91	1511	134.35	179.84
ZIRAHUEN	2	136	70.51	24.34	ZIRAHUEN	0.91	9.49	4.75	2.07
PATZCUARO	163	790	612.90	120.66	PATZCUARO	3.63	211	41.63	16.83
CUITZEO	196	8090	1450.17	1139.54	CUITZEO	17	1511	229.02	210.58
SOLIDOS SEDIMENTABLES					CARBONATOS				
GENERAL	0	23	0.4034	1.605	GENERAL	0	1520	128.27	173.70
ZIRAHUEN	0	0.2	0.0222	0.050	ZIRAHUEN	0	48.92	6.46	8.59
PATZCUARO	0	0.8	0.0675	0.101	PATZCUARO	0	220	76.88	37.11
CUITZEO	0	23	0.7252	2.184	CUITZEO	0	1520	188.56	221.80
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO					BICARBONATOS				
GENERAL	0	360	33.09	38.95	GENERAL	28.73	1650	389.54	220.26
ZIRAHUEN	0	10.8	2.12	2.66	ZIRAHUEN	33.68	72.45	54.33	8.54
PATZCUARO	4	91	16.72	7.52	PATZCUARO	88.38	722	368.22	79.12
CUITZEO	5.8	360	50.93	46.97	CUITZEO	28.73	1650	463.82	252.75
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO					ION CALCIO				
GENERAL	0	568.6	53.43	62.45	GENERAL	0.8	210.4	24.02	17.39
ZIRAHUEN	0	15.78	3.76	4.32	ZIRAHUEN	6.44	19.2	11.11	2.72
PATZCUARO	8	51	26.79	9.11	PATZCUARO	4	67.11	23.19	9.35
CUITZEO	10.3	568.6	82.35	75.39	CUITZEO	0.8	210.4	26.90	21.93
GRASAS Y ACEITES					ION MAGNESIO				
GENERAL	0	48.86	6.46	6.01	GENERAL	0.49	181.4	21.68	15.87
ZIRAHUEN	0	18.22	4.04	4.13	ZIRAHUEN	1.795	25.49	6.55	3.98
PATZCUARO	0	44	5.42	5.12	PATZCUARO	8.728	85.45	31.12	8.21
CUITZEO	0	48.86	7.76	6.65	CUITZEO	0.486	181.4	17.09	17.47
DUREZA TOTAL					ION SODIO				
GENERAL	4.02	878	148.20	92.84	GENERAL	0	2235	282.03	310.69
ZIRAHUEN	31.35	130.2	52.04	15.13	ZIRAHUEN	0	62.34	7.82	8.74
PATZCUARO	82	400	185.04	39.69	PATZCUARO	5.405	224.9	134.57	40.42
CUITZEO	4.02	878	136.74	112.68	CUITZEO	33.55	2235	441.10	361.59
					COLIFORMES TOTALES				
					GENERAL	0	6400	194.14	433.38
					ZIRAHUEN	0	450	74.62	110.92
					PATZCUARO	0	1970	112.82	263.82
					CUITZEO	0	6400	276.60	542.59

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 4 (Continuación) Estadística Básica comparativa para cada variable.

	MIN	MAX	X	DESVEST		MIN	MAX	X	DESVEST
TEMPERATURA					NITROGENO TOTAL				
GENERAL	0	0	0	0	GENERAL	0	11.65	1.20	1.48
ZIRAHUEN	0.056	0.056	0.056	0.056	ZIRAHUEN	0.056	1.064	0.42	0.37
PATZCUARO	0	0	0	0	PATZCUARO	0	4.2	0.76	0.64
CUITZEO	0	0	0	0	CUITZEO	0	11.65	1.78	1.94
pH DE CAMPO					DUREZA MAGNESIO				
GENERAL	5	10	8.53	0.66	GENERAL	2.01	756	88.327	64.68
ZIRAHUEN	7	9	7.77	0.52	ZIRAHUEN	7.112	105	24.695	14.469
PATZCUARO	6	9	8.45	0.63	PATZCUARO	36	352	127.46	31.766
CUITZEO	5	10	8.74	0.60	CUITZEO	2.01	756	69.612	71.237
OXIGENO DISUELTO					ALCALINIDAD TOTAL				
GENERAL	10	16	7.30	2.29	GENERAL	45	2604	515.35	350.32
ZIRAHUEN	5.6	9.4	7.17	0.72	ZIRAHUEN	45	74.55	59.552	5.5838
PATZCUARO	3	10.8	6.28	1.05	PATZCUARO	109.9	798	446.29	96.413
CUITZEO	0.1	16	8.10	2.79	CUITZEO	94.3	2604	646.93	416.86
pH DE LABORATORIO					ALCALINIDAD AL FENOL				
GENERAL	7	10.23	8.80	0.55	GENERAL	0	760.4	69.23	98.10
ZIRAHUEN	7	8.9	8.02	0.42	ZIRAHUEN	0	13.86	3.24	3.36
PATZCUARO	7.42	9.4	8.73	0.34	PATZCUARO	0	110	38.23	18.66
CUITZEO	7.2	10.23	8.99	0.58	CUITZEO	0	760.4	101.11	125.01
COND ELEC DE LABORATORIO					ORTOFOSFATOS				
GENERAL	102.4	9950	1530.2	1342.7	GENERAL	0.01	39.15	2.71	7.54
ZIRAHUEN	102.4	417	134.23	41.546	ZIRAHUEN	0.014	3.87	0.64	1.33
PATZCUARO	207	1290	960.73	189.64	PATZCUARO	0.014	3.9	0.92	1.31
CUITZEO	349	9950	2206.3	1556.6	CUITZEO	0.014	39.15	5.09	10.95
TURBIEDAD					NITRATOS				
GENERAL	0.6	660	80.59	97.42	GENERAL	0	10	0.25	0.64
ZIRAHUEN	0.6	16	3.65	2.84	ZIRAHUEN	0	10	0.42	1.65
PATZCUARO	5.8	620	65.51	71.17	PATZCUARO	0	2.4	0.19	0.29
CUITZEO	4	660	104.52	113.46	CUITZEO	0	5.1	0.27	0.53
COLOR					NITROGENO ORGANICO				
GENERAL	5	1310	155.93	161.68	GENERAL	0	10.53	0.89	1.23
ZIRAHUEN	5	30	7.3409	4.3825	ZIRAHUEN	0	0.728	0.27	0.25
PATZCUARO	10	491	110.86	73.563	PATZCUARO	0	4.2	0.46	0.56
CUITZEO	20	1310	215.4	196.07	CUITZEO	0	10.53	1.43	1.57
SOLIDOS TOTALES					NITROGENO AMONIACAL				
GENERAL	30	9150	1158.6	1130.3	GENERAL	0	10.3	0.33	0.64
ZIRAHUEN	30	157	82.25	23.861	ZIRAHUEN	0	0.908	0.23	0.23
PATZCUARO	204	876	672.43	111.52	PATZCUARO	0	1.96	0.28	0.37
CUITZEO	208	9150	1708.8	1334.5	CUITZEO	0	10.3	0.38	0.81

Un ejemplo claro de la variación entre una matriz y otra puede observarse en la fluctuación que se da en la Conductividad eléctrica de laboratorio, esta muestra una media general de 1342.732 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$, cuando para Zirahuén la media es de 41.54551 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ y para Cuitzeo de 1556.577 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$ por lo cual el aporte alto para esta media es proporcionado por los valores elevados de conductividad eléctrica del lago de Cuitzeo, esto muestra las marcadas diferencias entre los cuerpos de agua.

Se realizó un análisis de varianza para observar el comportamiento de las variables en cuanto al tipo de lago, sitio, años, época y estación, estos se realizaron mediante una prueba de *Tukey-Kramer* para las variables que presentaron distribución normal a las variables con distribución no normal se les aplicó la prueba de Wilcoxon/Kruskal-Wallis. Todas las variables presentaron una variación por sitios y lagos, por lo que se realizaron las mismas pruebas para cada lago observando las variaciones entre año, época sitio y estación. Las respuestas de variación más comunes en las variables están dadas por la época y la estación se consideraron cuatro grupos en cada caso; cuatro épocas: dos periodos de estiaje y dos en precipitaciones; de igual manera cuatro estaciones: dos cálidas (primavera y verano) y dos frías (otoño e invierno). Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 6.5.

Cuadro 6. 5 Resultados de Análisis de Diferencias de Medias

VARIABLE	PRUEBA	DIFERENCIA			
	GENERAL				
pH DE CAMPO	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001	Época	0.001
TURBIEDAD	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001	Época	0.0001
COLOR	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001		
COLIFORMES FECALES	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001	Estación	0.002
GRASAS Y ACEITES	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.001		
NITRATOS	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Época	0.0064	Estación	0.0001

Cuadro 6.5 (Continuación) Resultados de Análisis de Diferencias de Medias

PRUEBA		DIFERENCIA				
VARIABLE	PATZCUARO					
TEM AGUA	Tukey-Kramer	Estación	0.05			
pH DE CAMPO	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Época	0.0005			
NITROGENO AMONIAL	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Época	0.0002	Estación	0.0008	
SULFATOS	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Época	0.0001	Estación	0.0187	
NITRATOS	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Época	0.0002	Estación	0.0001	
VARIABLE	CUITZEO					
pH DE CAMPO	Tukey-Kramer	Sitios	0.05	Época	0.05	
TURBIEDAD	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001	Época	0.0001	
COLOR	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001			
NITROGENO AMONIAL	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Estación	0.0001			
COLIFORMES FECALES	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Sitios	0.0001			
NITRATOS	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Estación	0.0001			
VARIABLE	ZIRAHUEN					
TEM AGUA	Tukey-Kramer	Estación	0.05			
COLIFORMES FECALES	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Estación	0.0062			
ALCALINIDAD AL FENOL	Wilcoxon/Kruskal-Wallis	Estación	0.0019			

6.2 Imputación de Datos

Los resultados mostrados en el cuadro 6.5 fueron la base de la imputación, las cuales se realizaron bajo tres criterios de imputación: cantidad de datos faltantes, valores o incluso aberrantes y máxima variación. En los cuadros 6.6, 6.7 y 6.8 se muestran los valores de la media y desviación estándar de los parámetros imputados mostrando la poca variación entre ellos lo cual demuestra la confiabilidad de la imputación de los datos. En este sentido Medina y Galvan (2007) señalan que “en medida que la omisión supera el umbral establecido se pone en riesgo la confiabilidad estadística de las variables principales”.

Cuadro 6. 6 Imputación con Medias no Condicionas

SIN IMPUTAR			IMPUTADA	
VARIABLE	X	DESVEST	X	DESVEST
S.T.	1158.55	1130.26	1154.99	1130.08
S.S.T.	157.51	264.71	157.10	264.36
S.Sed.	0.40	1.61	0.40	1.59
Dza. Mg	88.33	64.68	88.39	64.64
Alca_fenol	69.23	98.10	67.59	97.41
SO4	95.25	142.54	92.28	139.87
Cl	134.35	179.84	135.13	179.30
Na	282.03	310.69	281.58	310.63

El método “imputación de medias no condicionas”, se aplicó a los parámetros: Solidos Totales, Solidos Sedimentables, Dureza de Magnesio, sulfatos Iones Cloro y Sodio. En el Cuadro 6.6 se muestra que en cada uno de los parámetros la variación entre la media y la desviación estándar son mínimas, no mayores al nivel de confianza, debido a esto la imputación se considera confiable. Las variables T. agua, Turbiedad, Color y Coliformes fecales fueron trabajadas con el método de imputación de medias condicionadas el cual considera agrupaciones con características similares entre los grupos imputados. Los grupos formados para la imputación se congregaron de acuerdo al lago del cual pertenecían, asignando el siguiente grupo de acuerdo con la máxima variación.

El valor imputado lo da la media del subgrupo. En el cuadro 6.7 se puede observar que los valores entre media y desviación estándar se mantienen próximos al valor de la matriz original.

Cuadro 6. 7 Imputación con Medias Condicionas

VARIABLE	OMISION	VARIACION	SIN IMPUTAR		IMPUTADA	
			X	DESVEST	X	DESVEST
T. agua	Aleatoria	Estación	21.15	3.05	21.14	3.00
Turbiedad	Aleatoria	Época	80.59	97.42	79.62	94.62
Color	Aleatoria	Sitio	155.93	161.68	154.02	157.50
Coliformes Fecales	Consecutiva	Estación	194.14	433.38	197.88	419.17

En las variables con omisión de datos entre el 70 y 85% fueron tratadas con una combinación entre los métodos de distribución no condicionada y una variante al método de medias condicionadas, ya que la omisión se presentó en dos formas: aleatoria y consecutiva, por lo que el valor debe ser proporcionado por un donante con características similares (según sea el patrón de variación: estación, época o sitio). El valor de este donante se tomó de la media de su condición eliminando los años que no presentaban mismo comportamiento al año de la omisión. El valor imputado se obtuvo de la media $\pm$ la desviación estándar, según el comportamiento de concentración o dilución de la variable. Los resultados para la matriz imputada y sin imputar, se muestran en el Cuadro 6.8.

Cuadro 6. 8 Imputación con Medias Condicionas y Distribución no Condicionada.

VARIABLE	OMISION	VARIACION	SIN IMPUTAR		IMPUTADA	
			X	DESVEST	X	DESVEST
N-NH3	Aleatoria	estación	0.33	0.64	0.32	0.59
N-NO3	Aleatoria	estación	0.25	0.64	0.21	0.38
G y A	Aleatoria	época	6.46	6.01	6.51	5.18

Con lo anterior se logró generar una matriz consistente formada por 27 variables: Oxígeno Disuelto, Conductividad eléctrica de laboratorio, Demanda

Química y Bioquímica de Oxígeno, Dureza Total, Dureza de Calcio, Alcalinidad Total, Carbonatos, Bicarbonatos, Ion Calcio, Ion Magnesio, Solidos Totales, Solidos Disueltos Totales, solidos Sedimentables, Dureza de Magnesio, Alcalinidad al Fenol, Sulfatos, Cloruros, Ion Sodio, Temperatura del Agua, Turbiedad, Color, Coliformes Fecales, Nitrógeno Amoniacal, Nitratos y Grasas y Aceites.

6.3 Selección preliminar de las variables

Una vez obtenida la matriz imputada, se realizó un análisis de redundancia empleando el nivel de covariación a partir de la correlación de Spearman, aunado a esto, se tomó como criterio de decisión el papel que juega cada variable dentro del cuerpo de agua. En los cuadros: 6.9, a 6.14 se reportan los resultados obtenidos para las variables candidatas a ser reducidas.

Siendo la alcalinidad un parámetro importante, pues evalúa la capacidad de amortiguamiento del cuerpo de agua e identifica principalmente la cantidad de: bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos; siendo los dos primeros la fuente de dióxido de carbono requerido por las plantas acuáticas para realizar la fotosíntesis. La alcalinidad al fenol es la determinación indirecta de carbonatos (base fuerte), razón por la cual, estas variables se encuentran altamente correlacionadas aproximándose a 1 su factor de correlación, lo que indica redundancia en esta variable (cuadro 6. 9). La alcalinidad total determina indirectamente la cantidad total de carbonatos (alcalinidad al fenol) y bicarbonatos en el sistema, se encuentra más correlacionada a los bicarbonatos ya que estos arrojan la diferencia entre la alcalinidad total y la alcalinidad al fenol. De igual forma la alcalinidad se encuentra relacionada con la conductividad, los sólidos disueltos y los sólidos totales ya que son parámetros que determinan iones disueltos, entre ellos carbonatos y bicarbonatos, los cuales sirven en el ecosistema como un sistema de amortiguación de condiciones acidas.

Cuadro 6. 9 Correlaciones Alcalinidad

Variable	vs Variable	Spearman ρ	Prob> ρ
Alcal_ Fenol	Alcal_ Total	0.7756	<.0001
Alcal_ Fenol	pH_lab	0.7889	<.0001
Alcal_ Fenol	S.D.T.	0.8041	<.0001
Alcal_ Fenol	cond_electrica_laboratorio	0.8122	<.0001
Alcal_ Fenol	S.T.	0.8162	<.0001
Alcal_ Total	S.T.	0.8103	<.0001
Alcal_ Total	S.D.T.	0.8271	<.0001
Alcal_ Total	cond_electrica_laboratorio	0.8462	<.0001
Alcal_ Fenol	CO ₃ =	0.9766	0
Alcal_ Fenol	Na ⁺	0.8018	<.0001
Alcal_ Total	CO ₃ =	0.7818	<.0001
Alcal_ Total	HCO ₃ ⁻	0.9017	<.0001
Alcal_ Total	Na ⁺	0.8239	<.0001

Los sólidos totales (S.T.) son una variable aditiva de los sólidos suspendidos totales (S.S.T.) y los sólidos disueltos totales (S.D.T.), razón por la cual S.T. y S.D.T se encuentran altamente correlacionados, en los sólidos

disueltos se encuentran iones y materia orgánica, por lo que tiende a correlacionarse con múltiples variables como la conductividad que determina la cantidad de iones en disolución.

En el Cuadro 6.10 se encuentran señaladas con verde las variables de mayor correlación. Puede notarse que la variable Sólidos Totales presenta una mayor correlación con Sólidos Disueltos Totales ($p=0.9691$) que con Sólidos Sedimentables ($p=0.7075$), lo cual indica que un cambio en la variable Sólidos Disueltos esta dato principalmente por los sólidos disueltos (iones: sodio, calcio, magnesio, carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, principalmente) que por las partículas en suspensión (materia orgánica, arcillas, por mencionar algunas); con lo anterior quedan indirectamente explicadas las altas correlaciones presentadas entre los sólidos y: los iones, la conductividad eléctrica, las alcalinidades, y las demandas química y bioquímica de oxígeno. Cabe señalar que las variables Sólidos Disueltos Totales y Sólidos Sedimentables Totales no presentaron correlación significativa, esto debido a que cada variable determina aspectos diferentes.

Por consiguiente evaluar en un mismo índice: conductividad eléctrica, sólidos totales, y sólidos disueltos, arrojaría una sobre estimación del panorama, ya que se estaría midiendo indirectamente la misma característica de tres formas diferentes, de ahí que analizar la correlación entre las variables indica cuales variables pueden quedar fuera de la selección preliminar.

