



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN DE
METALES EN SEDIMENTOS DE LA LAGUNA MAGDALENA
DEL SISTEMA LACUSTRE DE ATILLO DEL PARQUE
NACIONAL SANGAY**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR: ALEX FABRICIO CAMPUSANO MIRANDA

DIRECTOR: Ing. ANDRÉS AGUSTÍN BELTRÁN DÁVALOS MSc.

Riobamba - Ecuador

2022

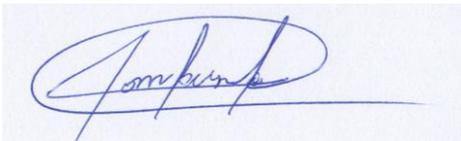
©2022, Alex Fabricio Campusano Miranda

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, ALEX FABRICIO CAMPUSANO MIRANDA, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 19 de Marzo de 2022



Alex Fabricio Campusano Miranda

CI:092356978-4

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal de Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular, Tipo: Proyecto de Investigación; **EVALUACIÓN DE ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN DE METALES EN SEDIMENTOS DE LA LAGUNA MAGDALENA DEL SISTEMA LACUSTRE DE ATILLO DEL PARQUE NACIONAL SANGAY**, de responsabilidad del señor **ALEX FABRICIO CAMPUSANO MIRANDA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Juan Carlos Gonzáles García MSc PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-05-27
Ing. Andres Beltrán Dávalos MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-05-27
Dra. Madgy Mileni Echeverría Guadalupe PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-05-27

DEDICATORIA

El presente Trabajo de Integración Curricular se lo dedico a mis padres Luis y Patricia, los pilares muy importantes en mi vida, quienes me han otorgado su apoyo y consejos incondicionales a lo largo del camino de mi vida sin ningún reproche e incentivándome a crecer cada día más, llevándome con su esfuerzo a donde estoy hoy en día. A todos mis amig@s que formaron parte de mi crecimiento personal, especialmente a Mayte Rodríguez por compartir conmigo buenos y malos momentos que a la larga quedaran en nuestras memorias como gratos recuerdo para memorar.

Alex

AGRADECIMIENTO

Un grato agradecimiento a DIOS, por darme la vida y permitirme con su bendición y protección concluir esta etapa de mi existencia. A mi Familia y en especial a mis padres, por sus consejos y palabras de aliento que siempre me han recalcado, por tener fe en mí y por el orgullo que represento para ellos. A mis compañeros que han estado a lo largo del camino de formación académica pero en especial a Mayte Rodríguez quien a más de ser una buena amiga es una gran persona quien supo estar en los buenos y malos momentos. Agradecer extensamente y de manera muy afectuosa a los ingenieros Andrés Beltrán y Freddy Armijos, más que docentes, buenos amigos y personas que me extendieron su apoyo y aportaron enormemente para la consecución correcta de este trabajo, gracias a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo principalmente a la Facultad de Ciencias y a todos sus docentes por la oportuna formación académica y profesional que me han brindado a lo largo de mi carrera.

Alex

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRAFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Antecedentes de la investigación.....	5
1.2. Bases Teóricas.....	6
1.2.1. Cuenca hidrográfica.....	6
1.2.2. Sistema lacustre.....	7
1.2.2.1. Lago oligotrófico.....	8
1.2.2.2. Lago mesotrófico.....	8
1.2.2.3. Lago eutrófico.....	8
1.2.3. Funciones ecosistémicas de las lagunas.....	9
1.2.4. Sedimentos lacustres.....	9
1.2.4.1. La materia orgánica en sedimento lacustre.....	10
1.2.4.2. El ciclo del carbono en sedimentos lacustres.....	11
1.2.5. Nutrientes del Agua.....	12
1.2.6. Macronutrientes.....	12
1.2.6.1. Nitrógeno.....	12
1.2.6.2. Fósforo.....	13
1.2.7. Ciclos biogeoquímicos de los nutrientes.....	14
1.2.7.1. El ciclo del nitrógeno en sedimentos lacustres.....	15
1.2.7.2. El ciclo del fósforo en sedimentos lacustres.....	16
1.2.8. Incidencia de los nutrientes en los sedimento lacustres.....	17
1.2.9. Cationes intercambiables.....	18
1.2.10. Metales pesados y elementos traza.....	18
1.2.11. Afectaciones de metales pesados en el ambiente.....	19

1.2.11.1.	<i>Afectación por manganeso</i>	19
1.2.11.2.	<i>Afectación por plomo</i>	19
1.2.11.3.	<i>Afectación por cadmio</i>	19
1.2.11.4.	<i>Afectación por aluminio</i>	20
1.2.11.5.	<i>Afectación por hierro</i>	20
1.2.12.	<i>Geo-disponibilidad de metales pesados y elementos traza</i>	20
1.2.13.	<i>Procesos naturales que incrementan los metales en sistemas lacustres</i>	20
1.2.13.1.	<i>La estratificación estacional en el ciclo de los metales</i>	21
1.2.13.2.	<i>Cambios en fisicoquímicos y potencial redox</i>	21
1.2.14.	<i>Movilidad de metales pesados en sedimentos lacustres</i>	22
1.2.15.	<i>Abundancia de minerales en la corteza terrestre</i>	22
1.2.16.	<i>Técnicas de normalización geoquímica</i>	23
1.2.17.	<i>Valores de fondo de los informes de Turekian & Wedepohl (1961)</i>	23
1.3.	Bases conceptuales	24
1.3.1.	<i>Sistema lacustre endorreico</i>	24
1.3.2.	<i>Sistema lacustre Alto Andino</i>	24
1.3.3.	<i>Sedimento lacustre alóctono</i>	24
1.3.4.	<i>Sedimento lacustre autóctono</i>	24
1.3.5.	<i>Manganeso</i>	25
1.3.6.	<i>Aluminio</i>	25
1.3.7.	<i>Plomo</i>	25
1.3.8.	<i>Hierro</i>	26
1.3.9.	<i>Cadmio</i>	26
1.3.10.	<i>Variabilidad espacial Método IDW</i>	27
1.3.11.	<i>Factor de enriquecimiento (FE)</i>	27
1.3.12.	<i>Índice de geo acumulación (I-geo)</i>	27

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODÓLOGICO	28
2.1.	Tipo de investigación	28
2.2.	Diseño de la investigación	28
2.3.	Identificación del área de estudio	28
2.3.1.	<i>Ubicación geográfica</i>	29
2.4.	Características de la zona de estudio	30
2.5.	Determinación de los puntos de muestreo	30

2.5.1.	Muestreo de sedimento	32
2.5.1.1.	<i>Muestra representativa de sedimentos</i>	33
2.5.1.2.	<i>Equipos</i>	33
2.5.1.3.	<i>Procedimiento de extracción de muestras</i>	33
2.5.1.4.	<i>Prevención de riesgos</i>	34
2.5.1.5.	<i>Envasado e identificación de muestras</i>	34
2.5.1.6.	<i>Conservación y transporte de la muestra</i>	34
2.6.	Tratamiento de las muestras	34
2.6.1.	<i>Secado de muestras</i>	34
2.6.2.	<i>Tamizado de sedimentos</i>	35
2.7.	Medición de parámetros fisicoquímicos	35
2.7.1.	<i>Ensayo de pH</i>	35
2.7.1.1.	<i>Procedimiento</i>	36
2.7.2.	<i>Ensayo de conductividad eléctrica</i>	36
2.7.2.1.	<i>Procedimiento</i>	37
2.7.3.	<i>Ensayo de color con el método Munsell soil color charts</i>	37
2.7.3.1.	<i>Procedimiento</i>	37
2.7.3.2.	<i>Interpretación:</i>	37
2.8.	Materia orgánica por pérdida de peso por ignición (LOI)	39
2.8.1.	<i>Procedimiento</i>	39
2.9.	Nitrógeno por el método de Dumas	40
2.9.1.	<i>Procedimiento</i>	40
2.10.	Fósforo por el método de Olsen	40
2.10.1.	<i>Procedimiento</i>	41
2.11.	Capacidad de intercambio catiónico	41
2.11.1.	<i>Procedimiento</i>	42
2.12.	Determinación de aluminio intercambiable	42
2.12.1.	<i>Procedimiento</i>	42
2.13.	Extracción de metales pesados método 3050B (EPA SW 846)	43
2.13.1.	<i>Procedimiento</i>	43
2.14.	Concentración de metales pesados por el método 7000B, FLAA	43
2.14.1.	<i>Procedimiento</i>	44
2.15.	Variabilidad espacial por el método de IDW	45
2.16.	Incidencia de nutrientes en metales con estadístico	45
2.16.1.	<i>Correlación de Pearson</i>	45
2.16.2.	<i>Procedimiento</i>	46
2.17.	Determinación de Factor de enriquecimiento	46