Cuadro 6. 10 Correlaciones Sólidos

Variable	vs Variable	Spearman ρ	Prob> ρ
S.D.T.	cond_electrica_laboratorio	0.9542	0
S.D.T.	pH_lab	0.7177	<.0001
S.D.T.	S.T.	0.9691	0
S.D.T.	Alcal_ Fenol	0.8041	<.0001
S.D.T.	Alcal_ Total	0.8271	<.0001
S.D.T.	Cl-	0.8684	<.0001
S.D.T.	CO3=	0.8065	<.0001
S.D.T.	HCO3-	0.7209	<.0001
S.D.T.	Na+	0.9249	<.0001
S.D.T.	SO4=	0.8019	<.0001
S.S.T.	S.T.	0.7057	<.0001
S.T.	cond_electrica_laboratorio	0.9573	0
S.T.	pH_lab	0.7146	<.0001
S.T.	Alcal_ Fenol	0.8162	<.0001
S.T.	Alcal_ Total	0.8103	<.0001
S.T.	Cl-	0.8899	<.0001
S.T.	CO3=	0.8197	<.0001
S.T.	DBO5	0.7128	<.0001
S.T.	DQO	0.717	<.0001
S.T.	Na+	0.9392	<.0001
S.T.	SO4=	0.8189	<.0001

De modo similar fue evaluada la conductividad eléctrica arrojando correlaciones altas para: Solidos Totales, Solidos Disueltos Totales, Cloruros y

Sodio; cabe destacar que estas dos últimas variables también presentaron correlaciones altas en el caso de los sólidos (Disueltos y Totales). Ahora bien el ion sodio es calculado indirectamente a partir del valor de la conductividad eléctrica, lo cual explica el porqué de tan alta correlación. Esto puede observarse en los cuadros 6.11 y 6.12.

Cuadro 6. 11 Correlaciones Conductividad

Variable	vs Variable	Spearman ρ	Prob> ρ
cond_electrica_laboratorio	pH_lab	0.7182	<.0001
cond_electrica_laboratorio	Alcal_ Fenol	0.8122	<.0001
cond_electrica_laboratorio	Alcal_ Total	0.8462	<.0001
cond_electrica_laboratorio	Cl-	0.9053	<.0001
cond_electrica_laboratorio	CO3=	0.8171	<.0001
cond_electrica_laboratorio	DQO	0.7031	<.0001
cond_electrica_laboratorio	HCO3-	0.7355	<.0001
cond_electrica_laboratorio	Na+	0.9687	0
cond_electrica_laboratorio	S.D.T.	0.9542	0
cond_electrica_laboratorio	S.T.	0.9573	0
cond_electrica_laboratorio	SO4=	0.8351	<.0001

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 12 Correlaciones Ion Sodio

Variable	vs Variable	Spearman ρ	Prob> ρ
Na+	Alcal_ Fenol	0.8018	<.0001
Na+	Alcal_ Total	0.8239	<.0001
Na+	Cl-	0.9014	<.0001
Na+	CO3=	0.8068	<.0001
Na+	cond_electrica_laboratorio	0.9687	0
Na+	DBO5	0.7038	<.0001
Na+	DQO	0.7072	<.0001
Na+	HCO3-	0.7148	<.0001
Na+	S.D.T.	0.9249	<.0001
Na+	S.T.	0.9392	<.0001
Na+	SO4=	0.8338	<.0001

Por consiguiente el ion sodio presenta relación con las variables que son detectadas mediante la conductividad, ya que es un parámetro determinado en función de la misma; por lo que la relación entre el ion sodio y estas variables no presenta un significado físico verídico.

De igual modo los iones Calcio y Magnesio son determinados a partir de la dureza de calcio y la dureza de magnesio, con lo que se habla de variables

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

redundantes; en el cuadro 6.13 se observa que la dureza total responde a variaciones de magnesio y dureza de magnesio ya que la correlación es alta.

Cuadro 6. 13 Correlaciones Dureza

Variable	vs Variable	Spearman ρ	Prob> ρ
Dza Mg	Dza Tot	0.9262	<.0001
Dza Ca	Ca+ +	0.9968	0
Dza Mg	Mg+ +	0.9862	0
Dza Tot	Mg+ +	0.9143	<.0001

En lo referente a la correlación entre demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno muestra que son parámetros fuertemente correlacionados (Cuadro 6.14).

Cuadro 6. 14 Correlaciones Demanda de Oxígeno

Variable	vs Variable	Spearman ρ	Prob> ρ
DBO5	S.T.	0.7128	<.0001
DQO	DBO5	0.985	0
DQO	S.T.	0.717	<.0001
DQO	cond_electrica_laboratorio	0.7031	<.0001
DBO5	Cl-	0.7821	<.0001
DBO5	Na+	0.7038	<.0001
DBO5	SO4=	0.7604	<.0001
DQO	Cl-	0.788	<.0001
DQO	Na+	0.7072	<.0001
DQO	SO4=	0.7654	<.0001

La alta correlación entre la Demanda Química y Bioquímica, indica que al determinar un parámetro se evalúa indirectamente el otro; tomando en cuenta que el oxígeno necesario para la DBO5 es exclusivamente orgánico a diferencia del necesario en la DQO que incluye la oxidación de toda la materia (orgánica e inorgánica), se sabe cuál es mayor y podría encontrarse una ecuación que los relacione, pero tomando en consideración la escases de datos para determinar el estado trófico, tener en cuenta la DBO5 podría ser de utilidad, por lo que inicialmente ambos parámetros quedaron dentro de la selección preliminar de variables.

Como resultado de lo anterior, el siguiente cuadro muestra los parámetros considerados a exclusión en la primera selección de variables.

Cuadro 6. 15 Variables posibles a omitir en primera selección

VARIABLES			
REDUNDANTES		CORRELACIONADAS	
Alcalinidad al Fenol	Carbonatos	Dureza de Magnesio	Dureza Total
Alcalinidad Total	Bicarbonatos	S.T.	S.D.T.
Dureza de Magnesio	Ion Magnesio	DQO	DBO
Dureza de Calcio	Ion Calcio		
Conductividad Eléctrica	Ion Sodio		

Se realizaron análisis de componentes principales (ACP) con la finalidad de corroborar cuales de las variables anteriores pueden ser objeto de omisión sin perder información explicativa del conjunto. Al emplear la totalidad de los datos

contenidos en la matriz inicial, se obtuvo que pueden ser seleccionadas como variables informativas, algunas variables redundantes (Cuadro 6.15), tal es el caso de los Bicarbonatos y los iones de Mg, Ca y Sodio; lo que se consideró como una sobreestimación de la información requerida. Por lo anterior se empleó una matriz reducida sin información redundante. Los resultados (Cuadro 6.16) muestran que en los primeros seis componentes se alcanza el 71.842% de la explicación de la variación.

Cuadro 6. 16 ACP primer análisis

Componente Principal	Eigenvalor	Porcentaje de la explicación	Porcentaje Acumulado
1	9.5512	41.527	41.527
2	1.9834	8.624	50.151
3	1.4697	6.39	56.54
4	1.2798	5.564	62.105
5	1.1872	5.162	67.266
6	1.0524	4.576	71.842

La composición de estos componentes con base en las variables explicativas es como sigue:

Primer componente: S.T., Alcal_Total, S.D.T., cond_electrica_laboratorio, Cl-

Segundo componente: Dza Mg, Dza Ca.

Tercer componente: DBO5, DQO y tem_agua

Cuarto componente: O.D.,

Quinto componentes: Coli_Fecales

Sexto Componente: N-NO3

Usando las variables que componen estos seis componentes, se hizo un segundo análisis, obteniendo que se alcanza el 7% de la explicación de la variación en tres componentes, cuya composición de las variables explicativas es:

Primer componente: S.T. Alcal_ Total, S.D.T., cond_electrica_laboratorio.

Segundo componente: Dza Mg, Dza Ca.

Tercer componente: DBO5, DQO y tem_agua

Por lo que se considera que es el efecto combinado de estas variables, lo que explica las diferencias de las columnas de agua en estudio. Sin embargo, los análisis de redundancia, mostraron que los sólidos totales están fuertemente correlacionados con los sólidos disueltos totales ($p = 0.9691$ Prob $> p < 0.00001$); y debido a que este valor se explica conforme a que los S.T incluyen a los S.D.T, se aceptó esta redundancia y se realizó un tercer ACP excluyendo a cada una de estas variables. Los resultados mostraron que al aceptar a S.T en el tercer componente se explica el 81.983% y al incluir a S.D.T. se incrementa esta explicación de la variación a 82.108%, siendo notable que el acomodo de las otras variables en los componentes sea el mismo, con pequeñas variaciones en los eigenvalores. De este modo se decidió conservar como variables posibles candidatas a integrar la propuesta del Índice para valorar la calidad del agua, a las variables que componen los Componentes Principales siguientes:

Primer componente: Alcal_ Total, S.D.T., cond_electrica_laboratorio, DBO5 y DQO.

Segundo componente: Dza Mg y Dza Ca.

Tercer componente: tem_agua

Hasta este punto las variables han sido reducidas a 20: tem_agua, O.D. pH_lab, cond_electrica_lab, turbiedad color, S.S.T., S.D.T., S. Sed., DBO5, DQO, G y A, Dza Ca, Dza Mg, Alcal_ Total, N-NO3, N-NH4, SO4=, Cl- y Coli_Fecales.

Otra condición que indica si una variable puede ser excluida del índice, es su escasa o nula capacidad para categorizar, estas variables no presentan cambios significativos estadísticamente que permitan clasificar de acuerdo a su concentración o bien sus variaciones son mínimas o debidas a puntos atípicos o aberrantes denominados outliers; para determinar este tipo de variables se analizaron los resultados arrojados por los análisis de varianza mediante la prueba Tukey-Kramer, con un nivel de significancia $P < 0.05$, a estas condiciones respondieron los Sólidos Sedimentables.

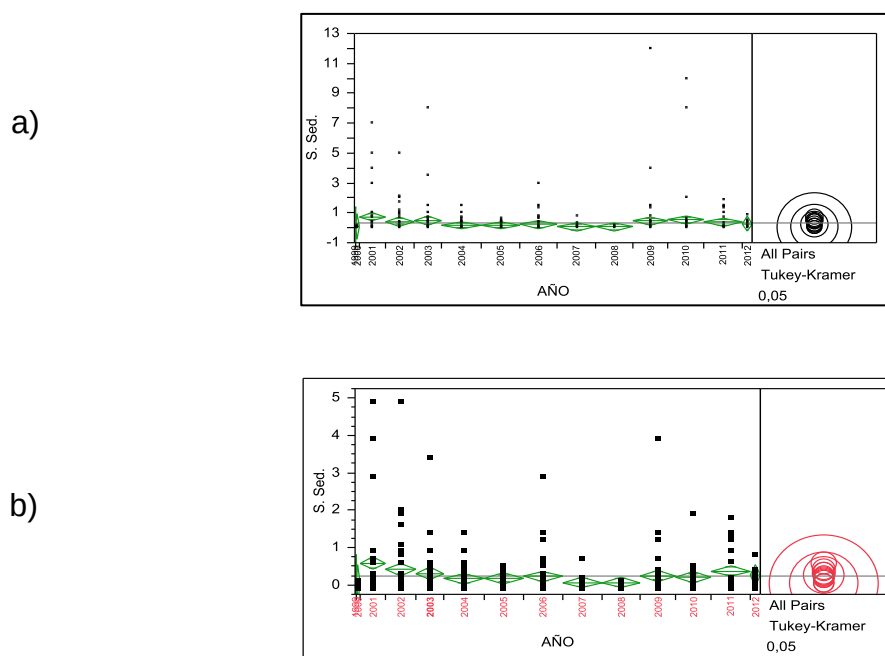


Figura 6. 1 Comportamiento de Solidos Sedimentables en función del tiempo: a) con outlier; b) sin outlier.

En la figuras 6.1 se puede observar que las medias fluctúan en intervalos tan cercanos que no permiten detectar variación, en la figura 6.1 a) puede

apreciarse el comportamiento con los datos que se encuentran fuera de la población de datos (outliers) y en la figura 6.1b) que a pesar de su eliminación su comportamiento sigue sin presentar algún patrón característico y que no hay diferencia significativa entre sus medias.

El las figuras 6.2 puede observarse que las medias son jaladas por los outliers, pero aun sin ellos la variable sigue sin presentar variación que permita clasificar.

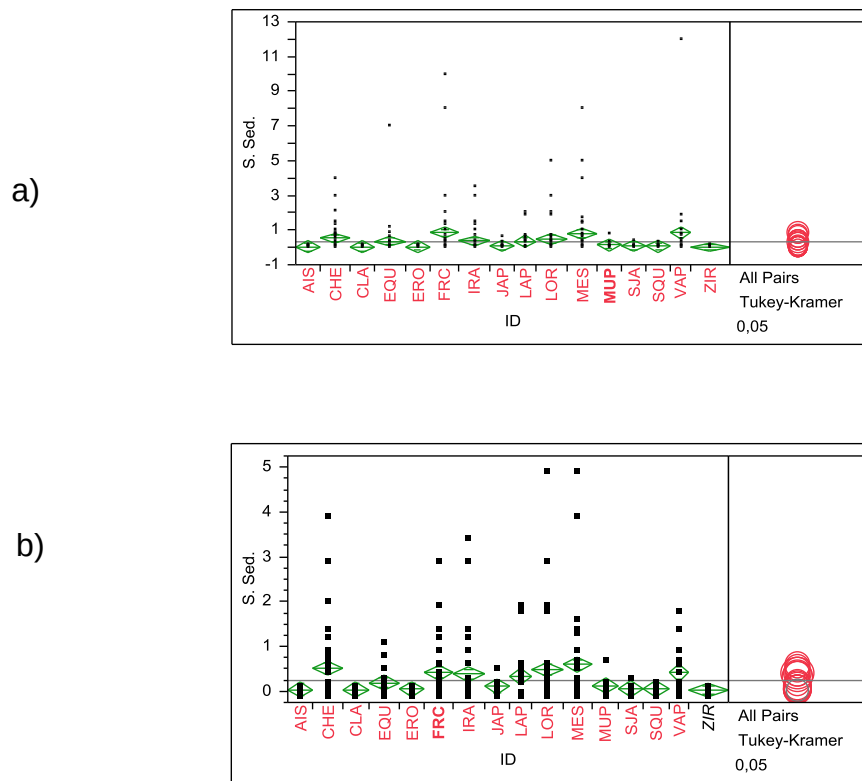


Figura 6. 2 Comportamiento de Solidos Sedimentables respecto a los sitios: a) con outlier; b) sin outlier.

Por lo que Solidos Sedimentables fue una variable eliminada para el proceso de Normalización de los datos, quedando las variables: Temperatura del agua, Oxígeno Disuelto, pH de Laboratorio, Conductividad Eléctrica, Turbiedad, Color, Solidos Suspendidos Totales, Solidos Disueltos Totales, Demanda

Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Grasas y Aceites, Dureza de Calcio, Dureza de Magnesio, Alcalinidad Total, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Cloruros y Coliformes Fecales.

6.4 Normalización de las Variables

Como ya se hizo mención en capítulos anteriores, al normalizar las variables deben tratarse los datos de tal modo que cada variable, de forma individual esté manejada en las mismas unidades. Por lo que es necesario establecer las unidades establecidas para cada parámetro; una vez definidas las unidades se eliminaron los outliers, para así estandarizar las unidades y establecer el método que le permita como tal categorizar y establecer el sub-indicador que represente al parámetro dentro del cuerpo de agua y su calidad en la ecuación general del índice.

Asignación de unidades para cada parámetro

El cuadro 6.17 muestra las unidades establecidas para el índice, mismas que son definidas y establecidas en las normas oficiales mexicanas empleadas por la comisión nacional del agua y en las cuales fueron proporcionados los datos.

Identificación de Outliers

La de eliminación para Outliers multivariados, se hizo con las siguientes condicionantes: Presentar una distancia de Mahalanobis mayor o igual a 12, que el valor generado para ese punto sea atípico en al menos diez variables y no representen en su conjunto más del 5% del total de los datos de cada variable (Cuadro 6.18).

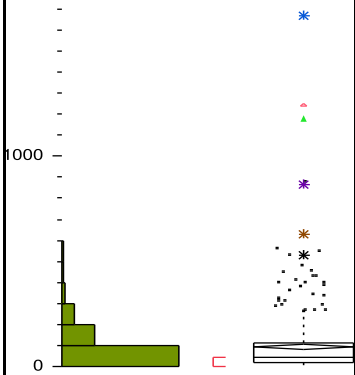
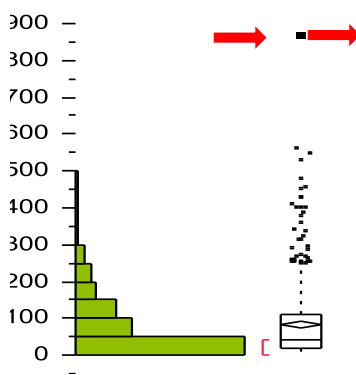
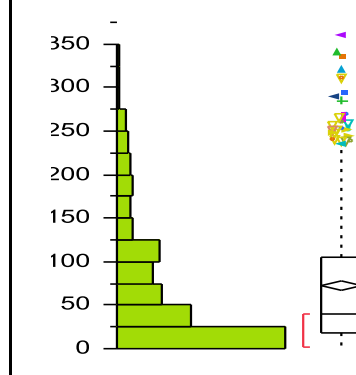
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 17 Unidades de las Variables

VARIABLE	UNIDADES
Temperatura del agua	° C
Oxígeno Disuelto	mg/l
pH de Laboratorio	UpH
Conductividad Eléctrica	µmhos/cm
Turbiedad	UNT
Color	Pt-Co
Solidos Suspendidos Totales	mg/l
Solidos Disueltos Totales	mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l
Demanda Química de Oxígeno	mg/l
Grasas y Aceites	mg/l
Dureza de Calcio	mg/l
Dureza de Magnesio	mg/l
Alcalinidad Total	mg/l
Nitratos	mg/l
Nitritos	mg/l
Sulfatos	mg/l
Cloruros	mg/l
Coliformes Fecales	UFC/100ml

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 18 Variaciones en la distribución de los datos conforme a su reducción, basada en el análisis de datos aberrantes.