2.17.1.	<i>Procedimiento</i>	47
2.18.	Determinación de Índice de Geo-acumulación	47
2.18.1.	<i>Procedimiento</i>	48

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
3.1.	Parámetros físico químicos	49
3.1.1.	<i>Color</i>	49
3.1.2.	<i>pH</i>	50
3.1.3.	<i>Conductividad eléctrica</i>	50
3.1.4.	<i>Materia orgánica</i>	51
3.1.5.	<i>Fósforo</i>	52
3.1.6.	<i>Nitrógeno</i>	53
3.1.7.	<i>Capacidad de intercambio catiónico</i>	53
3.2.	Determinación de Índices de geo-acumulación	54
3.2.1.	<i>Índice de geo acumulación para Cadmio</i>	54
3.2.2.	<i>Índice de geo acumulación para Plomo</i>	54
3.2.3.	<i>Índice de geo acumulación para Hierro</i>	54
3.2.4.	<i>Índice de geo acumulación para Manganeso</i>	55
3.3.	Variabilidad espacial de metales en la laguna Magdalena	55
3.3.1.	<i>Variabilidad espacial de Cadmio</i>	55
3.3.2.	<i>Variabilidad espacial de Plomo</i>	56
3.3.3.	<i>Variabilidad espacial de Hierro</i>	57
3.3.4.	<i>Variabilidad espacial de Manganeso</i>	58
3.4.	Influencia de nutrientes en metales pesados	59
3.5.	Determinación de factores de enriquecimiento	60
3.5.1.	<i>Factor de enriquecimiento para Cadmio</i>	60
3.5.2.	<i>Factor de enriquecimiento para Plomo</i>	61
3.5.3.	<i>Factor de enriquecimiento para Hierro</i>	61
3.5.4.	<i>Factor de enriquecimiento para Manganeso</i>	61
	CONCLUSIONES	62
	RECOMENDACIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Valores de fondo por Turekian & Wedepohl (1961).....	23
Tabla 1-2. Coordenadas de los puntos de muestreo	31
Tabla 2-2: Índices de pH	36
Tabla 3-2: Rangos de interpretación de Conductividad Eléctrica.....	36
Tabla 4-2: Interpretación de Porcentaje de materia orgánica	39
Tabla 5-2: Rango de interpretación de Nitrógeno.....	40
Tabla 6-2: Rango de interpretación de Fósforo	41
Tabla 7-2. Interpretación del coeficiente de relación de Pearson sedan Cohen.	45
Tabla 8-2: Clases de factores de enriquecimiento de un metal pesado	46
Tabla 9-2: Grado de contaminación de acuerdo al Índice de Geo-acumulación.	47
Tabla 1-3: Índices de geo acumulación de metales.....	54
Tabla 2-3. Correlación entre concentración de nutrientes y concentración de metales.....	59
Tabla 3-3. Factores de enriquecimiento en sedimentos de la laguna Magdalena.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Compartimentos generales de un lago	8
Figura 2-1. Dinámica del carbono y materia orgánica en sedimentos lacustres.	10
Figura 3-1. Principales procesos en el ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos	12
Figura 4-1. Ciclo biogeoquímico de nutrientes	15
Figura 5-1. Dinámica de nitrógeno en ecosistema lacustre	16
Figura 6-1. Ciclo simplificado del fósforo en sedimento lacustre.	17
Figura 1-2. Laguna Magdalena.....	29
Figura 2-2. Ubicación del área de estudio.....	29
Figura 3-2. Puntos de muestreo en la laguna Magdalena.....	32

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3.	Porcentaje de color promedio presente en sedimentos de la laguna Magdalena .	49
Gráfico 2-3.	Valores de pH promedio en sedimentos de la laguna Magdalena	50
Gráfico 3-3.	Conductividad eléctrica promedio en sedimentos de la laguna Magdalena.	50
Gráfico 4-3.	Porcentaje de materia orgánica en sedimentos de la laguna Magdalena	51
Gráfico 5-3.	Concentración de fósforo en los sedimentos de la laguna Magdalena	52
Gráfico 6-3.	Porcentaje de nitrógeno en los sedimentos de la laguna Magdalena	53
Gráfico 7-3.	Capacidad de intercambio catiónico en sedimentos de la laguna Magdalena	53
Gráfico 8-3.	Variabilidad espacial de la concentración de cadmio	55
Gráfico 9-3.	Variabilidad espacial de la concentración de plomo	56
Gráfico 10-3.	Variabilidad espacial de la concentración de hierro	57
Gráfico 11-3.	Variabilidad espacial de la concentración de manganeso	58

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** MAPA DE UBICACIÓN ÁREA DE ESTUDIO
- ANEXO B:** MAPA DE UBICACIÓN PUNTOS DE MUESTREO
- ANEXO C:** PREPARACION DEL BOTE
- ANEXO D:** COLECTA DE MUETRA DE SEDIMENTO
- ANEXO E:** SECADO DE LAS MUESTRAS
- ANEXO F:** DETERMINACION PH Y CONDUCTIVIDAD
- ANEXO G:** DETERMINACION DE COLOR (MUNSELL)
- ANEXO H:** DETERMINACION DE MATERIA ORGÁNICA
- ANEXO I:** DETERMIACIÓN DE FOSFORO POR OLSEN
- ANEXO J:** DETERMINACIÓN DE CATIONES INTERCAMBIABLES
- ANEXO K:** DIGESTIÓN ÁCIDA DE SEDIMENTO
- ANEXO L:** ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCION ATOMICA (METALES)

RESUMEN

El presente trabajo avalado por el GIDAC, tuvo como objetivo evaluar los índices de geo-acumulación de metales en sedimentos de la laguna Magdalena del Sistema lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay, cantón Guamote, provincia de Chimborazo. Se definieron 24 puntos de muestreo aleatorios simples bajo criterios de accesibilidad para cubrir toda el área de estudio. El muestreo se realizó en enero del 2022 con bote y draga tipo Van-Ven. Mediante la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (E.A.A) y el equipo Thermo Fischer Scientific, se determinaron las concentraciones de metales (Mn, Cd, Fe y Pb) y nutrientes (P, N, K, Na, Mg y Ca). Para reflejar la variabilidad espacial de metales se utilizó ArcGIS 10.3 y el método de distancia inversa ponderada (IDW). Se realizó una correlación de Pearson entre concentraciones de metales y nutrientes. Se evaluó el factor de enriquecimiento e índices de geo-acumulación para establecer origen y grado de contaminación por metales en sedimentos lacustres. Las concentraciones promedio para metales son: Mn=307.11 ppm, Cd=0.46 ppm, Fe=4261.24ppm y Pb=1.38 ppm; y para los nutrientes son: P=0.25 ppm, N=0.34%, K= 55.31ppm, Na=41.17ppm, Mg=79.99ppm y Ca=1368.67ppm. El método (IDW) mostró una variabilidad espacial media para: Cd, Fe, Mn y baja para el Pb. Las correlaciones de Pearson establecieron relaciones inversamente proporcionales entre las concentraciones de K y Mn, Na y Mn con valores de -0.71 y -0.85 respectivamente. Los factores de enriquecimiento para: Fe, Mn y Pb indican que provienen de la roca madre, mientras que el Cd de la roca madre y otra fuente adicional. Los índices de geo-acumulación concluyeron que no existe contaminación por Mn, Cd, Fe y Pb en los sedimentos lacustres de la laguna Magdalena. Se recomienda ampliar estudios para metales (Cu, Ni, Bi, Zn) en sedimentos de lagunas adyacentes del sistema lacustre de Atillo.

Palabras clave: <ÍNDICE DE GEOACUMULACIÓN>, <FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO>, <SISTEMA LACUSTRE ALTOANDINO>, <SEDIMENTO LACUSTRE>, <VARIABILIDAD ESPACIAL>, METODO DE DISTANCIA INVERSA PONDERADA (IDW)>.



1167-DBRA-UTP-2022

SUMMARY

The aim of the current research supported by GIDAC was to evaluate the metal geoaccumulation indices in sediments of Magdalena lagoon, which is part of the Atillo lake system, located in Sangay National Park, Guamote county, Chimborazo province. Twenty-four simple random sampling were defined under the accessibility criteria in order to encompass the entire study area. The sampling was carried out in January 2022 with a boat and a Van-Ven type dredger and using the Atomic Absorption Spectroscopy (A.A.S.) technique as well as the Thermo Fischer Scientific equipment, metal concentrations (Mn, Cd, Fe and Pb) and nutrients (P, N, K, Na, Mg and Ca) were determined. To reflect the spatial variability of metals, ArcGIS 10.3 and the inverse distance weighted (IDW) method were used. A Pearson correlation between metal and nutrient concentrations was also performed. The enrichment factor and geoaccumulation indices were evaluated in order to establish the origin and level of metal contamination in lake sediments. The average concentrations for metals are: Mn=307.11 ppm, Cd=0.46 ppm, Fe=4261.24ppm and Pb=1.38 ppm; while for nutrients are: P=0.25 ppm, N=0.34%, K= 55.31ppm, Na=41.17ppm, Mg=79.99ppm and Ca=1368.67ppm. The (IDW) method showed a medium spatial variability for Cd, Fe, Mn and a low spatial variability for Pb. The Pearson correlations established inversely proportional relationships between the concentrations of K and Mn, Na and Mn with values of -0.71 and -0.85 respectively. The enrichment factors for Fe, Mn and Pb indicate that they come from the bedrock, while Cd comes from the bedrock and an additional source. The geoaccumulation indices revealed the lack of contamination caused by Mn, Cd, Fe and Pb in the lake sediments of Magdalena Lagoon. It is recommended to carry out further studies for Cu, Ni, Bi, Zn metals, which are present in the sediments of Atillo lake system adjacent lagoons.

Keywords: <GEOACUMULATION INDEX>, <ENRICHMENT FACTOR>, <ENRICHMENT SYSTEM>, <ENRICHMENT>, <HIGH ANDEAN LAKE SYSTEM>, <LAKE SEDIMENT>, <SPATIAL VARIABILITY>, INVERSE DISTANCE WEIGHTED METHOD (IDW)>.



Firmado electrónicamente por:
PAUL ROLANDO
ARMÁS PESANTEZ

INTRODUCCIÓN

La existencia de elementos metálicos en lugares remotos ha generado interés en la comunidad científica por estudiar el transporte en aire, suelo y agua. En investigaciones desarrolladas a nivel mundial se han hallado concentraciones de metales en agua, en la biota, en suelos y los sedimentos lacustres. En estas zonas el principal camino de entrada de metales ha sido la atmósfera (Zafra et al., 2013; p.100).

En ecosistemas acuáticos las concentraciones naturales de metales están sujeta a la distribución, lixiviación y meteorización en la zona de la cuenca. En el medio ambiente gran parte de los metales pesados liberados terminan en los ecosistemas acuáticos por medio de precipitación húmeda o seca, erosión o por descargas directas. Los sedimentos tienen la capacidad de contener y acumular los metales que terminan en los ambientes lacustres. La re-movilización y liberación de los metales hacia la columna de agua depende de los cambios en las condiciones físico químicas. El término metal pesado es usado para representar un grupo de elementos que son asociados con un potencial de toxicidad o contaminación y son aquellos que no presentan una función biológica conocida por otra parte los elementos traza son aquellos que se encuentran en bajas concentraciones (Rizzo et al., 2010: p.156).

Los sedimentos (suelos), son un sistema heterogéneo y complejo formado por minerales, metales y ciertas sustancias orgánicas; el comportamiento del suelo suele ser como el de un sistema biogeoquímico conformado por fases sólidas, gaseosas y líquidas. Los metales que se encuentran presentes en suelos y sedimentos son elementos electropositivos que presentan pesos atómicos altos y poseen densidades superiores a 5 g/cm^3 , pueden ser hallados de manera soluble e intercambiable, además conformando complejos húmicos orgánicos estables. Los metales pesados por su origen pueden ser de dos tipos: antropogénicos (generados por actividad humana) o geológicos (generados por procesos naturales) (Juárez et al., 2005: p.156).

Hasta la presente pocos trabajos son los que se han realizado en la región andina del Ecuador que tengan como objetivo el estudio de contenidos de metales pesados en los ambientes lacustres, por esta razón el objetivo principal de la investigación fue evaluar el índice de geoacumulación de metales en los sedimentos de la laguna Magdalena del Sistema Lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay. En este estudio se buscó determinar el origen y el grado de contaminación con la concentración de los metales presentes en los sedimentos lacustres, además de la variabilidad espacial y la incidencia de los nutrientes sobre los metales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escasa información científica sobre los procesos de geo acumulación en los ecosistemas lacustres de la zona de Atillo del cantón Cebadas, no permite brindar un conocimiento objetivo a las entidades gubernamentales encargadas de las políticas de conservación, producción y turismo científico. El ineficiente seguimiento del plan de manejo del parque nacional Sangay evidenciado por la falta de monitoreo técnico que genere información actual del estado de los sistemas lacustres de nuestra zona de estudio.

En la actualidad en el Ecuador, y más específicamente en la provincia de Chimborazo, son pocas las investigaciones relacionadas con procesos geo acumulativos en sistemas lacustres. El Grupo de Investigación-Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC) a pesar de tener experiencia en análisis de composición metálica de suelos y agua, no cuenta con estudios profundizados en evaluación de índices de geo acumulación y factores de enriquecimiento, lo que produce un estancamiento en el desarrollo de nuevas metodologías de investigación con las cuales se impulse el aprendizaje de los alumnos y maestros de la institución.

La conservación de los sistemas lacustres alto andinos de las áreas protegidas conllevan a una problemática digna de investigación, debido inicialmente a la intervención que están sufriendo estas áreas y al desplazamiento de los mismos por las actividades humanas, además coexiste un escaso conocimiento de las concentraciones existentes de carbono orgánico presente en estos ambientes lo cual ha generado que no se le brinde la importancia adecuada para su preservación.

JUSTIFICACIÓN

En la zona andina del Ecuador son muy pocas las investigaciones relacionadas con la temática de estudio, por esta razón se ha planteado el reto de realizar el presente trabajo de titulación encaminado a la generación y producción de conocimiento científico.

Con el objetivo de evaluar el índice de la acumulación de metales y su variabilidad espacial en sedimentos de la laguna Magdalena del sistema lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay, se determinará los índices de geo-acumulación (Igeo) propuesto por Müller (1969) el cual es ampliamente utilizado para conocer el grado de la contaminación a través de la relación de la concentración presente frente a los valores indicadores de referencia. También se calculará el factor de enriquecimiento sugerido por (Lawson y Winchester.1979) que permite distinguir entre el origen natural o antropogénico de los metales evaluados.