Con Outliers	Sin Outliers Multivariados	Sin Outliers
604 Muestreos	595 Muestreos (1.5% datos eliminados)	595 Muestreos (eliminados no más del 3% de cada variable)
Ej.: S0₄ 	Ej.: S0₄ 	Ej.: S0₄ 
100.0% Máximo 1670.8 99.5% 1166.9 97.5% 426.8 90.0% 215.6 75.0% Cuantil 114.8 50.0% Mediana 45.1 25.0% Cuantil 18.6 10.0% 9.8 2.5% 3.2 0.5% 2.8 0.0% Mínimo 1.7 Media 92.281 Desviación Estándar 139.87 Error Estándar 5.6915 N 604	100.0% Máximo 879.44 99.5% 547.48 97.5% 378.90 90.0% 211.71 75.0% Cuantil 108.98 50.0% Mediana 42.61 25.0% Cuantil 18.50 10.0% 9.65 2.5% 3.20 0.5% 2.76 0.0% Mínimo 1.70 Media 82.79358 Desviación Estándar 97.897929 Error Estándar 4.0134238 N 595	100.0% Máximo 359.70 99.5% 336.83 97.5% 257.64 90.0% 188.85 75.0% Cuantil 105.14 50.0% Mediana 40.31 25.0% Cuantil 18.36 10.0% 9.57 2.5% 3.20 0.5% 2.74 0.0% Mínimo 1.70 Media 72.638621 Desviación Estándar 73.143849 Error Estándar 3.037133 N 580

Análisis de relación entre variables

Con la finalidad de realizar una reducción de las variables a incluir en el índice, se realizaron dos Análisis de Componentes Principales en los cuales se usaron las variables: Temperatura del agua, Oxígeno Disuelto, pH, Turbiedad,

Color, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno 5, Demanda Química de Oxígeno, Grasas y Aceites, Dureza de Calcio y Magnesio, Alcalinidad Total, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Cloruros, Coliformes Fecales, uno con conductividad y uno sin ella, debido a la fuerte correlación entre Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales ($\rho = 0.9762$ Prob $> \rho < 0.00001$), la cual se observa gráficamente en la figura 1 presentada en el análisis multivariado con Sólidos Disueltos Totales, ambos análisis dieron las mismas variables así que se optó por eliminar la variable Conductividad y conservar Sólidos Disueltos Totales, ya que la variable de conductividad es predictiva y determina indirectamente otros iones como los Nitritos, Nitratos, Sulfatos y Cloruros, los cuales es importante conservar para su análisis individual.



Figura 6. 3 Gráfico de salida del análisis de Correlación paramétrica, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson Prob $> F$ 0.05

El siguiente análisis muestra que en los primeros seis componentes se logra alcanzar el 72.791% de la explicación de la variación tomando en cuenta la conductividad y el 71.682% sin ella.

Cuadro 6. 19 Análisis de Componentes Principales con Conductividad Eléctrica y sin ella.

Considerando Conductividad Eléctrica				Eliminando Conductividad Eléctrica			
Comp Principal	Eigen Valor	Porcentaje		Comp Principal	Eigen Valor	Porcentaje	
		de explicación	Porcentaje Acumulado			de explicación	Porcentaje Acumulado
1	7.5932	39.964	39.964	1	6.7314	37.397	37.397
2	1.6172	8.512	48.476	2	1.6126	8.959	46.356
3	1.4164	7.455	55.931	3	1.3611	7.562	53.918
4	1.1314	5.955	61.886	4	1.1320	6.289	60.206
5	1.0634	5.597	67.483	5	1.0581	5.878	66.085
6	1.0086	5.308	72.791	6	1.0076	5.598	71.682

La composición de estos componentes con base en las variables explicativas es como sigue:

Tomando en consideración la Conductividad Eléctrica

Primer componente: Conductividad Eléctrica, SDT, Sulfatos, Cloruros, Alcalinidad Total, DBO5, DQO.

Segundo componente: Dureza de Magnesio.

Tercer componente: Dureza de Calcio.

Cuarto componente: Coliformes Fecales.

Quinto componentes: Nitrógeno Amoniacal.

Sexto Componente: Nitratos.

Eliminando Conductividad Eléctrica las variables que integran cada componente se conservan en la misma posición, a excepción del primer componente:

Primer componente: SDT, Sulfatos, Cloruros, Alcalinidad Total, DBO5, DQO.

Usando las variables que integran los seis componentes, del estudio sin conductividad eléctrica se hizo un segundo análisis, alcanzando el 71.93% de la explicación de la variación en cuatro componentes, cuya composición de las variables explicativas es:

Primer componente: SDT, Sulfatos, Cloruros, Alcalinidad Total, DBO5, DQO.

Segundo componente: Dureza de Calcio

Tercer componente: Dureza de Magnesio, Coliformes Fecales

Cuarto componente: Nitrógeno Amoniacal, Nitratos.

Por lo que se considera que es el efecto combinado de estas variables, lo que explica las diferencias de las columnas de agua en estudio. De este modo se decidió conservar como variables a normalizar y posibles candidatas a integrar la propuesta del Índice para valorar la calidad del agua, a las arrojadas hasta el cuarto componente del Análisis de Componentes Principales: SDT, Sulfatos, Cloruros, DBO5, DQO, Dureza de Calcio, Dureza de Magnesio, Coliformes Fecales, Nitrógeno Amoniacal y Nitratos.

Comparación de medias pareadas y estadística básica a variables conservadas

Una vez teniendo las variables que deberán ser normalizadas es necesario evaluarlas desde su estadística básica (Cuadro 6.20), para así poder conocer los intervalos en los cuales fluctúan los valores de las variables y con ellos su comportamiento o tendencia. Esto se da debido a que la eliminación de outliers

genera movimientos en el comportamiento de los datos como lo son la media, desviación estándar, en algunos casos el valor mínimo o máximo según sea el caso, ya que estos valores se caracterizan por despegarse de la distribución o comportamiento de los datos, es necesario tener siempre presente la naturaleza de los mismos, así como también que pertenecen a cuerpos de agua con características fisicoquímicas que les permiten ser diferenciados y generar intervalos de categorización o clases.

Cuadro 6. 20 Estadística Básica de las Variables consideradas.

Variable	Mínimo	Primer Cuantil	Media na	Tercer Cuantil	Máxim o	Media	Desv Est	No Datos
S.D.T.	2.0	555.5	687.0	1079.8	3386.0	871.176	625.80	584
DBO5	0.00	14.05	23.535	38.00	96.00	26.583	17.624	576
DQO	0.00	24.25	36.80	61.00	151.0	42.829	27.9444	575
Alc Tot	45	354	474.7	540	1320	470.80	241.59	584
Dza Mg	2.01	38.55	75.60	126.07	256.8	83.914	50.694	585
Dza Ca	2.01	38.51	50.00	64.45	172.86	54.9184	27.2094	581
SO4=	1.70	18.36	40.31	105.14	359.7	72.639	73.1438	580
Cl-	0.91	38.16	56.55	164.94	539.97	111.04	108.086	584
N-NO3	0.00	0.020	0.130	0.233	1.70	0.1975	0.2586	590
N-NH3	0.00	0.00	0.200	0.400	1.96	0.280	0.32666	590
Col_Fec	0.0	10.0	90.0	200.0	1050.0	150.91	197.649	582

Realizar una comparación de medias resulta indispensable para determinar si existe o no variación entre los parámetros que se pretende formen parte del índice, partiendo del supuesto que los sitios se comportan de forma diferente y siendo necesario que presenten variación entre tipo de sitio y tipo de lago, con la finalidad de tomarlos como sitios de referencia de acuerdo a su calidad, se realiza un análisis de comparación de medias para corroborar si estas variables permiten clasificar a los sitios y categorizar las variables (Cuadro 6.21).

El cuadro posterior muestra claramente una comparación entre la variación de cada una de los parámetros respecto al tipo de sitio y al tipo de lago. Las variables: Sólidos Disueltos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Cloruros y Coliformes Totales, tienen una clara variación tanto en las medias de sitios como de lagos, observando que a los sitios de Cuitzeo les corresponden valores más altos de concentraciones, lo que mantiene a sus medias sobre las de los sitios pertenecientes a los Lagos de Pátzcuaro y Zirahuén. Asimismo las medias de Zirahuén se colocan dentro de los valores más bajos, con lo que se comprueba (solo para estas variables), que sitios pertenecientes al lago de Cuitzeo pueden ser tomados como referencia de baja o mala calidad y a Zirahuén como alta o buena calidad. En la figura 6.4, se puede observar que la Demanda Bioquímica de Oxígeno, presenta una clara diferencia entre las medias de los lagos, así como en los sitios que pertenecen a cada lago, permitiendo agruparlos en referencia al valor de sus medias como valores bajos para sitios pertenecientes a Cuitzeo, medios en Pátzcuaro y altos en Zirahuén. Dentro del Cuadro 6.21 se observan enmarcadas en un cuadro rojo las variables: coliformes totales, dureza de calcio, dureza de magnesio y sulfatos, las cuales no presentan el mismo comportamiento que las anteriores, pero arrojan diferencia entre las medias, permitiendo la clasificación de los sitios de acuerdo a las cargas de concentración; enmarcadas con verde se observan las variables: nitritos y nitratos, las cuales no presentan diferencia estadísticamente significativa entre sus medias.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 21 Análisis de comparación de medias, con base en las pruebas de hipótesis de varianza de una sola vía (ANOVA), comparación de todos los pares de Tukey-Kramer y análisis de varianza no paramétrica de Wilcoxon/Kruskal Wallis.

Variable		ANOVA	Tukey-Kramer	Wilcoxon/Kruskal
		r^2 : Prob	alpha 0.05	Wallis Chi^2 : Prob
S.D.T.	Sitio	0.5054 ; 0.0001	3.441	351.44 ; 0.0001
	Lago	0.3855 ; 0.0001	2.3497	272.52 ; 0.0001
DBO5	Sitio	0.5832 ; 0.0001	3.441	415.66 ; 0.0001
	Lago	0.5756 ; 0.0001	2.349	411.087 ; 0.0001
DQO	Sitio	0.6086 ; 0.0001	3.441	420.429 ; 0.0001
	Lago	0.5972 ; 0.0001	2.349	415.214 ; 0.0001
Alcalinidad	Sitio	0.5085 ; 0.0001	3.441	290.791 ; 0.0001
	Lago	0.3517 ; 0.0001	2.349	171.097 ; 0.0001
Cloruros	Sitio	0.6163 ; 0.0001	3.441	463.972 ; 0.0001
	Lago	0.5070 ; 0.0001	2.349	427.566 ; 0.0001
Coliformes	Sitio	0.1977 ; 0.0001	3.4416	158.86 ; 0.0001
Fecales	Lago	0.0939 ; 0.0001	2.349	96.977 ; 0.0001
Dureza de Calcio	Sitio	0.1828 ; 0.0001	3.442	163.506 ; 0.0001
	Lago	0.1090 ; 0.0001	2.349	112.495 ; 0.0001
Dureza de Magnesio	Sitio	0.5589 ; 0.0001	3.442	359.082 ; 0.0001
	Lago	0.5206 ; 0.0001	2.349	334.806 ; 0.0001
Sulfatos	Sitio	0.5847 ; 0.0001	3.442	448.556 ; 0.0001
	Lago	0.5159 ; 0.0001	2.349	430.662 ; 0.0001
Nitratos	Sitio	0.0162 ; 0.8503	3.4414	8.9251 ; 0.8814
	Lago	0.0073 ; 0.1134	2.3496	3.7734 ; 0.1515
Nitritos	Sitio	0.0356 ; 0.1346	3.4414	0.1634 ; 0.9217
	Lago	0.0028 ; 0.4386	2.3496	18.4254 ; 0.2410

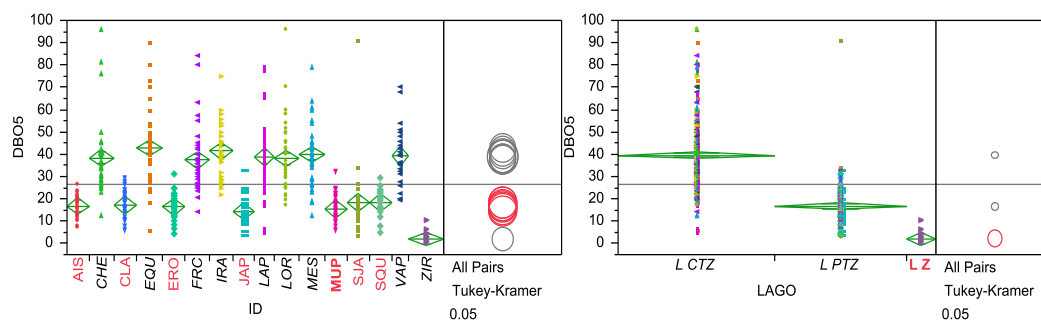


Figura 6. 4 Gráfico de salida de las pruebas de ANOVA y Tukey Kramer.

Las variables Dureza de Calcio, Dureza de Magnesio y Sulfatos presentan variación tanto con los sitio como con el lago, pero no arrojan el mismo comportamiento que las variables anteriores, ya que en ellas existen sitios de un lago que tienden a semejarse a las medias de sitios de otro lago, es decir que no en su mayoría los sitios con valores más altos pertenecerán a Cuitzeo representando una baja calidad, sino que denota, que en el Lago de Pátzcuaro hay sitios que pueden semejarse a Cuitzeo y viceversa.

Para la Dureza de Calcio las medias de los sitios de Cuitzeo y Pátzcuaro no presentan variación marcada ente sí, pero existe diferencia con la media de Zirahuén. Las medias en la dureza de magnesio se comportan de forma diferente, los valores altos pertenecen al lago de Pátzcuaro, medios a Cuitzeo y los más bajos a Zirahuén; en el caso de los sulfatos se presenta diferencia tanto para sitio como para lago, presentando Pátzcuaro una marcada similitud a Zirahuén (figura 6.5) Las variables que no presentaron diferencia de medias para sitio ni para lago, fueron Nitritos y Nitratos (figura 6.6), la cual no permite categorizar a los sitios; pero debido a su importancia como nutrimentos, serán tomadas en consideración para normalizar, tomando como referente sus valores máximos y mínimos.

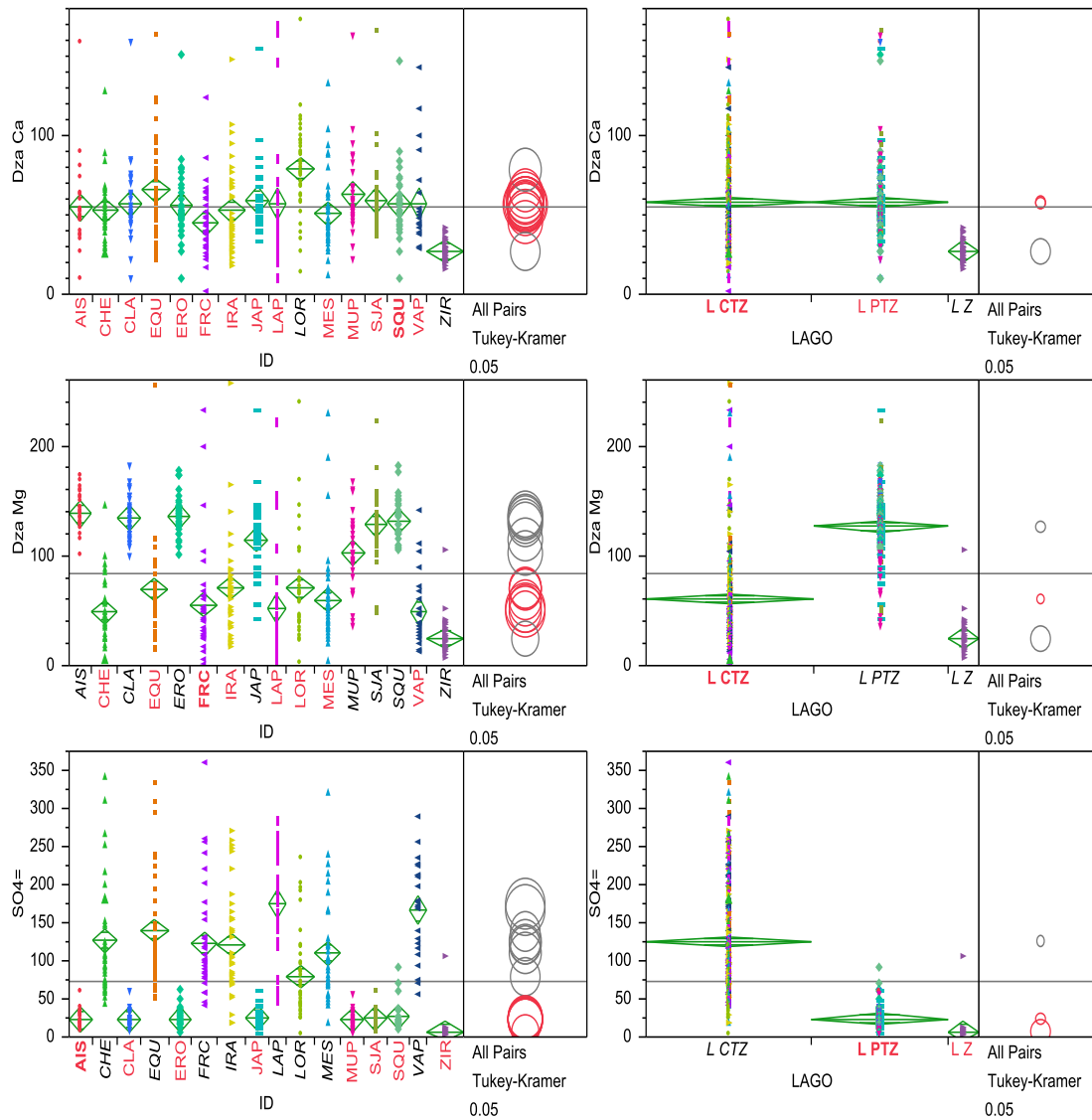


Figura 6. 5 Gráfico de salida del Análisis de ANOVA y Tukey Kramer para Dureza de Ca y Mg y Sulfatos.

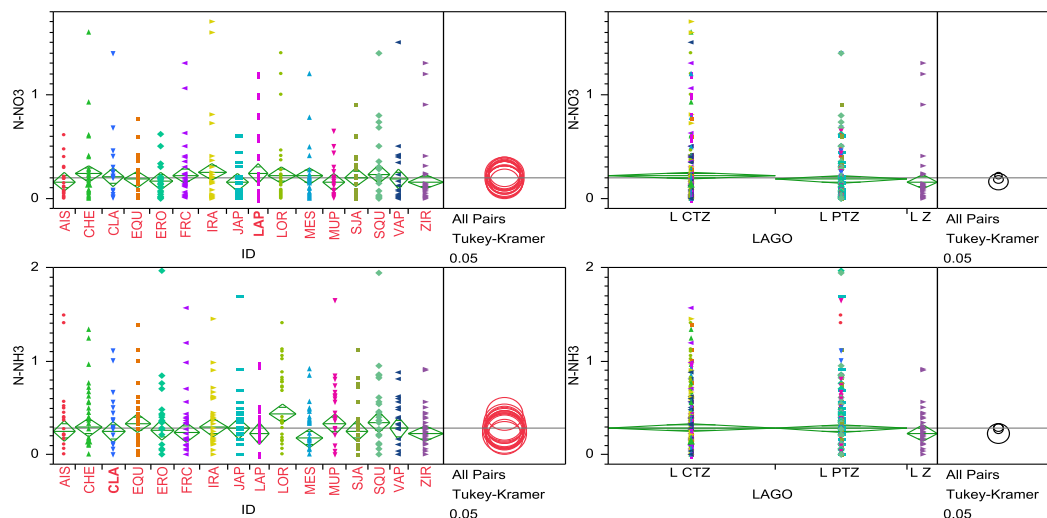


Figura 6. 6 Gráfico de salida del Análisis de ANOVA y Tukey Kramer para Nitratos y Nitrógeno Amoniacal.