Los resultados obtenidos serán nueva información objetiva y científica del estado actual de la laguna del sistema lacustre con referencia a su composición metálica que permitirán validar e impulsar futuros estudios geológicos y mineralógicos. La presente investigación es un aporte al conocimiento local, mismo que podrá ser utilizado por las autoridades gubernamentales para fortalecer planes de gestión, producción y turismo científico en la zona de estudio.

Debido al interés por generar información nueva, objetiva y de carácter científico, la investigación a realizar cuenta con el apoyo técnico del grupo de Investigación-Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC), bajo el proyecto de investigación IDIPI-234 “Los sistemas lacustres del centro del Ecuador como fuente o sumideros de dióxido de carbono como determinante para su conservación”. Con los resultados obtenidos incrementarán su repertorio de trabajos académicos que serán base para futuros temas de investigación y de desarrollo de tecnologías para aplicarse dentro de la zona de estudio. El trabajo de titulación a ejecutar cuenta con los recursos financieros necesario para: la movilidad hacia el sitio de muestreo, materiales para el transporte y recolección de muestras, sustancias y reactivos para el análisis de muestras e instrumentos de medición.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar de índice de geo-acumulación de metales en sedimentos de la laguna Magdalena del Sistema lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay.

Objetivo Específicos

- Analizar la variabilidad espacial de los metales presentes en los sedimentos de la laguna Magdalena del Sistema lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay.
- Determinar la influencia de los nutrientes en metales de los sedimentos de la laguna Magdalena del Sistema lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay.
- Determinar el factor de enriquecimiento de los metales en la laguna Magdalena del sistema lacustre de Atillo del Parque Nacional Sangay.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de la investigación

Como parte del estudio nacional de los lagos noruegos, Rognerud y Fjeld (2001) tomaron muestras de la química del agua y los sedimentos de 210 lagos que abarcan toda la longitud de Noruega. Encontraron un enriquecimiento significativo de varios elementos traza en los sedimentos depositados recientemente. Los aumentos relativos, en orden descendente, fueron más pronunciados en Sb (antimonio), Pb (plomo), Bi (bismuto), As (arsénico), Hg y Cd (cadmio). Las concentraciones medias en los sedimentos superficiales fueron de dos a siete veces mayores que las registradas en los sedimentos de referencia del fondo. Se encontraron aumentos más pequeños, pero aún significativos, para Cu (cobre), Zn (zinc) y Ni (níquel). Debido a que el diseño de muestreo excluyó lagos con fuentes locales de contaminación, estos enriquecimientos probablemente estuvieron relacionados con tres factores: (i) deposición de elementos transportados atmosféricamente; (ii) reacciones químicas y otros procesos diagenéticos que ocurren en los perfiles de sedimentos; y (iii) liberación acelerada de estos elementos de las cuencas de captación de los lagos debido al aumento de la movilización de los suelos y el lecho rocoso. Independientemente de los mecanismos, estos datos mostraron que las concentraciones de metales eran más altas en los sedimentos superficiales de muchos lagos noruegos (SMOL, 2009, p.34-35).

En los últimos años, los cuerpos de agua dulce y su contaminación con metales pesados es una temática preocupante por el sentido amenazante que significa para la vida acuática y humana. Los sedimentos de los sistemas hídricos son enormes reservorios de contaminantes en los que podemos encontrar metales pesados. Los metales pesados presentes aportan significativamente a la contaminación del suelo, aire y agua por su persistencia, bioacumulación, biomagnificación, toxicidad y el riesgo ecológico que conllevan (SMOL, 2009, p.34-35).

Existe una dinámica temporal de problemas relacionados con el medio ambiente, durante los últimos años se ha evaluado el papel de “registro histórico” que tienen los sedimentos especialmente los de origen lacustre, los mismos que decantan lentamente, archivan en capas valiosa información de la actividad humana sobre el medio. Así se convierten en bases de información necesarias para reconstruir muchos aspectos del impacto generado, por la estimación del ritmo de cambio o para establecer la línea base para los programas ambientales de monitoreo (Cisternas et al., 1997: p.104).

Se presentan fuentes naturales y antropogénicas de metales pesados situadas en la mayor parte del área de los sistemas acuáticos. En las fuentes naturales podemos encontrar la erosión de suelos,

lixiviación de las rocas y actividades volcánicas. En contraste, las fuentes antrópicas son la descarga de aguas residuales industriales, aguas servidas, escorrentía proveniente de agricultura, combustión de combustibles fósiles, deposición atmosférica e industria petrolera (Hernández et al., 1999: pp.132-135).

Los metales pesados se presentan en formas coloidales y libres, asociados a compuestos orgánicos. Por esta razón es importante evaluar los metales pesados en los sedimentos (García et al., 2002: pp.125-128). En las últimas décadas, el estudio de los sedimentos ha conformado una valerosa herramienta para analizar la contaminación por metales pesados en sistemas lacustres, ya que los sedimentos facilitan evaluar en periodos de tiempo los cambios presentados en las cuencas de drenaje. Por otra parte, en Ecuador los estudios realizados para análisis de calidad de sedimentos son muy escasos, con pocas excepciones como en la región costa, donde se han estudiado metales pesados como en los manglares, el estero salado (guayas); el río Cañas (Manta) , entre otras (Cedeño, 2016, pp.1-5).

1.2. Bases Teóricas

1.2.1. Cuenca hidrográfica

Es un área definida topográficamente, drenada por el curso del agua, que tiene una salida simple para que toda la cantidad del efluente sea desalojado. Las cuencas hidrográficas suelen ser utilizadas como unidades para planificación de recursos hídricos. No obstante, es de importancia percatarse que las cuencas de menor tamaño conforman las cuencas hidrológicas de ríos principales (Vasconez et al., 2019: p.17).

Una de las características de las cuencas es que son elementos fundamentales para la obtención de agua dulce, los procesos naturales que se originan en las cuencas debido a las interacciones entre el suelo, el agua, el clima y la vegetación incrementan positivamente la captación de agua, provocan además el abastecimiento de cauces en zonas secas (Ordóñez, 2011, p.7).

Una cuenca contiene varios ecosistemas terrestres como; selvas, matorrales, pastizales, manglares, bosques, entre otros, y ecosistemas acuáticos como: lagos, humedales, ríos, entre otros.

Por lo general se definen tres sectores en las cuencas hidrográficas que característicos: Alto, medio, bajo, mismos que por su topografía pueden influenciar en procesos hidrometeorológicos y en la utilidad de sus recursos (Ordóñez, 2011, pp.9).

1.2.2. Sistema lacustre

Son ecosistemas acuáticos compuestos por algunos cuerpos de agua como lagunas que se han formado por lo regular de procesos de deshielo de la altas montañas o por movimientos tectónicos (Roldán y Ramírez, 2008: p.50).

Una de las características fundamentales de estos sistemas es que no presentan algún contacto directo con el mar, es decir que pueden o no, presentar salinidades variables, aspectos que están determinados debido a los tipos de afluentes que los alimentan o por el sustrato que contienen. Los cuerpos de agua que se incluyen en estos tipos de sistemas son lagos y lagunas (Cervantes, 2012, p.37).