Normalización de Variables por Definición de Escalas

A partir de la estadística básica se realizó una comparación entre intervalos que presenta cada variable (Figura 6.7), y en conjunto con la distribución de las variables se hicieron categorías, cada una establecida a un décimo de la distribución de los datos, denominados deciles, teniendo en cuenta que las variables en su mayoría presentan concentraciones altas para Cuitzeo, medias para Pátzcuaro y bajas para Zirahuén y considerando que la matriz de datos no es homogénea en cuanto a los muestreos por lago, se realizó una primera categorización a cada lago, la cual arrojaría valores a cada 5% de los datos, contando con:

Veinte intervalos para una calidad aceptable.

Veinte intervalos para una calidad media, y.

Veinte en una calidad baja.

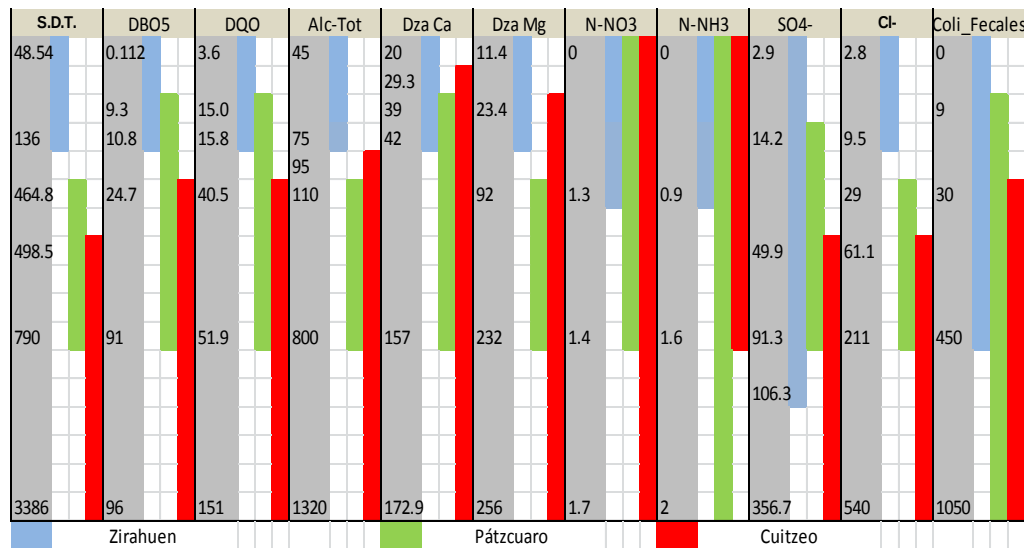


Figura 6. 7 Gráfico de Comparación de Intervalos entre lagos para cada Variables

Lo que permite tener igual cantidad de valores en cada intervalo de calidad, evitando cambios abruptos por falta de muestreos. Con estos 60 valores se generó un nuevo conjunto de datos con el cual se obtuvieron las escalas de cero a 100 en calidad, conformadas por los deciles del nuevo conjunto de datos.

A partir de estos valores se generaron intervalos de calidad para cada variable los cuales se expresan en el Cuadro 6.22. Los valores para la normalización de los datos deben ser continuos de acuerdo al tipo de distribución que presenta la variable, siendo que en las variables sólidos disueltos totales, los valores entre Zirahuén se despegan considerablemente, de los valores entre Pátzcuaro y Cuitzeo generando un cambio abrupto en la distribución de los datos, por esto, se procedió a asignar valores a las calidades que se establecen en esos intervalos como faltantes para continuar con la distribución presentada por la variable, tomando como referencia a Orbe y Acevedo (2002), se encontró el mismo comportamiento para cloruros y no para los demás iones, por lo que en respuesta a esta observación se trataron de igual manera ambas variables. Una vez obtenida la tendencia de Calidad vs Concentración en la variable SDT se revisó la relación con los Cloruros (Figura 6.8), presentando un comportamiento

lineal, con la ecuación $y = 0.1657x - 21.114$ de regresión lineal dada entre SDT y Cl, con una correlación de 0.9634 se realizó el ajuste en la variable cloruros.

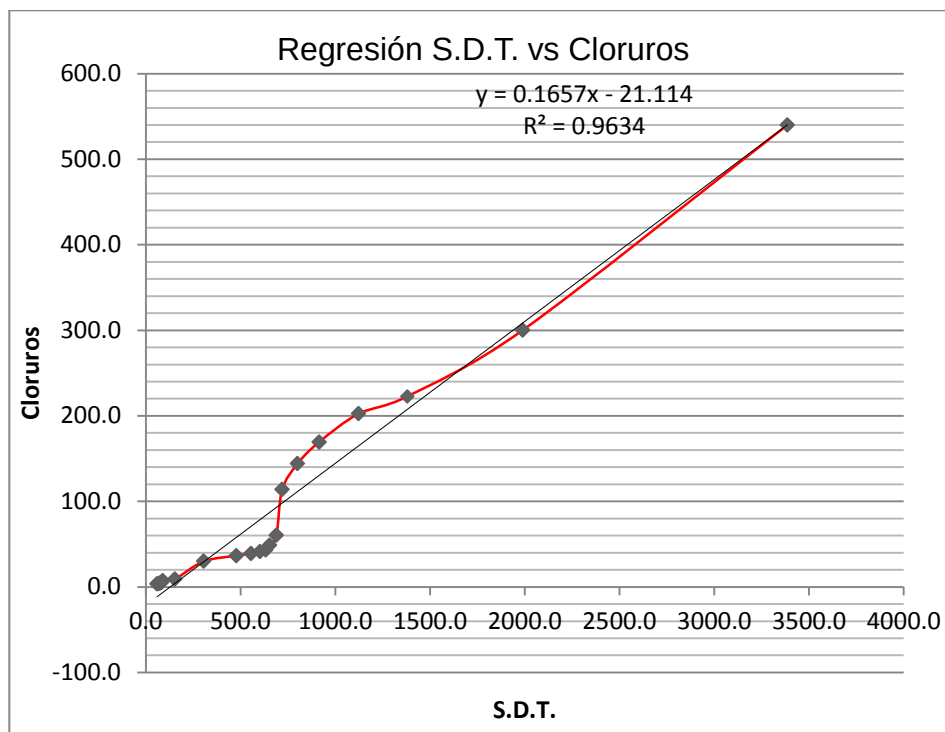


Figura 6. 8 Gráfico de salida de la Regresión Lineal entre SDT y Cloruros.

Cuadro 6. 22 Intervalos de variación para cada categoría de las variables candidatas para generar el índice.

Iv	S.D.T.	DB05	DQ0	Dza Ca	Dza Mg	SO4	N-NO3	N-NH3	Cloruros	Coli_Fecales
100	<66	<3.24	<5.12	<23.95128	>20.90	<3.39	<0.0125	<0.120	<3.94	<13.64
90	67 – 82	3.24 - 9.89	5.12 - 15.46	23.95 - 28.4672	20.90 - 24.13	3.39 - 6.42	0.0125- 0.0277	0.120 - 0.184	3.94 - 4.89	13.64 - 28.12
80	83 – 152	9.89 - 13.22	15.46 - 22.72	28.47 - 34.2939	24.13 - 30.00	6.42 - 12.77	0.0277 - 0.051	0.184 - 0.206	4.89 - 9.14	28.12 - 45.04
70	153 – 477	13.22- 17.66	22.72 - 30.21	34.29 - 39.6032	30.00 - 41.03	12.77 - 18.16	0.051 - 0.073	0.206 - 0.269	9.14 - 36.5	45.04 - 85.63
60	478 – 602	17.66 - 22.26	30.21 - 39.04	39.60 – 44	41.03 – 64	18.16 - 24.31	0.073 - 0.130	0.269 - 0.294	36.5 - 41.31	85.63 - 112.6
50	603 – 652	22.26 - 27.49	39.04 - 30.21	44 - 49.45	64 - 99.12	24.31 - 41.51	0.130 - 0.2	0.294 - 0.374	41.31 - 48.8	112.6 - 155.92
40	653 – 719	27.49 - 37.61	49 - 39.04	49.45 - 56.72	99.12 - 112.56	41.51 - 82.79	0.2 - 0.2312	0.374 - 0.435	48.8 - 113.645	155.92 - 197.4
30	720-914	37.61 - 47.36	58.56 - 74.84	56.72 - 66.66	112.56 - 129.05	82.79 - 105.35	0.312 - 0.309	0.435 - 0.607	113.64 - 169.27	197.4 - 268.4
20	915 – 1381	47.36 - 92.50	74.84 - 160.8	66.66 - 81.67	129.05 - 146.20	105.35 - 154.94	0.309 - 0.515	0.607 - 0.878	169.27 - 222.71	268.4 - 480
10	1380 – 3386	92.50 - 250	160.8 - 800	81.67 - 172.86	146.20 - 256.8	154.94 - 359.7	0.515 - 1.7	0.878 - 1.96	222.71 - 539.97	480 - 1050
0	>3386	>250	>800	>172.86	>256.8	>359.7	1.700	>1.96	>539.97	>1050

Posterior a la generación de los valores para cada percentil se realizaron los gráficos de tendencia de calidad para cada una de las diez variables seleccionadas, y se buscó la línea de tendencia para la cual la correlación fuera más cercana a la unidad, esto con ayuda del paquete de análisis de análisis y representación de datos Origin 8, el cual arrojó decaimiento exponencial como mejor ajuste al comportamiento de los datos de cada una de las variables las figuras 6.9 a la 6.19 muestran gráficamente el comportamiento de cada variable y el cuadro 6.23 muestra las ecuaciones para cada parámetro, así como el factor de correlación en cada caso. Las ecuaciones mostradas en el cuadro fueron ajustadas por medio de ecuaciones simultáneas con valor máximo de $y=100$ y mínimo de $y=0$ en cada parámetro, evitando con ello números fuera de este rango.

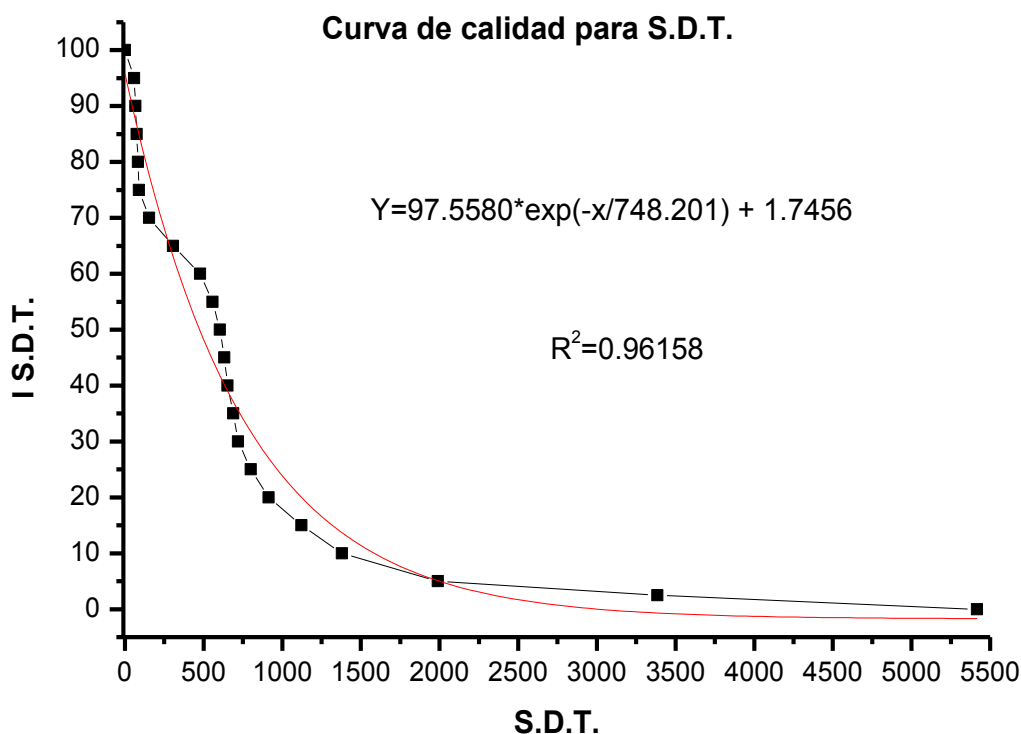


Figura 6. 9 Gráfico de Calidad para Sólidos Disueltos Totales

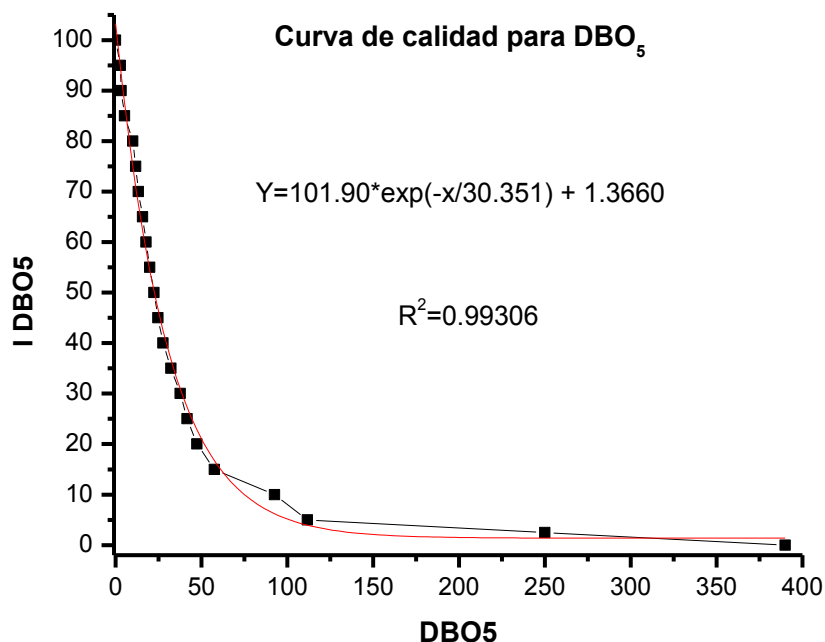


Figura 6. 10 Gráfico de Calidad para Demanda Bioquímica de Oxígeno

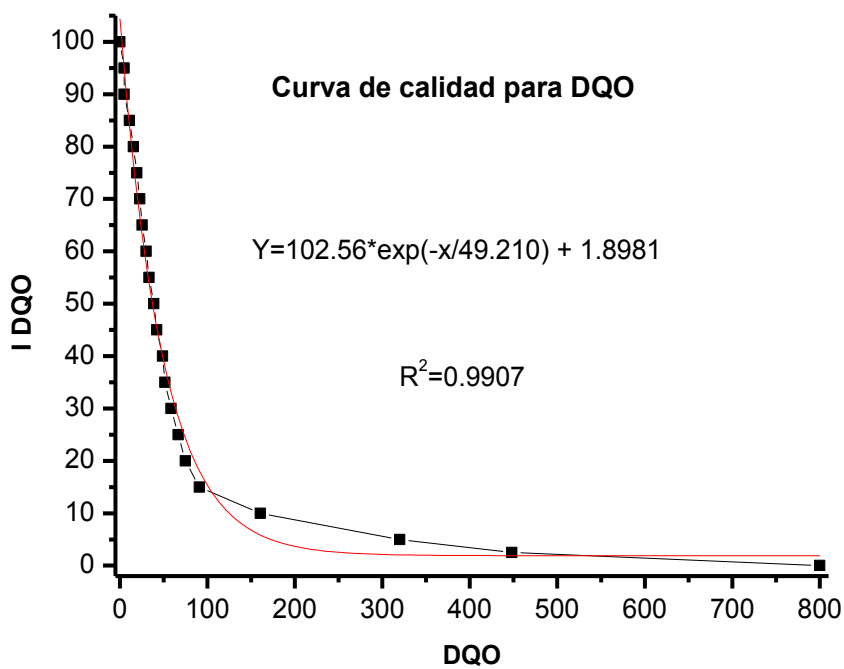


Figura 6. 11 Gráfico de Calidad para Demanda Química de Oxígeno

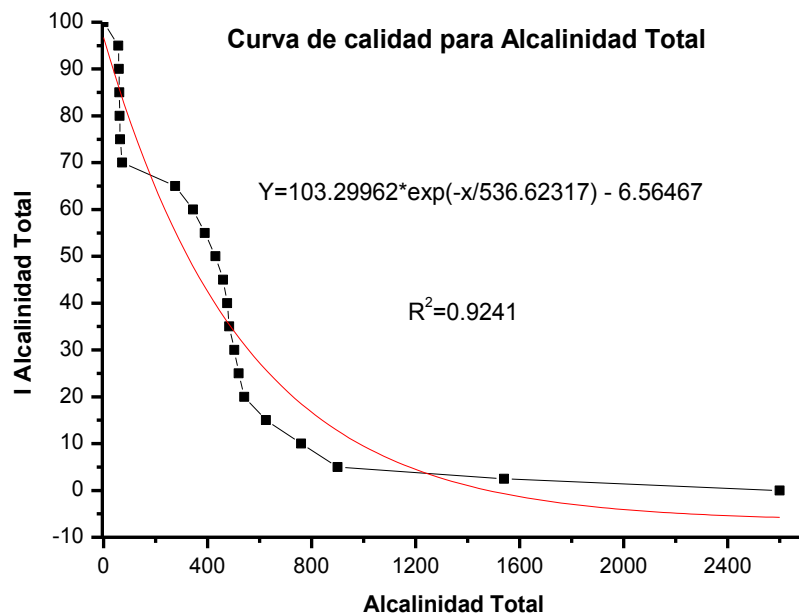


Figura 6. 12 Gráfico de Calidad para Alcalinidad Total

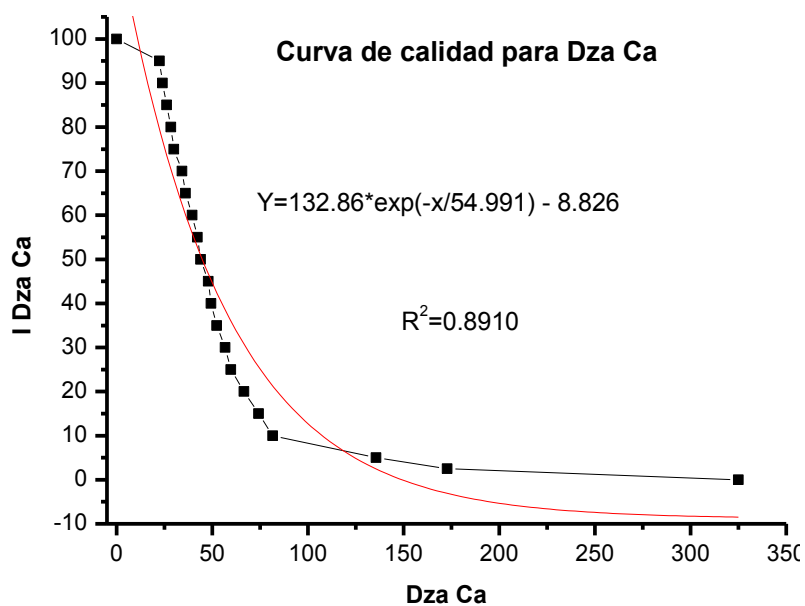


Figura 6. 13 Gráfico de Calidad para Dureza de Ca

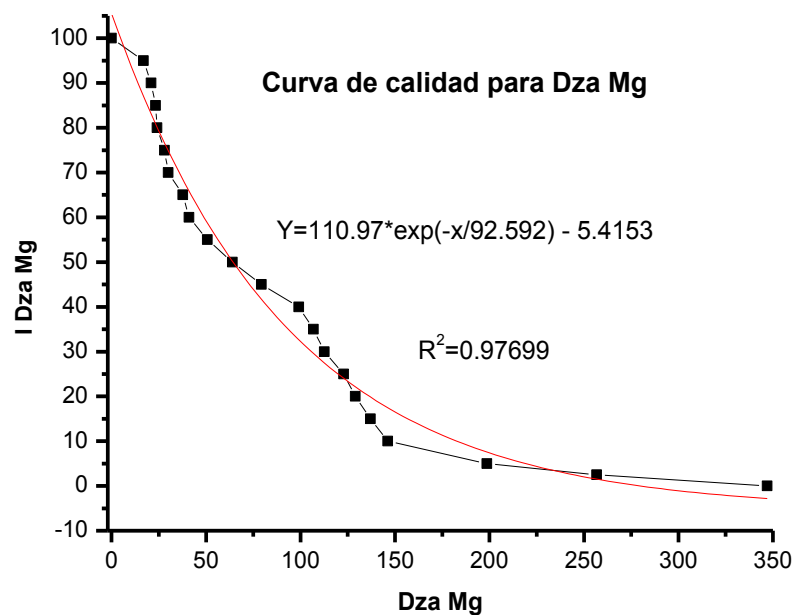


Figura 6. 14 Gráfico de Calidad para Dureza de Mg

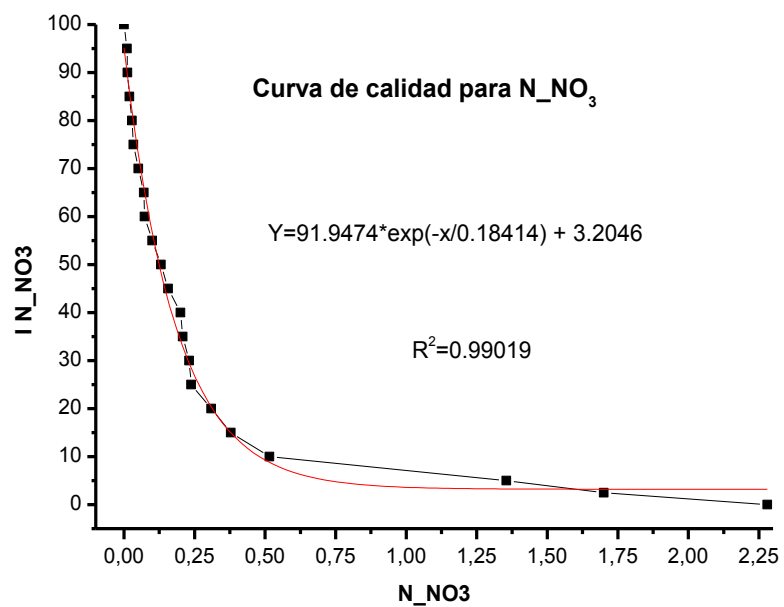


Figura 6. 15 Gráfico de Calidad para Nitratos

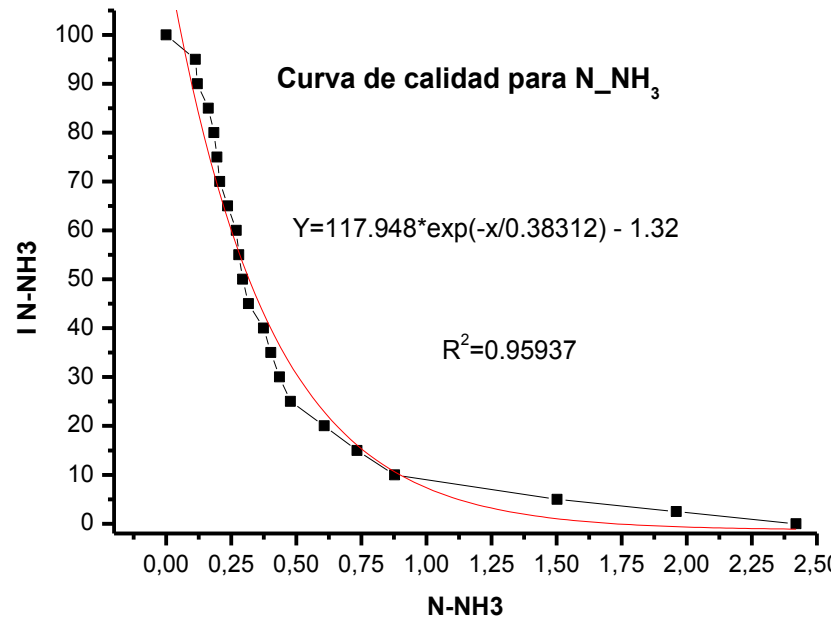


Figura 6. 16 Gráfico de Calidad para Nitrógeno Amoniacal

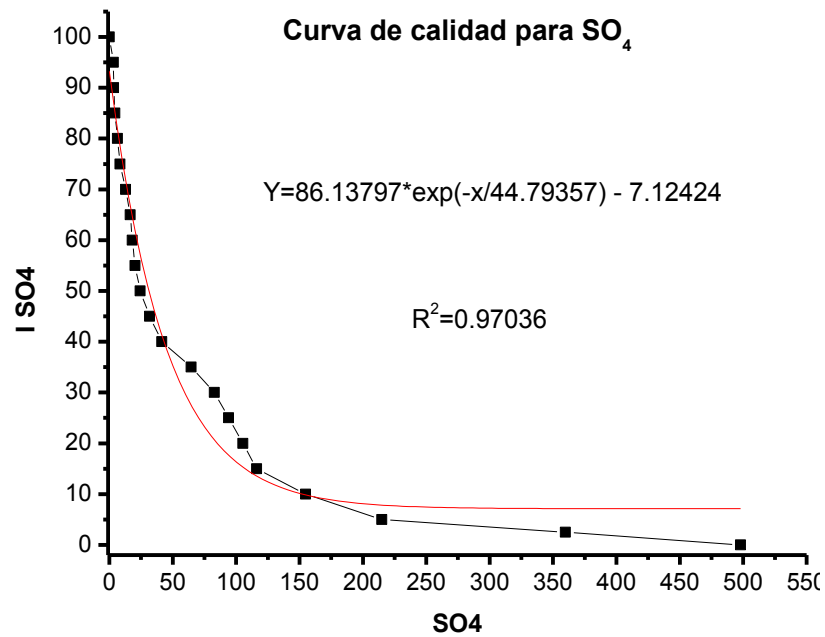


Figura 6. 17 Gráfico de Calidad para Sulfatos

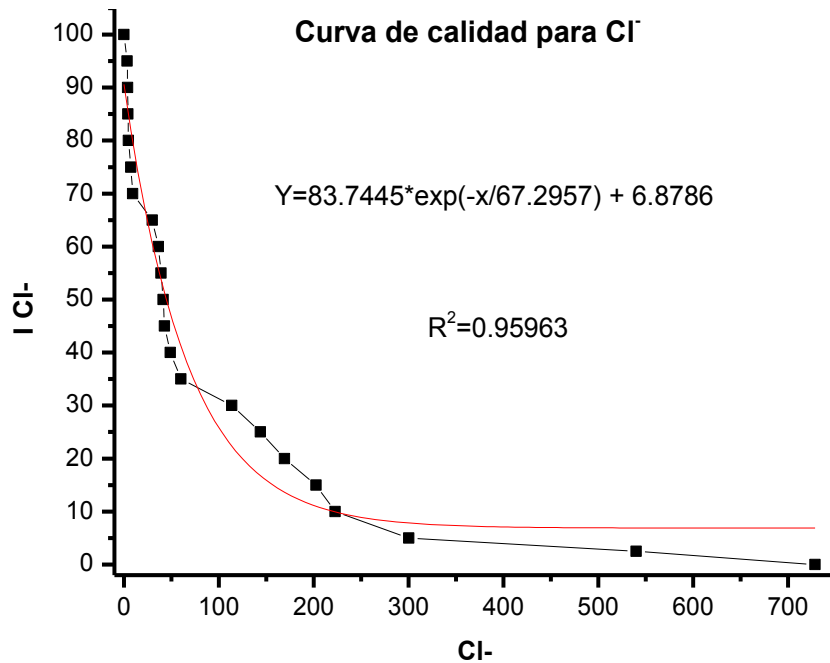


Figura 6. 18 Gráfico de Calidad para Cloruros

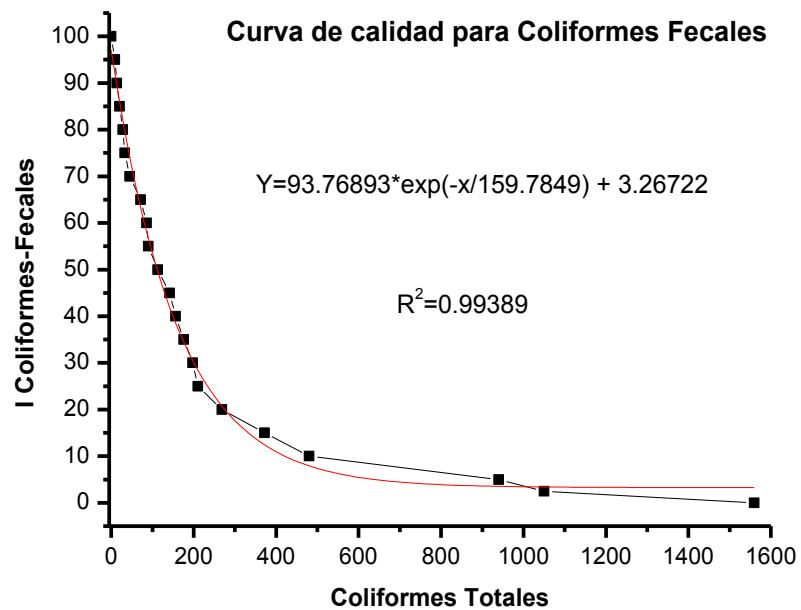


Figura 6. 19 Gráfico de Calidad para Coliformes Fecales

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 23 Ecuaciones de Calidad para cada Sub Índice

Variable	Ecuación	Correlación
SD T	$Y=97.5580 \cdot \exp(-x/748.201) + 2.4414$	0.96158
DBO 5	$Y=101.90 \cdot \exp(-x/30.351) - 1.905$	0.99306
D Q O	$Y=102.56 \cdot \exp(-x/49.210) + 1.8981$	0.9907
Alcalinidad Total	$Y=103.29962 \cdot \exp(-x/536.62317) - 3.30467$	0.9241
Dureza de Calcio	$Y=103.9375 \cdot \exp(-x/54.991) - 3.9324$	0.8910
Dureza de Magnesio	$Y=106.419 \cdot \exp(-x/92.592) - 6.4192$	0.97699
Nitratos	$Y=91.9474 \cdot \exp(-x/0.18414) + 8$	0.99019
Nitrógeno Amoniacal	$Y=100.5435 \cdot \exp(-x/0.38312) - 0.5435$	0.95937
Sulfatos	$Y=86.13797 \cdot \exp(-x/44.79357) + 7.12424$	0.97036
Cloruros	$Y=83.7445 \cdot \exp(-x/67.2957) + 6.8786$	0.95963
Coliformes Fecales	$Y=93.76893 \cdot \exp(-x/159.7849) - 6.56467$	0.99389

6.5 Ponderación y Agregación de los Sub-Índices

Una vez normalizadas las variables es necesario establecer factores de peso los cuales determinen la importancia de cada sub-indicador de acuerdo al interés del índice, para finalmente incorporarlos en el modelo final. Para ello se evaluaron los datos con las ecuaciones del modelo, con la finalidad de eliminar las unidades y trabajar sobre un plano adimensional; se realizaron Análisis de Componente Principales sobre la matriz general y para cada lago, los resultados se resumen en el cuadro 6.24, el cual presenta por lago y de forma general el porcentaje de la variabilidad acumulada en cada componente y las variables que lo integran. Cada componente representa una porción de la variabilidad total, este porcentaje esta principalmente orientado por las variables de mayor valor absoluto, el signo representa la dirección que tienen dentro del componente. Para el caso de Pátzcuaro y Cuitzeo se alcanzó el 70 y 71.5% de la variabilidad acumulada en el cuarto componente, cosa que no ocurrió para Zirahuén el cual, hasta el quinto componente logro el 73% de la variabilidad total, esto en razón al universo de datos que conforma cada matriz. Recordando que el Lago de Pátzcuaro cuenta con datos de siete puntos de muestreo, Cuitzeo con ocho y Zirahuén solo uno, la matriz general está integrada de 16 puntos con características fisicoquímicas diferentes entre un sitio y otro, lo que explica que en menor número de componentes logra alcanzarse el 70% de la variabilidad acumulada.

El primer componente representa la combinación lineal de las variables originales, es un vector asociado a la matriz original que maximiza la variación representada en forma de coeficientes respectivos a cada parámetros, estos pueden presentar direcciones diferentes expresadas mediante signos en el cuadro se encuentran señaladas las variables que dentro del mismo componente presentan deferente sentido (rojo: negativo y azul: positivo).

Todo análisis de componentes principales debe estar acompañado de un análisis de correlaciones, para encontrar las relaciones entre los parámetros y eliminar variables redundantes, por lo que en el cuadro 6.25 se muestran las

correlaciones más significativas. La Demanda Química de Oxígeno y la Demanda Bioquímica de Oxígeno son dos parámetros altamente correlacionados por lo que se debe prescindir de alguno de ellos, de igual modo la variable Sólidos Disueltos Totales presentó correlaciones considerables con Alcalinidad, Cloruros y Sulfatos, pero a diferencia de las Demandas Química y Bioquímica de Oxígeno, las correlaciones presentes entre Sólidos Disueltos y las demás variables no justifican su objeción ya que es respuesta a ellas en conjunto.

Se eliminó la Demanda Bioquímica de Oxígeno conservando Demanda Química de Oxígeno, ya que esta determina la materia orgánica degradable determinada mediante la DBO5 más la materia inorgánica oxidable; las variables Cloruros y Sulfatos presentaron altas correlaciones en la matriz general pero no es posible asumir que se habla de la misma variable, son iones que se encuentran determinados indirectamente por los sólidos disueltos totales pero no redundantes. Con las diez variables conservadas se corrieron análisis de componentes principales para cada matriz, las variables que formaban parte de los componentes en el primer análisis se mantuvieron, en algunos casos cambiaron de un componente a otro, manteniendo las mismas variables y disminuyendo la variabilidad acumulación (cuadro 6.26).

Cuadro 6. 24 Análisis de Componentes Principales.

MATRIZ		GENERAL		PÁTZCUARO		CUITZEO		ZIRAHUEN
Comp	%	Variables	%	Variables	%	Variables	%	Variables
1	46	SDT; DQO; SO4; Cl; AlcTot	29	SDT; AlcTot	33	SDT; Cl; AlcTot	23.5	DQO; DBO5
2	60	Dza Mg	49	DQO; DBO5	51	DQO; DBO5	41.5	SDT(-); NO3(+)
3	70	(+)NO3; (-) NH3; (+)ColFec	61	Dza Ca;NO3	61.5	Dza Mg(+); NH3(-)	53.5	SO4(-); ColFec(+)
4	79	NO3;NH3;	70	NH3	71.5	NO3;ColFec	64	NH3
5	87	(+)Dza Ca;(-)NO3	78	(-)NO3; (+)NH3; (+)ColFec	80	NH3	73	NH3
6	93	ColFec	85	Dza Ca; ColFec	87.5	(+)NO3; (-)ColFec	82	NO3; AlcTot

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 25 Análisis de Correlaciones.

Matriz General		Matriz Pátzcuaro		Matriz Cuitzeo		Matriz Zirahuen	
Variables	Corr	Variables	Corr	Variables	Corr	Variables	Corr
DQO-		DQO-		DQO-		DQO-	
DBO5	0.9810	DBO5	0.8604	DBO5	0.9771	DBO5	0.9316
SO4-CI	0.8945	SDT-CI	0.5613	SDT-CI	0.8336	SDT-CI	0.4168
SDT-CI	0.8734	SDT-SO4	0.3490	SDT-SO4	0.6446		
SDT-SO4	0.7673	SDT-AlcTot	0.9161	SDT-AlcTot	0.7921		
SDT-AlcTot	0.9301						
SDT-DQO	0.7330						
SDT	0.7287						
DQO-SO4	0.7352						
DBO5-SO4	0.7526						
DQO-CI	0.7526						
DBO5-CI	0.7352						

En el análisis de componentes principales para la matriz general induce a prescindir del indicador de Dureza de Calcio, propuesta que es analizada ya que al revisar los resultados arrojados por los ACP's de cada lago, se observó que para Zirahuén la Dureza de Calcio forma parte del primer componente, al igual que cloruros y solidos disueltos totales. De acuerdo con Vergara (2005), las sales disueltas presentes en Zirahuén están dadas principalmente por bicarbonatos y bajo valor de calcio y magnesio, considerándose como de aguas blandas, presentando mayor cantidad de calcio que magnesio, caso contrario para Cuitzeo el cual de acuerdo con la CONABIO (2005) reporta que aproximadamente el 13.2% de sus sales son por magnesio y un 8.2% por calcio, las restantes provienen de bicarbonatos y en mínima cantidad de

carbonatos principalmente de unión con ion sodio. Cabe señalar que estas diez variables son de importancia variada para el índice pero las posicionadas en los primeros componentes al incrementar la variabilidad en el primer componente habla de las variables que claramente permiten categorizar, por lo que se corrió un nuevo ACP tomando solo las variables de mayor peso en los tres primeros componentes para la matriz general: Cloruros, Solidos Disueltos Totales, Sulfatos, Demanda Química de Oxígeno, Alcalinidad Total, dureza de Magnesio, Nitratos, Nitritos y Coliformes Fecales, a partir del cual se generó la propuesta de ponderación de las variables El cuadro 6.26 reporta la variabilidad que se logra en cada componente, las variables que lo integran y el valor de cada variable dentro del eigenvector.

Cuadro 6. 26 ACP para ponderación.