- **Lagos.** Son masas naturales de agua de origen continental y con características lenticas (estancadas), sin directa comunicación al mar, por lo general son enormes, con profundidades mayores de 8 m. Conforman cuerpos de agua permanentes y que se acumulan en una depresión geográfica (cuenca lacustre) (Cervantes, 2012, p.37).
- **Laguna.** Presentan una similitud aparente con los lagos, son cuerpos de agua y su presencia puede tener cualquier origen, dimensiones y drenajes. Son algo inestable por lo que permanecen relativamente estancados, lo que se traduce en variaciones del nivel de agua, pudiendo ser permanentes o temporales en función del régimen pluvial. Las lagunas presentan una profundidad menor a los 8 metros con morfología cóncava, esta condición provoca turbiedad que da lugar a una menor transparencia del agua en comparación con un lago, dicha turbiedad generalmente es de color pardo por la presencia de algas y materia orgánica o por sólidos suspendidos (Cervantes, 2012, pp.37-38).

Los cuerpos de agua como los lagos y lagunas son importantes, ya que son considerados como archivos paleo ambientales y paleoclimaticos, ya que se encuentran sujetos a múltiples fuerzas reguladoras de su historia, tales como el basamento poroso, el clima, actividad tectónica y volcánica, biota acuática, vegetación y actividad humana, En consecuencia conservan los registros posibles para la interpretación y estudio de la historia, los ecosistemas lacustres tienen una rápida y prolongada acumulación, con discriminación de eventos a escalas temporales de cientos de miles de años (Vieira et al., 2015: p.4).

Los lagos y lagunas de manera general están divididos en zonas horizontales en función de características físico-químicas y biológicas de sus aguas como se muestra en la Figura 1-1.

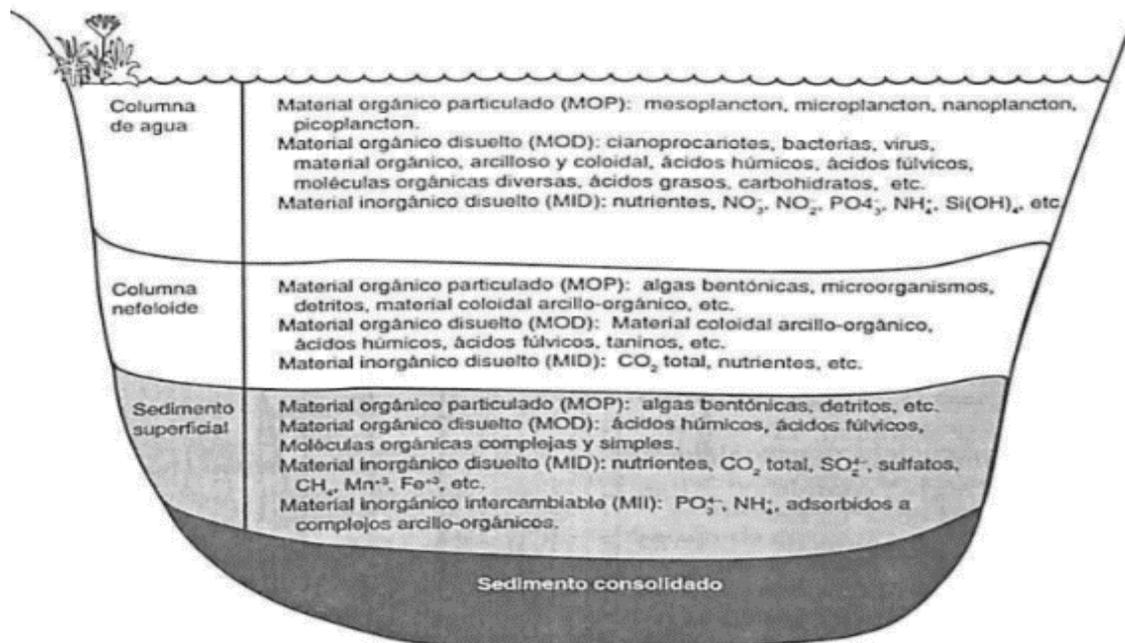


Figura 1-1. Compartimentos generales de un lago

Fuente: Roldán y Ramírez, 2008.

1.2.2.1. Lago oligotrófico

Estos lagos oligotróficos son más comunes en regiones frías, son cuerpos de agua con baja productividad primaria, presentan contenidos bajos de nutrientes, con lechos de rocas ígneas resistentes, baja producción de algas y por consiguiente poseen aguas sumamente claras, con alta calidad de agua potable. Las aguas superficiales de estas lagunas tienen naturalmente mucho contenido de oxígeno por lo que soportan algunas especies de peces, como la trucha de lago, los ecólogos usan el término oligotrófico para referirse a los lagos improductivos (Sánchez, 2018, p.20).

1.2.2.2. Lago mesotrófico

Son cuerpos de agua con nivel intermedio de productividad, mayor que los lagos oligotróficos, pero por debajo de los lagos eutróficos. Son lagos con características comúnmente de aguas claras que mantienen lechos sumergidos de plantas acuáticas y cantidades o niveles medios de nutrientes (Sánchez, 2018, pp.20-21).

1.2.2.3. Lago eutrófico

Las aguas en estos lagos son enriquecidas por presencia de nutrientes que permiten la proliferación y desarrollo de las algas. Cuando las algas perecen, los procesos aeróbicos de

descomposición de las bacterias consumen oxígeno. Una vez que se termina el oxígeno gran cantidad de restos orgánicos se depositan en el fondo para luego pasar por procesos anaeróbicos que como producto desprenden H₂S y algunos gases, generando malos olores en las aguas de eutrofización extrema. En lagunas como estas la luz penetra con cierta dificultad dentro del agua y los seres vivos presentes en estas condiciones son característicos de aguas con niveles bajos de oxígeno (Sánchez, 2018, p.20).

1.2.3. Funciones ecosistémicas de las lagunas

Del total de la cantidad de agua disponible en nuestro planeta, el agua dulce líquida superficial corresponde al 0.3%, y de esta minúscula porción, el 90% es almacenada en lagos; por ende estos son objetos críticos para la conservación de la biodiversidad y ecosistemas del planeta. Por otra parte, son los ecosistemas acuáticos más frágiles y vulnerables, porque son el sumidero de algunas sustancias como: sedimentos, metales, minerales, nutrientes y materia orgánica proveniente de las cuencas de alimentación. La contaminación de los sistemas lacustres pueden ocurrir a partir de procesos de actividades antrópicas como procesos alcotanes (López y Madroñero, 2015: p.22).

En los últimos años, el valor de los lagos a nivel mundial ha ido incrementando, debido a las funciones que cumplen y pueden ser utilizadas en beneficio de la población, evitando el gasto de diseño e implementación de plantas hidrológicas, pues estos ecosistemas permiten el restablecimiento de las funciones biológicas e hidrológicas de la naturaleza (Pnuma, 2000, p.2).

1.2.4. Sedimentos lacustres

El origen de los sedimentos se debe a procesos de sedimentación causado ampliamente por agentes como el viento y el agua. Así, los ciclos hidrológicos y ciclos de viento cumplen un papel importante en los regímenes de sedimentación. La descomposición y meteorización de rocas ígneas y sedimentarias preexistentes depende en gran parte del agua. La producción de la cantidad de sedimentos no solo depende de precipitaciones, sino también de condiciones de superficie, la densidad vegetal de cobertura y tipo de rocas expuestas (Rizzol, 2007, p.7).

Los sedimentos profundos de lagos están formados por granos finos, los que contienen minerales y materia orgánica. Las características de los sedimentos de ambientes lacustres son definidas por factores como el tamaño de la cuenca y su profundidad, los sedimentos de lagos son importantes por su sensibilidad a condiciones climáticas, ya que son útiles como indicadores de los climas del pasado, varios estudios mostraron que episodios antiguos de clima seco y húmedo pueden ser descifrados en la base química y mineralógica del lago (Vieira et al, 2015: p.5).

En los sedimentos lacustres la composición mineral y química resulta del balance entre un conjunto de materiales antigénicos y detríticos que interactúan en el área del depósito. Las condiciones del medio (Salinidad, Eh, pH, actividad microbiológica) suelen accionar como catalizadores de los procesos de transformación y neo formación de los minerales en los sedimentos (Jiménez et al. 2017, p.1).