Comp	Variabilidad	Variable; Eigen Valor				
1	47.17%	Cl	SDT	SO4	DQO	Alc_Tot
		0.46561	0.45588	0.43638	0.41889	0.40748
2	13.73%	Dza Mg	Col_Fec			
		0.73989	-0,47944			
3	11.52%	N_NO3	N-NH3			
		71.424	-0,65781			

Tomando la sumatoria de la variabilidad y ajustándola a una variabilidad acumulada de 100 se realizó un ajuste porcentual y de relación de peso de cada variable, generando las ponderaciones reportadas en el cuadro 27.

Cuadro 6. 27 Ponderación de las variables.

Variable	Fp	Variable	Fp	Variable	Fp
Cl	15.2	Dza Mg	13.5	N_NO3	8
SDT	11.3	Col_Fec	8	N_NH3	7.5
SO4	12.6				
DQO	13.9				
Alc_Tot	10				

Fp=factor de ponderación

Una vez asignados los pesos de cada variable se generó el método de agregación, estableciendo el modelo de promedios ponderados, ya que si por algún motivo llega a faltar alguna variable, esta no afectara sobre la determinación del índice respecto a las existentes, solo no será evaluado ese parámetro en conjunto con los demás, castigando limitadamente al índice global.

“Índice de valoración fisicoquímica de la calidad del agua en los sistemas lénticos en el Estado de Michoacán”.

De los análisis anteriormente realizados, se obtuvo un índice que consiste en una suma ponderada de las variables más explicativas de la variación en las columnas de agua medidas, estas son: Sulfatos (SO₄), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Cloruros (Cl), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Alcalinidad (AlcTot), Dureza de Magnesio (DzaMg), Coliformes Fecales (ColFec), Nitratos (N_NO₃) y Nitritos(N_NO₃).

$$IFCA_{EM} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n fp} \sum_{i=1}^n I_i fp_i$$

Dónde:

IFCA_{EM}= Índice de valoración fisicoquímica de la calidad del agua

I_i= Sub-índice de Calidad de cada variable

fp= factor de ponderación de cada variable

n= Número de variables evaluadas

6.6 Validación del Índice de Calidad del Agua

Para evaluar si el índice es capaz de formar grupos coherentes, se realizó una categorización preliminar *a priori* de los sitios con base al conocimiento de expertos en regiones próximas a ellos (Cuadro 6.28).

Cuadro 6. 28 Clasificación a priori de los sitios.

Lago	Sitio	Clasificación
Pátzcuaro	Área De Islas	II
	Cuello Del Lago	III
	Janitzio-Pátzcuaro	II-III
	Muelle Principal	V
	Seno Erongaricuario	III
	Seno Janitzio	IV
	Seno Quiroga	III
Cuitzéo	Chehuayo	II-III
	Estación Querendaro	V
	Frente Cuitzeo	IV
	Irámuco	IV
	La Ortiga	IV-V
	La Palma	III
	Mariano Escobedo	IV
	Vaso Poniente	IV
Zirahuén	Lago Zirahuén	I

Con la clasificación *a priori* se realizó un primer análisis de discriminantes, tomando como variables independientes los índices de cada variable y como variable dependiente las categorías, éste arrojó que el 37.36% de los sitios se encontraban mal clasificados, en el cuadro 6.29 muestra el escaso agrupamiento de los sitios conforme esta clasificación, el modelo permite agrupamiento de datos pero no de la forma supuesta, por lo que fue necesario establecer una segunda clasificación que permitiera definirlo.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cuadro 6. 29 Análisis de discriminantes para clasificación a priori.

Lago	Sitio	Clasificación	No. Muestreos	Mal Clasificados
Pátzcuaro	Área De Islas	II	34	32
	Cuello Del Lago	III	34	7
	Janitzio-Pátzcuaro	II-III	34	32
	Muelle Principal	V	34	10
	Seno Erongaricuario	III	34	30
	Seno Janitzio	IV	34	17
	Seno Quiroga	III	34	8
Cuitzeo	Chehuayo	II-III	35	31
	Estación Querendaro	V	31	0
	Frente Cuitzeo	IV	34	3
	Irámuco	IV	39	2
	La Ortiga	IV-V	41	1
	La Palma	III	26	25
	Mariano Escobedo	IV	40	3
	Vaso Poniente	IV	25	0
Zirahuén	Lago Zirahuen	I	54	0

Para poder establecer una nueva categorización, es necesario saber: ¿porque la clasificación propuesta inicialmente no agrupó a los sitios de la forma predicha? ¿sí las variables resultantes del análisis de componentes principales en efecto tienen la capacidad de discriminar? y ¿sí el modelo final permite formación de gremios bajo el mismo criterio de agrupación? La interrogante a estas de estas tres cuestiones fue despejada, con la ejecución de análisis de varianzas.

Al realizar los análisis de varianzas asignando las categorías como variable independiente y las como variables dependientes a Solidos Disueltos, Cloruros, Sulfatos, Demanda Química de Oxígeno, Alcalinidad Total, Dureza de Magnesio, Coliformes Fecales, Nitrógeno Amoniacal y Nitratos; permitió

visualizar que los sitios no corresponden a la clasificación *a priori* inicial, ya que el sentido ascendente de las categorías no se comportan de acuerdo a la disminución de la calidad en los sub indicadores, se aplicaron análisis de varianza mediante la prueba Tukey-Kramer, con un nivel de significancia $P < 0.05$ la figura 6.20 muestra los resultados arrojados, puede notarse que la distribución de las medias para cada sub indicador respecto a la clasificación *a priori* no presentan un agrupamiento sucesivo, originando la falta de respuesta en la discriminación de los datos. Las variables presentes en el primer componente del ACP realizado para ponderar el modelo, al igual que sólidos disueltos, presentan un comportamiento similar; las categorías III, IV y V se encuentran bajo rangos de existencia similares, cabe resaltar que la categoría IV presentó valores mayores a la categoría V sin definir agrupamientos entre una y otra. El comportamiento de las variables explica el porqué, los sitios que se esperaba presentaran una calidad, tendían a presentar con altas probabilidades una o dos categorías más, esto también es consecuencia de variables como nitratos y nitritos que ante estas categorías no presentan discriminación.

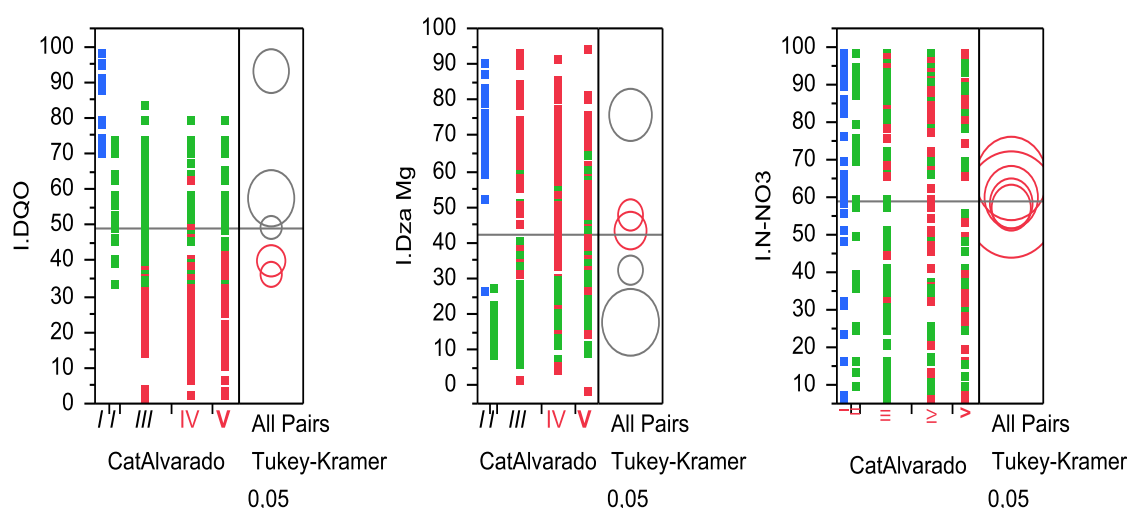


Figura 6. 20 Comparación de medias Clasificación vs I.DQO, I. Dza Mg, I. N_NO3

Una vez resuelta esta incógnita fue necesario conocer si los parámetros considerados en el modelo final poseen la capacidad de formar gremios, para ello se aplicaron a cada parámetro análisis de varianza por sitio y por lago.

Las variables del primer componente Cloruros, Solidos Disueltos Totales, Sulfatos, Alcalinidad Total y Demanda Química de Oxígeno, presentan el mismo comportamiento de forma general por tipo de lago; la dureza de magnesio y coliformes presentan una variante al comportamiento de las anteriores pero con diferencias que permiten hacer clasificaciones, estas clasificaciones median el sentido de las anteriores, dicho de otro modo, sitios que evaluados por las variables del primer componente serian sumamente castigados estas variables permiten agregar un criterio que amortigüe tal calificativo, las variables Nitratos y Nitrógeno Amoniacal a pesar de mostrarse como variables que no permitan agrupaciones de acuerdo a su distribución es otro criterio considerado importante para evaluar en conjunto a las demás variables suposición corroborada mediante los estadísticos aplicados al momento (figura 6.21).

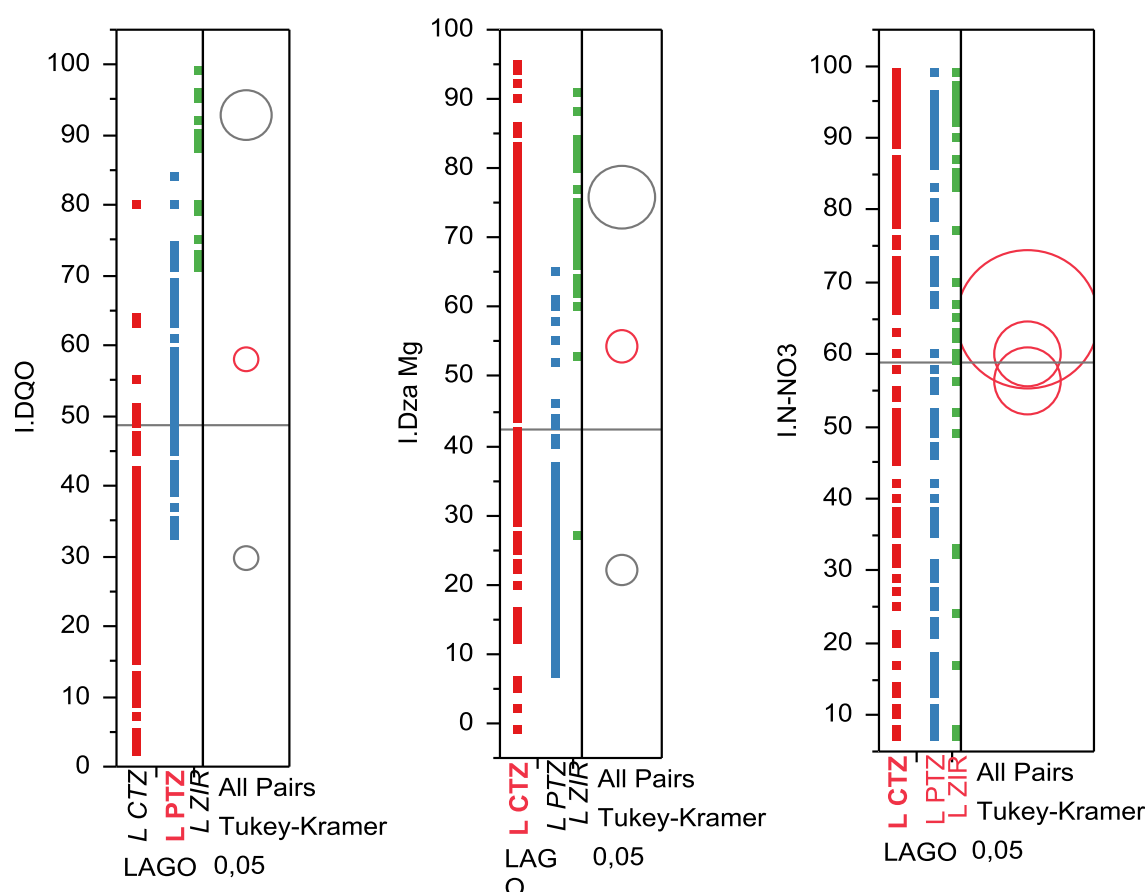


Figura 6. 21 Análisis de varianza por tipo de lago para parámetros integrantes del modelo final (panorama general).

El aplicar análisis de varianza por sitio para cada uno de los indicadores evaluados permitió ampliar el panorama, determinar cuántos grupos podrían ser establecidos, que variables discriminan en mayor grado, cuales sitios pueden ser considerados como sitios de referencia de buena y mala calidad (figura 6.22). Las variables pertenecientes al primer componente del ACP (DQO, SDT, Cl^- , SO_4^{2-} y Alcalinidad Total) colocan dentro de los sitios de mejor calidad a Zirahuén y Muelle Principal, y dentro de las calidades más bajas a Chehuayo, La Palma, Vaso Poniente y Frente Cuitzeo, pudiendo apreciarse en la figura 6.22 a); La figura 6.22 b) muestra la Dureza de Magnesio y los Coliformes Fecales (variables del segundo componente) presentando sitios diferentes en las calidades altas y bajas, lo que confirma el efecto de amortiguamiento de estas variables sobre sitios de altas y bajas calidades. Las variables del tercer componente ilustradas en la figura 6.21 c) no presentan diferencia entre sus medias ni permiten la formación de gremios, ya que su comportamiento es aleatorio. De tal manera que se tiene a Zirahuén y Muelle Principal dentro de los sitios de calidades más altas y dentro de las últimas categorías o sitios más degradados fisicoquímicamente hablando se encuentran: Cheuhayo, La Palma, Vaso Poniente y Frente Cuitzeo. Cada variable marcaba visiblemente diferente número de categorías, de acuerdo al comportamiento de las medias Solidos Disueltos mostro hasta cinco visibles agrupaciones, Demanda Química de Oxígeno tres, Dureza de Magnesio cuatro, Sulfatos cinco, Cloruros siete, coliformes seis y alcalinidad mostró seis gremios a simple vista.

Es necesario examinar si las variables expuestas en el modelo de forma conjunta, permiten establecer gremios o categorías, para ello se realizaron análisis de varianza para los índices evaluados, con y sin ponderación. Los resultados gráficos se muestran en la figura 6.23. En este grafico puede apreciarse como al insertar los parámetros de forma ponderada de acuerdo al ACP en el modelo, la formación de grupos es ve favorecida, lo cual proporciona la base de una nueva categorización.

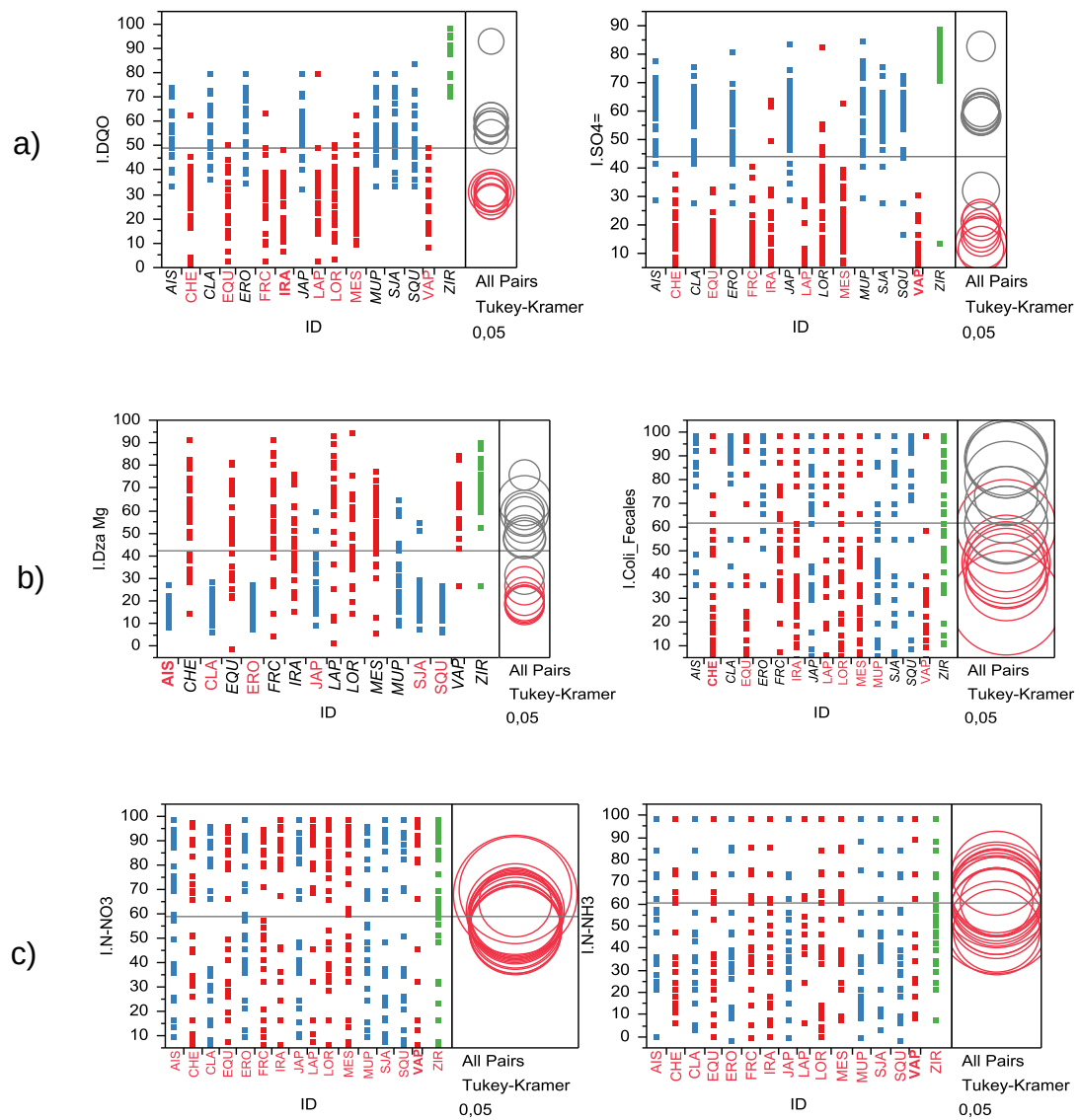


Figura 6. 22 Análisis de varianza para variables de: a) primer componente; b) segundo componente; c) tercer componente

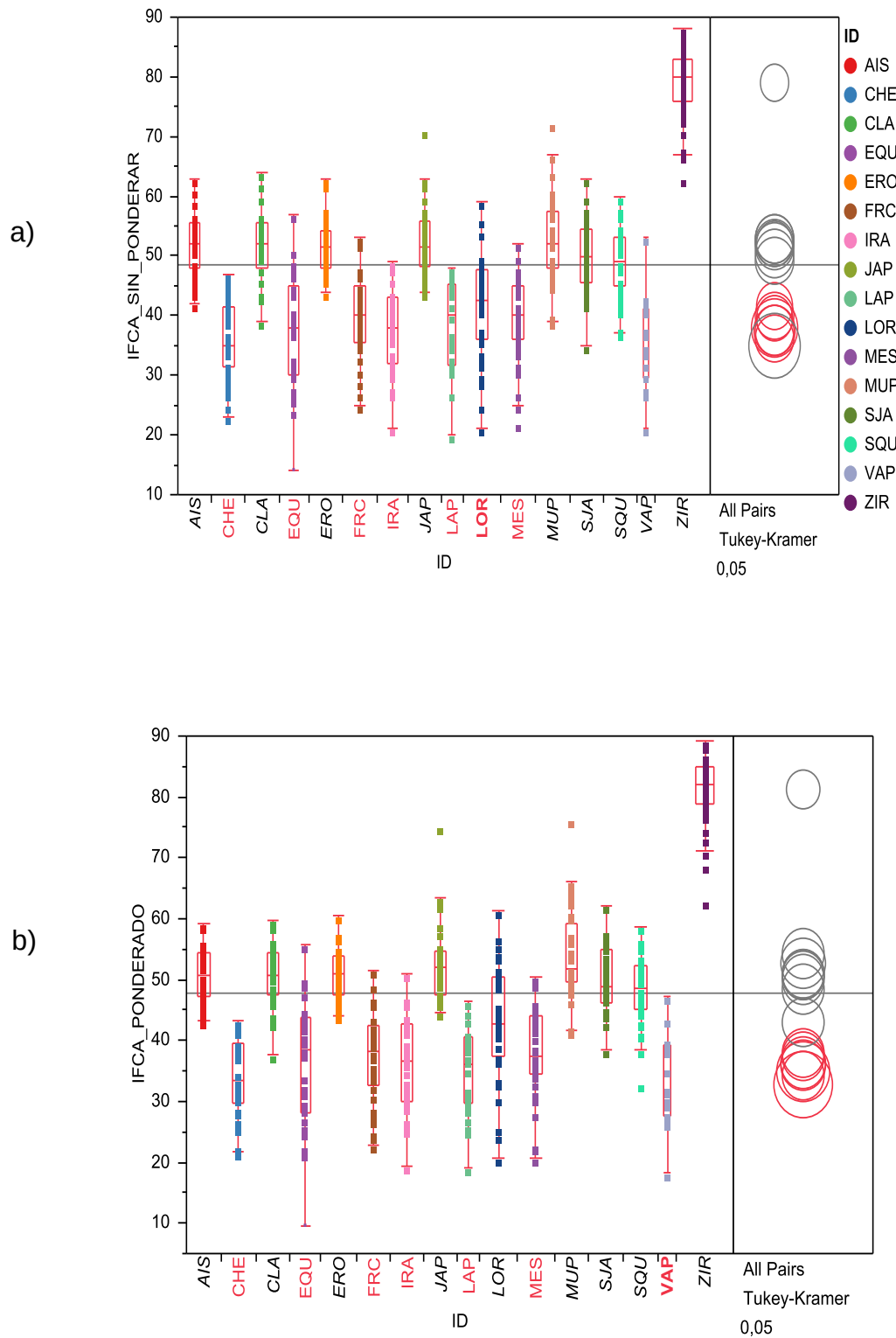


Figura 6. 23 Análisis de varianza por sitio para parámetros integrantes del modelo final (panorama individual): Índices fisicoquímicos de calidad del agua: a) sin ponderar; b) ponderado

La asignación de categorías se realizó combinando dos análisis de distribución de Ys, para los datos del índice ponderado y las medias de los sitios del mismo, tomando como referencia los percentiles: 0, 10, 25, 50, 75, 90 y 100. Se generaron seis categorías considerando el intervalo existente entre Zirahuén y los demás sitios. En el cuadro 6.30 se muestran las categorías generadas para el Índice Físicoquímico de Calidad del Agua y los intervalos en los que se presenta cada categoría.

Cuadro 6. 30 Intervalos de Clasificación para el IFCA

Categoría	Intervalo IFCA
I	80-100
II	65-79
III	50-64
IV	35-49
V	20-34
VI	0-20

Los sitios fueron evaluados y categorizados de acuerdo al valor de su media y al intervalo de correspondencia, con estas nuevas categorías se realizó un análisis de discriminantes para verificar la agrupación de los datos, cabe señalar que estos intervalos de calidad no están orientados al tipo de uso sino al estado físicoquímico presentado puntualmente por el sitio. Las categorías asignadas a cada sitio se muestran en el cuadro 6.31.

Cuadro 6. 31 Clasificación de los sitios de acuerdo a las categorías establecidas.

Lago	Sitio	Clasificación
		IFCA
Pátzcuaro	Área De Islas	III
	Cuello Del Lago	III
	Janitzio-Pátzcuaro	III
	Muelle Principal	III
	Seno Erongarícuaro	III
	Seno Janitzio	III
	Seno Quiroga	IV
Cuitzeo	Chehuayo	V
	Estación Queréndaro	IV
	Frente Cuitzeo	IV
	Irámuco	IV
	La Ortiga	IV
	La Palma	V
	Mariano Escobedo	IV
Zirahuén	Vaso Poniente	V
	Lago Zirahuén	I

Con el objeto de comprobar si el índice ponderado y las variables en conjunto permiten una adecuada agrupación de los sitios, se realizó un nuevo análisis de discriminantes asignando la clasificación IFCA como variable categórica y como variables a los subíndices que integran el modelo como variables independientes.

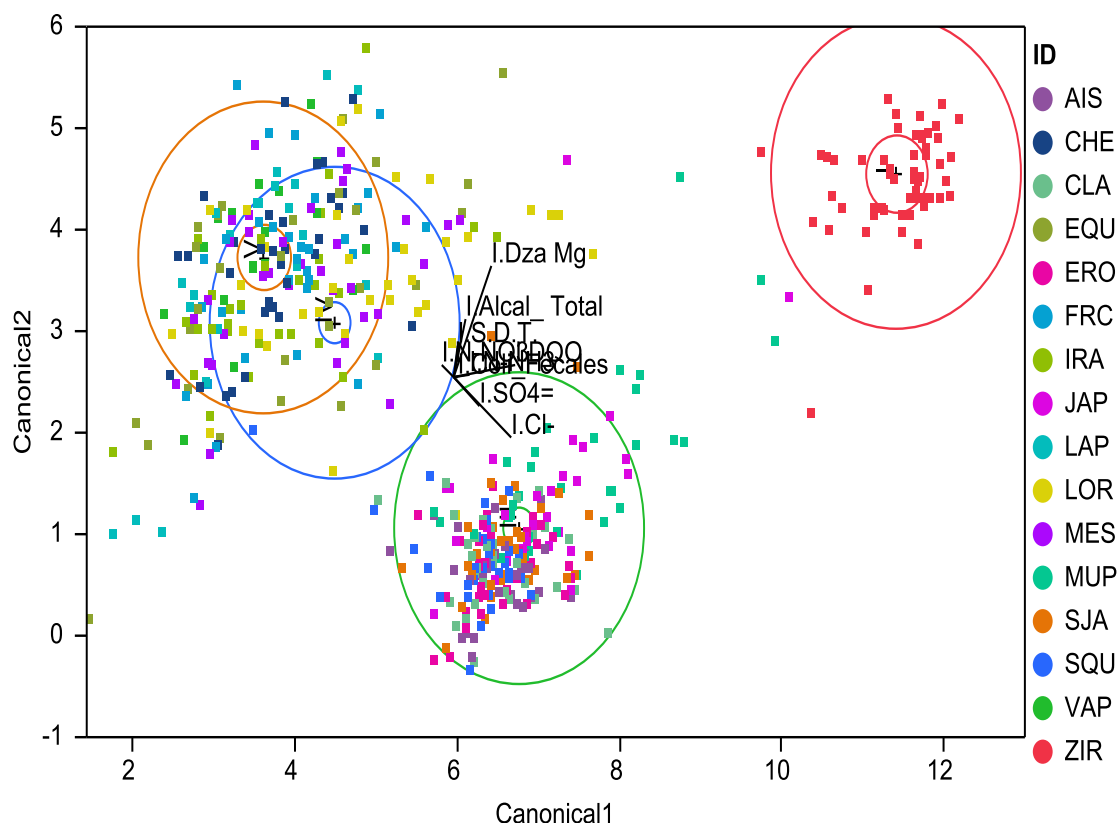


Figura 6. 24 Análisis de discriminantes para la clasificación IFCA.

La figura 6.24 muestra el resultado arrojado por el análisis de discriminantes para la clasificación IFCA asignada de acuerdo a la media aritmética IFCA de cada sitio, en ella pueden observarse cuatro grupos: I, III, IV y V, puede notarse la ausencia de las Clasificaciones II y VI ya que la primera es para valores entre el amplio intervalo de calidad formado entre Zirahuén y Muelle Principal, y la clasificación VI a condiciones fisicoquímicas de mayor degradación, cargas *mayores a la promedio* evaluada por el IFCA. Cada grupo está marcado por dos círculos, el círculo interno representa la media multivalente con un límite de confianza del 95%, marcando una diferencia significativa entre los grupos ya que no hay intersección entre estos, los círculos externos muestran las áreas que llegan a contener hasta el 50% de los datos aproximadamente, lo que puede notarse que existen puntos que pueden comportarse entre las categorías IV y V, marcando mayor comportamiento a

alguna de las dos, al centro de la figura se observa una etiqueta, esta indica el sentido de las variables dentro del modelo y comportamiento de los datos.

El análisis arrojó que el 21.26% de los datos se encontraban mal clasificados siendo este un resultado aceptable, el cuadro 6.32 muestra el comportamiento de los datos.

Cuadro 6. 32 Análisis de discriminantes para clasificación IFCA

Sitio	Clasificación	No. Muestreos	Mal Clasificados	% Mal Clasificados
Área De Islas	III	32	0	0
Cuello Del Lago	III	32	1	3.12
Janitzio-Pátzcuaro	III	31	2	6.45
Muelle Principal	III	32	3	9.37
Seno Erongaricuaró	III	33	0	0
Seno Janitzio	III	32	0	0
Seno Quiroga	IV	32	30	93.75
Chehuayo	V	33	9	27.27
Estación Querendaro	IV	28	6	21.42
Frente Cuitzeo	IV	32	21	65.62
Irámucu	IV	30	11	36.66
La Ortiga	IV	35	6	17.14
La Palma	V	21	6	28.57
Mariano Escobedo	IV	34	14	41.17
Vaso Poniente	V	18	1	5.55
Lago Zirahuén	I	53	0	0

Los resultados marcados en color rojo presentan arriba del 10% de sus datos mal agrupados, recordando que la clasificación a cada sitio se asignó conforme la media global, si un muestreo presenta valores a altos o bajos puede mover la tendencia o el agrupamiento, así como puede que se encuentre en el límite entre una categoría y otra, o bien a cambios en la calidad

por diversos factores como: la degradación natural del sitio, antropogénica, la época o la estación del año. Debido a esto se revisó el comportamiento de los datos mal agrupados, reportándolos en el cuadro 6.33

Cuadro 6. 33 Comportamiento de datos mal clasificados.

Sitio	Clasificación	Mal Clasificados	Clasificación Mal Clasificados
Seno Quiroga	IV	30	III
Chehuayo	V	9	IV
Estación Querendaro	IV	6	V
Frente Cuitzeo	IV	21	V
Irámuco	IV	11	V
La Ortiga	IV	6	4(V); 2(III)
La Palma	V	6	IV
Mariano Escobedo	IV	14	V

A Chehuayo se le asignó una categoría V resultando que el 27.27% de sus datos llegan a comportarse como IV de forma aleatoria, esto es debido a la proximidad de entre un grupo y otro, y a los factores de dilución del ecosistema; en Estación Queréndaro seis datos presentaron de forma aleatoria comportamiento V lo que es equivalente al 21.42% del total de sus datos; muestreos correspondientes a los últimos años para Irámuco se comportaron como V, lo que indica que en los últimos años ha degradado su calidad;

referente a la Ortiga de forma aleatoria, dos de sus muestreos, significando un 5.71% de su total de datos, presentan una categoría III y cuatro representando el 11.42% una categoría V; La Palma de forma aleatoria seis de sus muestreos se acercan a una categoría IV; el comportamiento de Mariano Escobedo de encuentra entre las categorías IV y V, pero presentando mayor inclinación a la categoría más degradada (V); lo que respecta los sitios Frente Cuitzeo y Seno Quiroga el mayor agrupamiento de sus datos se inclina a las clasificaciones V y III respectivamente. Con lo que se realizó un tercer análisis de discriminantes reasignando las categorías a los sitios Frente Cuitzeo y Seno Quiroga, el resultado en dos dimensiones de muestra en la figura 6.25.

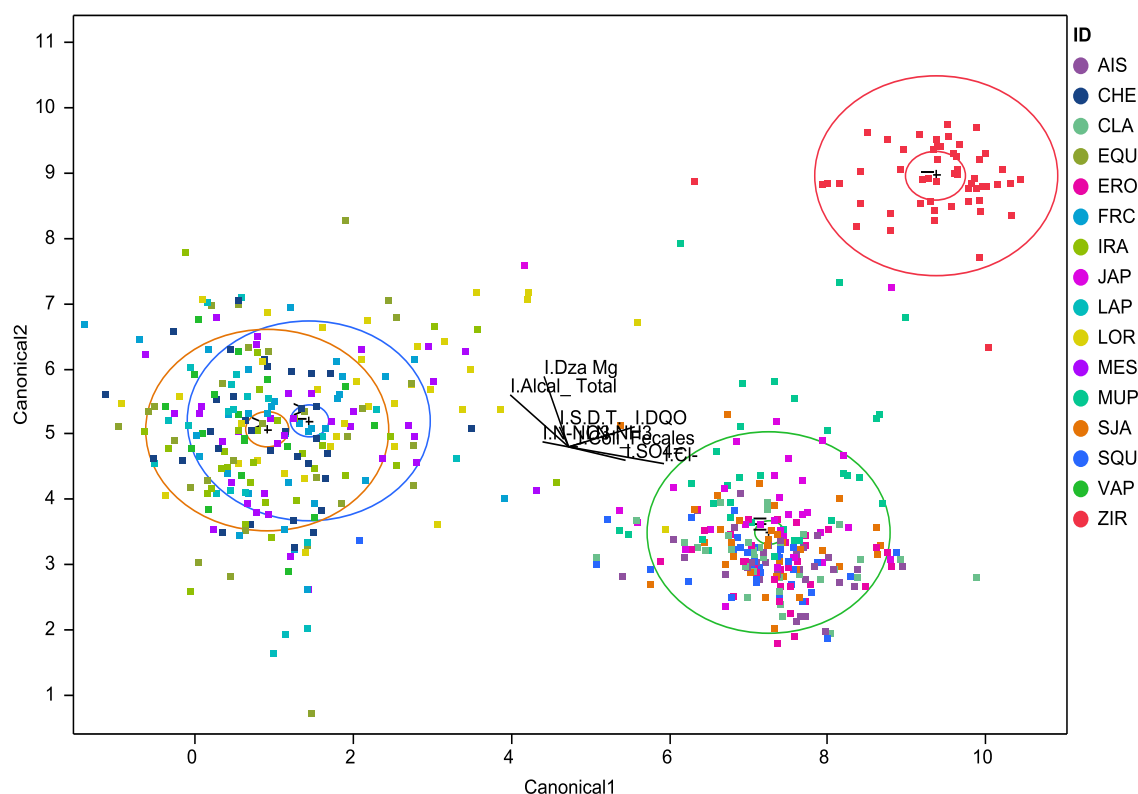


Figura 6. 25 Análisis de discriminantes para la clasificación IFCA.

En este grafico puede apreciarse una mejor definición en los grupos, la cercanía entre las categorías IV y V (debida a la pertenencia de los sitios) y la

dirección de respuesta de las variables. Quedando como clasificación global de los sitios la siguiente:

Cuadro 6. 34 Clasificación global de los Sitios

Lago	Sitio	Clasificación
		IFCA
Pátzcuaro	Área De Islas	III
	Cuello Del Lago	III
	Janitzio-Pátzcuaro	III
	Muelle Principal	III
	Seno Erongarícuaro	III
	Seno Janitzio	III
	Seno Quiroga	IV
	Chehuayo	V
Cuitzeo	Estación Queréndaro	IV
	Frente Cuitzeo	IV
	Irámuco	IV
	La Ortiga	IV
	La Palma	V
	Mariano Escobedo	IV
	Vaso Poniente	V
Zirahuén	Lago Zirahuén	I

En esta última clasificación solo el 13.03% de los sitios se encuentran mal clasificados. Por lo que de acuerdo con Samboni *et al.* (2007), es estadísticamente aceptable y con ello quedó validado el Índice Propuesto.

CONCLUSIONES

El agua es un medio fundamental para la vida gracias a las características fisicoquímicas que presenta, entre ellas su alto calor específico y su gran capacidad para disolver una inmensa cantidad de compuestos químicos, lo que le permiten ser un medio ecosistémico en los cuerpos acuáticos como sucede en los lagos; en estos los factores bióticos y abióticos como lo son: dinámica, profundidad, estructura, nivel de oxígeno, variedad en concentraciones de solutos, sedimentos y temperatura, por mencionar algunos, le dan las variantes que lo caracterizan como ecosistema acuático o bien, como un complejo cuerpo de agua. Estas combinaciones lo hacen único e inigualable.

Así la resistencia al cambio y la resiliencia son dos propiedades importantes, que le confieren a los ecosistemas la tendencia a regresar a su estado original; sin embargo el uso inadecuado y desmedido que al pasar de los años se ha dado en ellos, se han rebasado los límites de interacción entre estas propiedades, llevando incluso a la extinción de algunos ecosistemas tanto acuáticos como terrestres. En consecuencia, el desarrollo de indicadores de calidad y contaminación resultan una herramienta útil para reconocer signos o estados de deterioro mediante un monitoreo constante.

De ahí que en este proyecto se desarrolla un índice de valoración fisicoquímica regional, correspondiente a los cuerpos de agua del estado de Michoacán; partiendo de la información fisicoquímica acumulada por periodos de tiempo considerables, de 16 sitios pertenecientes a lagos michoacanos, en particular a tres: Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén. Este modelo fue generado en seis etapas consecutivas.

Primeramente se realizó un análisis descriptivo de la información disponible, donde se obtuvo una matriz inconsistente formada por 36 variables, y 604 muestreos de 16 sitios. En búsqueda de una matriz consistente se establecieron tres métodos de imputación de datos: imputación por medias no

condicionadas (para variables con 5% máximo de datos faltantes), imputación por medias condicionadas (para una omisión del 5.1% al 15%) y una combinación entre “medias no condicionadas” y una variante al método de “medias condicionadas” de acuerdo a la respuesta de variación de la variable (este se aplicó a variables con una omisión entre el 15.1% y el 30%); en esta etapa se observó que la variación a la que responden algunas variables como pH, nitritos, nitratos y turbiedad, esta debida por la época, asumiendo comportamientos de dilución o concentración; en cambio la variación en la temperatura obedece a la época vales mayores generalmente para primavera y verano y menores para otoño e invierno.