1.2.4.1. La materia orgánica en sedimento lacustre

La cantidad de materia orgánica preservada en un sistema lacustre es básicamente el resultado del equilibrio entre la biomasa generada en el interior del lago (autóctona) y/u obtenida del área de drenaje (alóctona) y la cantidad de biomasa reciclada y alterada en los sedimentos y la columna de agua, por otra parte, el tipo de materia orgánica conservada en los sedimentos lacustres está determinada por factores como el clima, la topografía del área de drenaje, la profundidad y el tamaño del lago (Gonçalves, 2001, p.8).

Los sedimentos enriquecidos con materia orgánica pueden ocasionar condiciones anoxias, a por las cuales las reacciones de óxido reducción, provocan la disminución, disolución, precipitación y reubicación de minerales de hierro (Vázquez et al.,2008: p.32).

La degradación por procesos anaeróbicos de la materia orgánica suelen ser importantes debido a la escasez de oxígeno en los primeros milímetros, además indican el potencial de mineralización de materia orgánica y la liberación de gases de efecto invernadero. Los sedimentos lacustres de igual forma presentan un valioso sitio para la preservación y acumulación de carbono orgánico a escala mundial capturándose más carbono anualmente en sedimentos oceánicos (Vieira et al, 2015: p.7).

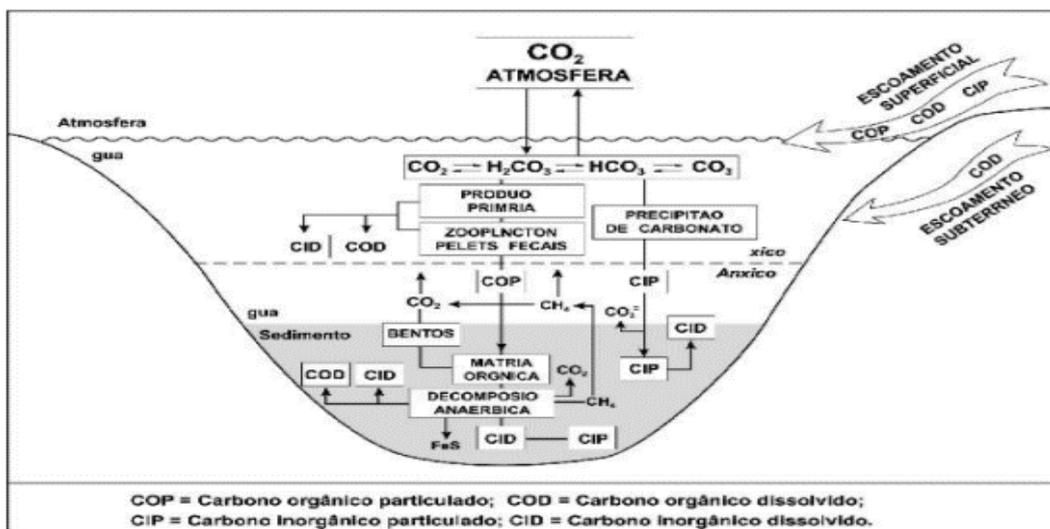


Figura 2-1. Dinámica del carbono y materia orgánica en sedimentos lacustres.

Fuente: Gonçalves, 2001.

1.2.4.2. El ciclo del carbono en sedimentos lacustres

Las vías más comunes del planeta para la recirculación de carbono son la descomposición de materia orgánica por la fotosíntesis y la respiración producto de procesos metabólicos. La materia orgánica es una fuente directa de carbono para los sedimentos, esta se acumula en ecosistemas formando grandes reservas de carbono (Prast et al., 2018: p.113).

En los sedimentos lacustres el ciclo del carbono es en realidad muy complejo, ya que implica la interacción entre varias y diferentes partículas de carbono orgánico e inorgánico disuelto. La vida se organiza en torno al elemento carbono, y a las formas de vida del planeta son estructuras complejas de carbono, de compuestos de carbono. El CO₂ atmosférico es la una de las fuentes principales de carbono, así como también los depósitos minerales geológicos (combustibles fósiles y rocas carbonatadas), en los fondos marinos. Los procesos fotosintéticos y la respiración son condiciones naturales que priman en el equilibrio de carbono en la Tierra (Palau et al., 2010: p.248).

Bajo condiciones naturales, principalmente en los océanos y mares, una poca cantidad de carbono se va quedando acumulado en el fondo de estos sistemas acuáticos, por los que cumplen la funcionalidad de sumideros de carbono. Los depósitos de carbono atrapado quedan fuera del ciclo general por un periodo de 10⁴ – 10⁶ años, luego por vulcanismo y procesos tectónicos, son devueltos a la atmosfera mineralizándose y como CO₂ completando e iniciando un nuevo ciclo (Palau et al., 2010: p.248).

A más de procesos como la fotosíntesis existen otras vías de producción primaria en lugares sin luz como el fondo de lagos y océanos, a estos se los conoce como quimio sintéticos, los cuales son realizados por organismos que generan biomasa gracias a la energía que obtienen de las reacciones químicas y no de la energía solar. La degradación de materia orgánica en la que no es necesario el O₂ es un proceso metabólico que no solamente produce CO₂ sino también metano CH₄ (Prast et al., 2018: p.114).

Los lagos, embalses y demás ecosistemas acuáticos posiblemente contribuyen al cambio climático debido a la emisiones de CO₂ y CH₄ que unidos con compuestos que conforman el sistema carbónico-carbonatos llegan a ser las estructuras químicas inorgánicas más representativas del carbono en ambientes acuáticos (Palau et al., 2010: p.248).

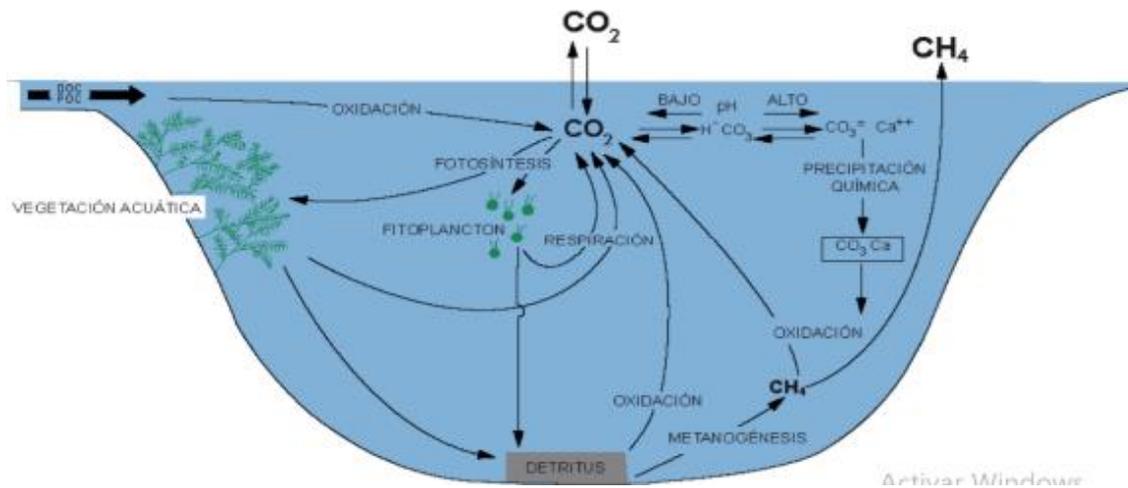


Figura 3-1. Principales procesos en el ciclo del carbono en ecosistemas acuáticos

Fuente: Palau et al, 2010.

1.2.5. Nutrientes del Agua

En ambientes acuáticos, al igual que en otros ecosistemas, el equilibrio se mantiene porque todos los componentes de la cadena alimenticia se encuentran satisfechos en sus necesidades energéticas. Los nutrientes en ecosistemas acuáticos regulan la biomasa y son los que permiten el equilibrio, el exceso o falta incide directamente en el estado trófico de un cuerpo de agua y por consiguiente en la calidad de agua del mismo (Mess, 2020, p.55).

En el estudio realizado por Parra (2003) se menciona que los lagos que se encuentran en la parte alta y precordillera de la región andina, cuyas aguas tienen bajos contenidos de nutrientes. Debido a una mínima intervención de sus cuencas de drenaje y ninguna influencia de asentamientos urbanos. En los lagos se originan una considerable producción de nutrientes inorgánicos cuando la materia orgánica de origen terrestre circula dentro de estos y pasa a formar la base de algunas cadenas tróficas a partir del detrito. La concentración de nutrientes y estratificación térmica, son características limnológicas que dependen del producto de relaciones que se originan entre el sistema geomórfico y el cuerpo de agua (Parra et al., 2003, p.52).

1.2.6. Macronutrientes

1.2.6.1. Nitrógeno

Es uno de los elementos indispensables para la vida, ya que se presenta en proteínas y los ácidos nucleicos. Sin embargo, siendo de los elementos más abundantes de la biosfera y atmósfera, es el que menos utilizan los seres vivos. Esto se debe a que el 99% del nitrógeno en la tierra se presenta en forma molecular N_2 (Moreno, 2016, p.14).

El nitrógeno en su estado molecular constituye el 78% de la atmósfera de la tierra, por otro lado, en el estado gaseoso es una molécula inerte y no disponible para los seres vivos. Otra característica es que el nitrógeno no está presente en la mayor parte de los sustratos primarios, es decir en las rocas de la corteza terrestre; sin embargo, el N que está biodisponible deriva de procesos como la fijación del N que es la transformación del N_2 a N reactivo para ser utilizado por los seres vivos. Los responsables de estos procesos son microorganismos que habitan en lagos, suelos y sedimentos, como también los que se encuentran en asociaciones simbióticas con raíces de las plantas y en menor medida los relámpagos son también mediadores para la transformación del nitrógeno (Prast et al., 2018: p.116).

Existen grandes cantidades de nitrógeno contenidas en la litosfera y que no son parte de ciclos biogeoquímicos. Solo una baja cantidad de 6.3% de nitrógeno atmosférico forma parte de los seres vivos. La importancia en agua del nitrógeno es fundamental en las proteínas, las cuales son base estructural para seres vivos. Compleja es la química del nitrógeno porque se pueden encontrar varios estados de valencia y por qué estos estados pueden obtenerse por la actividad metabólica de ciertos microorganismos. Desde la química son siete estados de valencia en la que el nitrógeno puede existir. En ecosistemas acuáticos los iones amonio y los nitratos son los más importantes, ya que son la fuente esencial para los organismos que habitan en el medio. Las altas concentraciones de ion amonio pueden dar lugar a enormes implicaciones ecológicas, porque el oxígeno es muy demandado, lo que resulta en un decremento de las comunidades acuáticas (Roldán y Ramírez, 2008, p.241).

1.2.6.2. Fósforo

Es un elemento químico por muchas razones indispensable para la vida. Un de las principales funciones es la formación de biomoléculas claves para los organismos que habitan la tierra. El fósforo permite a las células contar con el adenosintrifosfato como energía, además es importante para un balance hídrico adecuado por acción de fosfolípidos. A diferencia de otros elementos, el fósforo no se presenta libre en la naturaleza, se depende de este elemento para soportar la producción mundial agrícola. En nuestro planeta es un elemento poco abundante, solo hay 0.13% en la corteza terrestre. En los ecosistemas la principal fuente de fósforo es la liberación de minerales primarios del suelo, es el proceso de intemperismo (Moreno, 2016, p.22).

La corteza terrestre es la reserva fundamental en la naturaleza. Su disponibilidad es gracias a la meteorización de las rocas o por emisiones de productos volcánicos, que luego es tomado por las plantas. Es un elemento biogénico que desempeña funciones fundamentales en metabolismos biológicos, en comparación con los demás nutrientes es el menos abundante y un componente esencial para los organismos. Están presentes en pequeñas cantidades en las plantas, en proporciones de 0.2%, aproximadamente. Se lo puede encontrar en rocas esencialmente como

ortofosfatos. Las rocas ígneas son la principal fuente de estos iones. La fosfina es un compuesto del fósforo, se presenta en pantanos en los que cuando entra en contacto con el oxígeno del aire se observan como fuegos fatuos (Roldán y Ramírez, 2008: p.249).

El reciclaje del contenido de fósforo en la materia orgánica es indispensable para mantener la diversidad y la biodisponibilidad del elemento, ya que el fósforo no posee una molécula gaseosa como tal, lo que explica su ausencia en la atmósfera y de esta forma su ciclo biogeoquímico ocurre de manera general a escala geológica lo que hace que su disponibilidad sea mínima en periodos de tiempo de escala humana. El alto reciclaje de fósforo se evidencia en los sistemas naturales donde casi todo el elemento tiende a ser absorbido por plantas y animales para ser incorporado a los tejidos, con el paso del tiempo y cuando estos organismos mueren ocurren transformaciones químicas producto de la descomposición lo que incorpora nuevamente el P al medio natural (Prast et al., 2018: p.120).

1.2.7. Ciclos biogeoquímicos de los nutrientes

De manera general los ciclos biogeoquímicos que se pueden diferenciar son los gaseosos y sedimentarios, esta división está basada en la fuente de entrada de los nutrientes a los ecosistemas, los ciclos gaseosos son globales mientras que los sedimentarios ocupan porciones específicas en la superficie terrestre. En los ciclos sedimentarios la disposición final para los nutrientes es el suelo, los fondos oceánicos y lacustres, los ciclos varían dependiendo del elemento mineral y se presentan en dos fases: la fase salina y la fase rocosa, las sales minerales se originan por erosión de la corteza terrestre luego al ser disueltas se introducen al ciclo del agua. Luego de moverse llegan nuevamente a los depósitos donde se quedan tiempos indefinidos, otras permanecen en la corteza terrestre por procesos de sedimentación para luego por procesos erosivos ser incorporadas nuevamente a los ciclos biogeoquímicos (Herrmann y Bucksch, 2014: p. 515).

Los ciclos biogeoquímicos se encuentran directamente relacionados con procesos biológicos, geológicos e hidrológicos que se producen en los diferentes niveles de la corteza de la tierra, es decir en la biosfera, litosfera y atmósfera. Los organismos vivos son mediadores de los ciclos biogeoquímicos, ya que contienen nitrógeno N, carbono C y fósforo P, sin los cuales no podrían vivir. La degradación de materia orgánica y la producción primaria están controladas por reacciones bioquímicas, las cuales acoplan el C, el N y el P (Prast et al., 2018: p.111).

Los ciclos biogeoquímicos del fósforo se presentan a escala geológica como la formación de minerales y en el afloramiento de rocas producto de los procesos de la tectónica de placas, esta es la causa para que el P no sea renovable y la disponibilidad del elemento en la tierra sea finita todo esto si consideramos tiempos de escala humana (Prast et al., 2018: p.119).