A partir de la matriz consistente se hizo una elección preliminar de variables: con análisis de correspondencia y redundancia mediante la correlación de Spearman, análisis de componentes principales (para la conservación de variables encontradas en los componentes que acumulan el 82% de la variabilidad acumulada) y como último criterio la capacidad de formar categorías mediante usando como herramienta análisis de varianza. En esta etapa la matriz se redujo a 19 variables, midiendo cada una condiciones específicas.

Previo a la normalización se eligieron los parámetros a estandarizar por medio de componentes principales, siendo diez variables las normalizadas, graficadas y precursoras de sub-indicadores. Las ecuaciones generadas permiten evaluar las condiciones presentes en los ecosistemas del estado en función de los niveles de concentración de cada variable, sustentado en las valoraciones reportadas por intervalos de tiempo razonables y en características ampliamente comparables.

El índice fisicoquímico de calidad del agua para sistemas lenticos del estado de Michoacán, está integrado por nueve variables cada una con diferente ponderación (quinta etapa), cinco de estas variables representan el 47.17% de la variabilidad de los datos analizados: Solidos Disueltos Totales, Demanda Química de Oxígeno, Cloruros, Sulfatos y alcalinidad; el 13.73% de

la variabilidad total está dada por las variables: Dureza de Magnesio y Coliformes totales; y el 11.52% de la variabilidad esta explicado por las variables nitritos y nitratos. Con lo que cabe señalar que el índice evalúa aspectos relacionados con su geología, como lo son cloruros, dureza de magnesio, alcalinidad y sulfatos; cantidades necesarias de oxígeno para la oxidación de materia orgánica e inorgánica, respondiendo mayormente a materia orgánica; condiciones de contaminación antropogénica dada por los coliformes y algunos iones como sulfatos, cloruros y nitrógeno amoniacal; y como nutrimentos a los nitritos y nitratos.

Finalmente la validación del índice aseguro que evalúa las condiciones generales de concentración tomando en consideración todas las variantes de los aspectos antes mencionados. Permitiendo categorizar el 86.97 de los datos.

Debido a la estructura y bases del modelo este puede ser usado para: comparar el estado del recurso entre un área y otra; análisis de tendencias en periodos de tiempo, mostrando si la calidad presenta cambios; para la información pública, en sentido de orientación y concientización; y como investigación científica.

Considerando que los índices diseñados para evaluar eutrofización responden principalmente a los cambios de nutrimentos, siendo sensibles para sistemas oligotróficos o niveles tempranos de eutrofia e impredecibles en sistemas oligotróficos; y los índices fisicoquímicos proporcionan una información de la naturaleza de las especies químicas del agua y sus propiedades pero no de la relación de estas con la dinámica del ecosistema. Es necesario un conocimiento detallado sobre la composición de especies, estructura y función de los ecosistemas acuáticos, es la herramienta necesaria para un trabajo completo de conservación y restauración de los medios naturales.

Con el objeto de usar una herramienta adecuada en la toma de decisiones para el manejo y conservación de los recursos hídricos, no es

recomendable usar por si solo el modelo generado en este proyecto, por lo que es recomendable complementarlo con aspectos ecosistémico en futuras investigaciones, para así poder generar un indicador ecológico, que englobe aspectos físicos, químicos y biológicos.

BIBLIOGRAFÍA

Acock, C. A., y Demo, D. 1994. Family Diversity and Well-being, Thousand Oaks, C. A. Sage.

Alcocer, J. y F. Bernal-Brooks. 2010. Limnology in Mexico. *Hydrobiologia* 644: 15-668

Alvarado-Villanueva, R. 2003. Dinámica estacional y circadiana de fitoplancton en el lago de Zirahuén, Michoacán México. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México, 123p.

Antaramián, H.E. y Ortega, J.M. 1996. Riesgo de erosión en la cuenca del lago de Zirahuén y cambio de área y volumen del lago. Ciencia Nicolaita no. 11 U.M.S.N.H. México. 83 – 94 Pp.

Badii, M. H., J. Landeros., y E. Cerna. Daena: International Journal of Good Conscience. 3(1): 661-671. Octubre 2007 – Marzo 2008. ISSN 1870-557X. El recurso de agua y sustentabilidad (Water resource and sustainability)

Ball, R. y Church, R. 1980. Water Quality Indexing and Scoring. Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers. pp.106, 757-771.

Barlow. R.J. 1989. "Statistics A Guide to the Use of Statical Methods in the Physical Science". Second Edition. John Wiley & Sons. New York, NY. 222 Pp.

BCWQI. 1996. Ministry of Enviromental, Lands, and Park. The Water Quality Section. British Columbian Water Quality Status Report. April, Victoria, Bc.

Bernal-Brooks, F. W. 1998. The lakes of Michoacan: a brief history and alternative point of view. Freshwater Forum 10: 20-34. (ISSN 0961-4664).

Bernal-Brooks, F.W., Gómez-Tagle Rojas, A., y Alcocer-Durand, J. 2002. Lake Patzcuaro Mexico: a controversy about the ecosystem water regime approached by field references, climatic variables and GIS. *Hydrobiologia* 467: 187-197. (ISSN/ISBN: 0018-8158). Resumen publicado en ASFA (Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts. No. de acceso 5350214).

Brown R., Macclelland N., Deiningen R. et al., 1970. "A Water Quality Index – Do We Dare?." *Water and Sewage Works*, vol. 11, pp. 339 - 343,

Buck, S.F. 1960. A Method of Estimation of Missing Values in Multivariate Data Suitable for Use With an Electronic Computer. *Journal of the Royal Statistical Society*, B22, 302-306.

Camargo, J. A. y Alonso, A. 2007. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *Revista Ecosistemas*, 16(2).

Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanog.* 22:361–369.

Castagnino, W. A. Polución de Aguas- modelos y control. Lima, Centro anamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1977. Publicación No. 20.

Chacón, T. A. & C. Rosas-Monge. 1998. Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican lake. *Aquatic Ecosystem Health Management Society* 1: 237-243.

CONAGUA. 2010. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México, edición 2010. Mexico. 2010. 46-58.

Cooper, J. A. G., Ramm, A. E. L. y Harrison, T. D. 1994. The Estuarine Health Index: a New Approach to Scientific Information Transfer. *Ocean & coastal management*. 25: 103-141.

De La Lanza Espino, G. y S. Hernández-Pulido .2007.Las Aguas Interiores de México: Conceptos y Casos. AGT. México.695Pp.

De la Mora O.C. 2001. Evaluación de Calidad del Agua en el Lago de Chapala durante 1996-1997. Tesis de Maestría en Ciencias de la Salud Ambiental. Universidad de Guadalajara, 140 p.

Dear, R. E., 1959. A Principal-Component Missing-Data Method for Multiple Regression Models. SP-86. System Developed Corporation, Santa Monica, California.

Diario Oficial de la Federación (DOF). 1989. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua. CE-CCA-001-89. México.

Dinius, S.H., 1987. "Design of a Water Quality Index", W.R. Bulletin, V23, #5. 833-43.

Domenech, X. Peral, J. 2006. Química Ambiental en Sistemas Terrestres. Reverté Barcelona: 239 p.

Duncan, N. and Rzoska, J. 1978. Land use impacts on lake and reservoir ecosystems. IN: Proceedings of the Project 5 Workshops. May 26–June 2. Warsaw, Poland. Facultas Verlag, Wien. 294 p.

e-Local.gob. 2014. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Michoacán. <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM16michoacan/nomenclatura.html>. Accesada en febrero de 2014.

Fernández N., Ramírez A., and Solano F., "Índices Fisicoquímicos de Calidad de Agua un Estudio Comparativo," in Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, Cali, 2003.

Fernández, N. y Solano, F., 2005. Índices de Calidad (ICAS) y de Contaminación (ICOS) del Agua de Importancia Mundial. Colombia Universidad de Pamplona.
http://unipamplona.edu.co/unipamplona/hermesof/portallG/home_18/recursos/01_genral/documentos/12062008/icastest_capitulo2.pdf

Ghislain De Marsily. 2001. El Agua. Siglo XXI. México. 114Pp.

Gliwicz, Z. M. & A. Kowalczewski, 1981. Epi- limnetic and hypolimnetic symptoms of eutrophication in Great mazurian lakes, Poland. *Freshwater Biology*, 11: 425-433.

H. Cepa y A. Pacheco. 2009. “Alternativas a Problemas de la Imputación Clásica de Datos. Una Aplicación al Sistema Nacional Interconectado del Educador”. CIMACYT CÍA. LTDA, Quito, Ecuador.

Horton R. K., 1965. “index-number system for rating water quality,” *Water Pollut*, vol. 307, pp. 300–306.,

IDEAM, 2000. Estudio Nacional del Agua. Colombia. En: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/index.jsf>

Israde–Alcántara, I., Buenrostro, O., Carrillo–Chávez, A., 2005. Geological characterization and environmental implications of the Placement of the Morelia Landfill, Michoacán, Central Mexico: *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55(6), 755–764.

Israde–Alcántara, I., Garduño–Monroy, V.H., 1999. Lacustrine record in a volcanic intra–arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin systeme (Central wester Michoacán, Mexico): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 15(1–3), 209–227.

J. Salazar y S. Delgado., 2003. “Técnicas de Edición e Imputación de Datos Estadísticos”, Proyecto “Depuración de Encuestas Estadísticas”. ISTAC, ULL, FEU.

- Jolliffe, I. T. 2002. Principal Component Analysis, 2ª edición. Springer.
- Kuik, O., Verbruggen, H. 1991. In Search of Indicators of Sustainable Development, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 126 Pp.
- Kung, H., Ying, L., Liu, Y. 1992. A Complementary Tool to Water Quality Indices: Fuzzy Clustering Analysis. Water Resources Bulletin 28(3):525-533.
- Landwehr, J. M. & Deininger, R.A. 1976. A comparison of several water quality indices. Water Pollution Control Fed. __ (5), 957-958. En: Dinius, S.H. (1987). Design of a water quality index, W.R. Bulletin, __ (5), 33-43.
- León Vizcaino, L. F. 1992. Indices de Calidad del Agua. Forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala. Mem. del VIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cocoyoc, Morelos 22 25 de septiembre de 1992.
- Lieberman, H. 1969. Atlas of Water Quality: Methods and Practical Conditions. R. Oldenbourg, Munich.
- Little R., y Rubin D., 2002. "Statistical Analysis with Missing Data". Second edition. John Wiley & Sons, New York.
- Lorenzen, M.W. 1980. The use of chlorophyll Secchi disk relationships. IN: Limnol. Oceanog. 25:371–372.
- Margalef R. 1983. Limnología. Omega, Barcelona: 1010 p.
- Medina F. y Galván M., 2007 "Imputación de Datos: Teoría y Práctica", Publicaciones de las Naciones Unidas, ISSN versión electrónica 1680-8789, julio 2007.
- Megard, R.O. et al. 1980. Light, Secchi disks and trophic states. IN: Limnol. Oceanogr. 25(2):373–377.

Molina León, I., 2011. "Evaluación de la calidad del agua de la red hidráulica superficial de la parte sur-sureste del municipio de Morelia, Michoacán: hacia un modelo de gestión". Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría, Morelia, Michoacán, México.

Monge-Nájera, J. Gómez Figueroa P. , Rivas Rossi, M. 2002. Biología General. EUNED. Costa Rica. 521Pp.

Montoya, H., Contreras, C., García, V.1997. Estudio Integral De La Calidad Del Agua En El Estado de Jalisco. Com. Nal. Agua., Geren. Reg. Lermasantiago. Guadalajara. 106 Pp.

Munn C.B. Marine Microbiology: ecology and applications. New York: BIOS Scientific Publisher; 2004.

National Academy Of Science (NAS). 1975. Planning for Enviromental Indices. A Report of the Planning Committee on Enviromental Indices. National Academmy of Science. Washington.

National Academy of Science (NAS). 1975. Planning for Enviromental Indices. A Report of the Planning Committe on Enviromental Indices. National Academy of Science. Washington.

NSF. 1970. Basin Water Quality Information References. National Sanitation Foundation Water Quality Index.

Ohle, W. 1934. Chemische Und Physikalische Untersuchungen Norddeusher Seen. Arch. Hydrobiol. 36: 386-464.

Orbe, A. y J. Acevedo. 2002. El Lago de Pátzcuaro. En De la Lanza-Espino, G. y J. L. García-Calderón (Compiladores). Lagos y Presas de México. AGT editores. México: 127-169

Orbe-Mendoza, A. & J. Acevedo. 2002. El Lago de Pátzcuaro. In: De la Lanza-Espino, G. & J. L. García-Calderón (Comps). Lagos y presas de México. AGT Editor, México D.F. 127-148.

Oregón DEQ, 1980. Assessment of Oregon's Water Quality and Wather Pollution Control Programs Oregon Department of Enviromental Quality, Portland, Oregon.

Ott, W. R. 1978. Environmental Indices. Theory and Practice. Ann Arbor, Michigan. 371 pp.

Pérez-Munguía, R.M. 2004. Patrones y procesos determi- nantes para el establecimiento de las asociaciones de macroinvertebrados acuáticos en manantiales cársticos de la Huasteca Mexicana. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Puerta Goicoechea, A. 2002. "Imputación Basada en Arboles de Ramificación". EUSTAT.

R.Walpole Y H. Myers. 1992. "Probabilidad y Estadística" Cuarta Edición. McGraw-Hill. Pp797.

Ramos Olmos, R. Sepúlveda Márquez, R. y Villalobos Moreno, F. 2002. Agua en el Medio Ambiente: Muestreo y Análisis, Mexicali, Baja California: 212 p.

Richardson, A. M., 1997. Development of an estuarine water quality index (EWQI) for New South Wales. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of batchelor of science (Honours), University of Sydney. 148 pp.

Rodríguez Mellado J. M., Marín Galvín, R. 1999. Ediciones Díaz de Santos. Madrid España. 466Pp.

Rodríguez, E. Ramos, A. Romero et al., Z. “Aplicación de un Índice de Calidad Acuática en cuerpos de agua de Tabasco, México,” CEPIS, 1997.

Roldán Pérez, G. A. Ramírez Restrepo, J. J. 2008. Fundamentos de Limnología Neotropical. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. 440Pp.

Roldán-Pérez, G. A. y Ramírez-Retrepo J. J. 2008. Fundamentos de Limnología Tropical: 440Pp.

Roldan-Pérez, G. y Ramírez Restrepo, J.J. 1999. Fundamentos de limnología neotropical. Editorial Universidad de Antioquia. Segunda edición. Colombia. 442p.

Ruiz Sevilla, G. 2002. Variaciones morfométricas del lago de Zirahuén, Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Biología. UMSNH. pag.100.

Salas, H & Martino, P. 1996. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutrofización en lagos cálidos tropicales. Programa Regional CEPIS/HEP/OPS 1981-1990. Lima, CEPIS.

SAS Institute 2008. JMP v. 8. SAS Institute Inc.

Schindler, D. W. 1988. Experimental studies of chemical stressors on whole lake ecosystems. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol. Verh. 23: 1 I-4 1.

Schuschny A. y Soto H. 2009. “Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible”, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Secretaría de Economía 2001c. NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-012-1980).

Secretaría de Economía 2001d. NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas

naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-028-1981).

Secretaría de Economía 2001e. NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-030-2001).

Secretaría de Economía 2001f. NMX-AA-026-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de nitrógeno total Kjendahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-026-1980).

Secretaría de Economía 2001g. NMX-AA-099-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-099-1987).

Secretaría de Economía 2001h. NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-029-1981).

Secretaría de Economía 2001i. NMX-AA-039-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-039-1980).

Secretaría de Economía 2001j. NMX-AA-008-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación del pH- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-008-2000).

Secretaría de Economía 2001k. NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua- Determinación de la conductividad eléctrica- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-093-1984).

Secretaría de Economía 2001l. NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de Acidez y Alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-036-1980).

Secretaría de Economía. 2001. NMX-AA-045-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de color Platino-Cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-045-1981).

Secretaría de Economía. 2001a. NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-038-1981).

Secretaría de Economía. 2001b. NMX-AA-005-SCFI-2001. Análisis de agua- Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Cancela a la NMX-AA-005-1981).

Shiow Mey, L., Shang Lien, L. y ShanHsien W., 2004. A Generalised Water Quality Index for Taiwan. Environmental Monitoring and Assessment, 96 35.

Stambuk-Giljanovic. 1999. Water quality evaluation by index in Dalmatia. Wat. Res.33 (16), 3423-3440. Elsevier Science Ltd.

Stojda A., Dojlido J. y Woyciechowska J. 1985. Water quality assessment with water quality index, Gospod. Wod. 12, 281-284.

Thomann, R., Mueller, J. 1987. Principles of surface water quality modeling and control. HarperCollinsPublishers Inc. New York. USA. 644 p.

Useche L. y Mesa, D. 2006. "Una Introducción a la Imputación de Valores Perdidos", Terra Nueva España, ISSN (versión impresa):1012-7089, Caracas Venezuela.

V. Gavidia Catalán, J. Rueda Sevilla. 2006. ¡¡Agua!!.. Centro de Investigación y Documentación Educativa. España. 175Pp.

Van Helmond, C.A.M. & R.M.A. Breukel. 1996. Physico-chemical water quality indices. Proceedings MTM-II-Posters-Surface Waters. 475-479.

Vergara de Paz, Y. 2005. Evaluación de la dinámica de nutrimentos del lago de Zirahuén, Michoacán México. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México, 69p.

Vidal- Abarca Gutiérrez, M. R. Suárez Alonso, M. L. Gómez Cerezo, R. Ramírez-Días L. 1994. Ecología de aguas continentales: prácticas de limnología, Volumen 1. EDITUM. Murcia. 266Pp.

Villaseñor Gómez, L. E.. 2005. La biodiversidad en Michoacán: estudio de estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. 266 Pp.

Vollenweider, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Tech. Rep. Organisation of Economic Cooperation and Development. pp. 5–160.

Walski, T. M. and F. L., Parker. 1974. Consumers Water Quality Index. J. Environ. Eng. Div., Am. Soc. Civil Eng. 593-611 pp.

WEP, 1996. Lowe Great Miami Watershed Enhancement Program (WEP). Miami Valley River Index.

Wickline, V. B., Nowicki, S., Bollini, A. M., & Walker, E. F. 2012. Vocal and facial emotion decoding difficulties relating to social and thought problems: Highlighting schizotypal personality disorder. Journal of Nonverbal Behavior, 36(1), 59-77.

Wilks, S. S. 1932. Certain generalizations in the analysis of variance, Biometrika 24, 471-494.