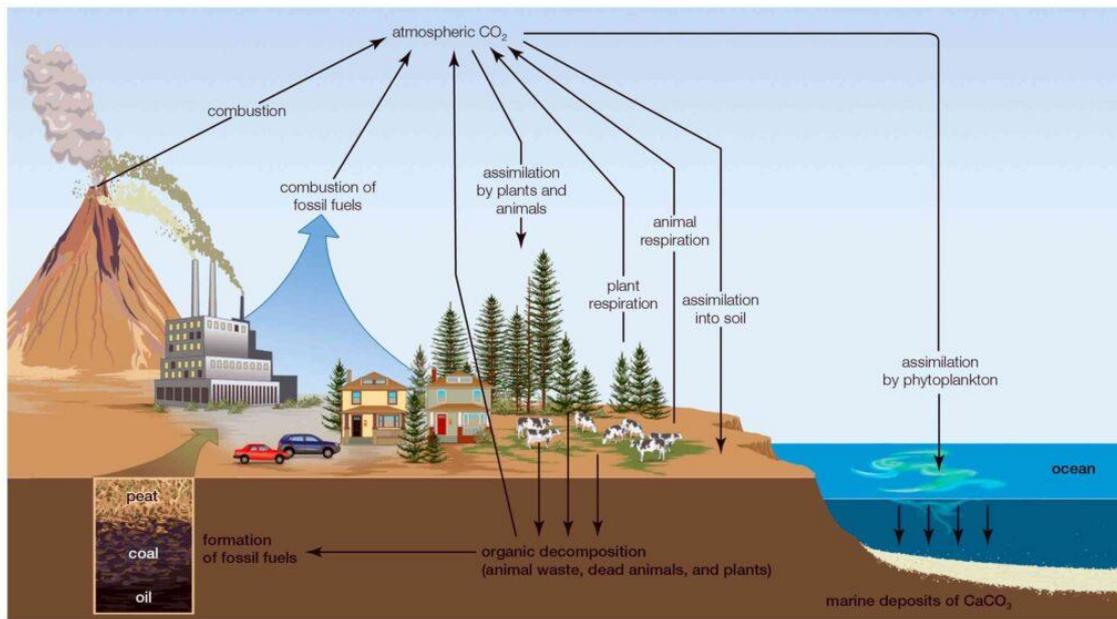


Figura 4-1. Ciclo biogeoquímico de nutrientes

Fuente: Treehugger, 2022.

1.2.7.1. El ciclo del nitrógeno en sedimentos lacustres

Para los seres vivos la fuente principal de nitrógeno es la atmósfera, las cargas eléctricas remueven constantemente al nitrógeno elemental (N_2), al igual que por acción de bacteria y algas. Grandes cantidades de nitrógeno son oxidadas en (N_2O_5), durante las tormentas eléctricas; luego estas se unen con el agua de la lluvia, produciendo HNO_3 que es arrastrado hasta depósitos de cuerpos de agua o suelos. Al disociarse en HNO_3 en el agua produce NO_3^- (nitratos) que son las formas químicas que las plantas y algas pueden asimilar el nitrógeno en el citoplasma para realizar la síntesis de proteínas (Roldán y Ramírez, 2008: p.242).

En sedimentos lacustres la acción de bacterias fijadoras y de ciertas algas pueden convertir en nitrógeno atmosférico en proteínas, por otra parte, el amoníaco otorga amonio a las plantas y algas para la elaboración de proteínas, luego de que el nitrógeno se ha incorporado a los tejidos vegetales o animales, entra en el proceso de reparación de tejidos y células gracias a la síntesis de proteínas que ocurren en las células (Roldán y Ramírez, 2008: p.242).

En el medio ambiente por medio de procesos metabólicos, los organismos devuelven el nitrógeno en forma de orina y heces de manera general, por otra parte, cuando muere el organismo, el y toda su estructura, la que retorna el nitrógeno en el ambiente por medio de la descomposición de materia orgánica (Roldán y Ramírez, 2008: p.243).

Los nitratos son los que conforman el último estado de oxidación del nitrógeno y es de esta forma como lo emplean directamente las algas y plantas para la síntesis de proteínas; sin embargo, en condiciones anaeróbicas nitratos y nitritos retornan el nitrógeno gaseoso a la atmósfera por el

proceso llamado desnitrificación. De esta manera culmina el ciclo del nitrógeno llegando al punto de partida para iniciar nuevamente todo el proceso de nitrificación descrito en este apartado (Roldán y Ramírez, 2008: p.243).

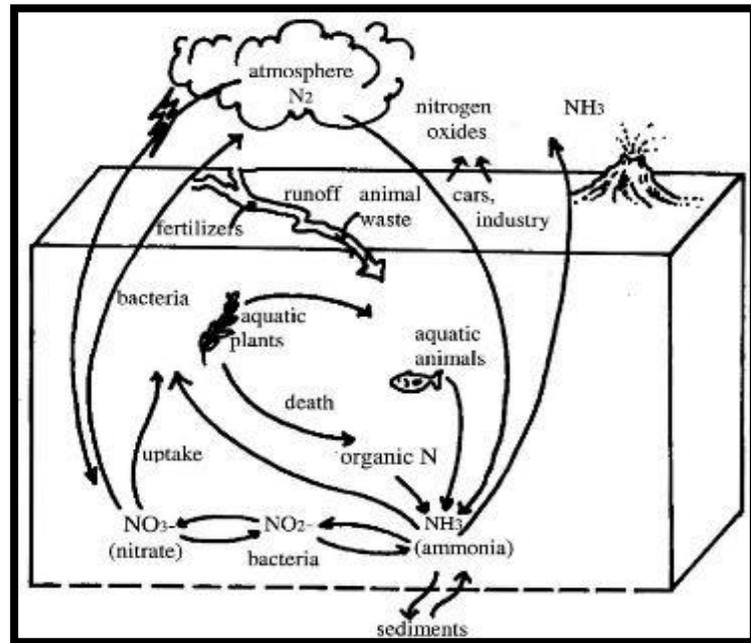


Figura 5-1. Dinámica de nitrógeno en ecosistema lacustre

Fuente: EXTENSION, Utah State University, 2022.

1.2.7.2. El ciclo del fósforo en sedimentos lacustres

El fósforo en la tierra es característico, ya que es uno de los más comunes y esenciales para los seres vivos debido a que este elemento es parte de estructuras químicas necesarias para la vida como las que cumplen la función de obtención de energía celular (adenosin trifosfato; ATP) en la genética (ácidos nucleicos; ADN). Algo que se debe tener en cuenta es que el fósforo no presenta una molécula gaseosa, por ende no se encuentra en la atmósfera como el carbono o el nitrógeno. Por otra parte, al fósforo lo podemos encontrar en moléculas de minerales como fosfatos, las cuales están en la corteza terrestre como la fosforita o el apatito (Prast et al., 2018: p.119).

La inserción del fósforo en el agua se produce por depósitos atmosféricos directos como también por las actividades de las cuencas hidrográficas, existiendo fuentes puntuales como el ingreso de aguas servidas por procesos de acuicultura; entre las fuentes difusas de fósforo están la lixiviación del suelo, escorrentía superficial, aguas subterráneas, percolación de aguas servidas. Cierta cantidad de fósforo puede ser arrastrado por las aguas que a su vez sedimenta en los fondos de los cuerpos de agua, para luego por diversos procesos geológicos dar lugar a la formación de rocas que tardarán millones de años en volver a emerger y soltar nuevamente los compuestos de fósforo (Roldán y Ramírez, 2008: p.251).

Existe una cantidad mayor de fósforo en sedimentos que en la columna de agua, lo cual está determinado por la habilidad que tiene el sedimento para retomar el fósforo, otros factores como el tipo de biota en los sedimentos y la calidad del agua pueden alterar el retorno del fósforo a la zona tropogénica (Roldán y Ramírez, 2008: p.253).

Otra parte del fósforo es absorbido por el plancton, que a su vez es digerido por peces que se alimentan de plancton. Cuando los peces sirven de alimento para ciertas aves que tienen sus nichos en tierra, las aves depositan parte del fósforo en las heces hacia el suelo (Rizzol, 2007, p.18).

De forma general, concentraciones altas de fósforo total presentes en los sedimentos de las lagunas, muestran la característica particular o capacidad de los sedimentos para retener fósforo, tanto autóctono como exógeno, provenientes de diferentes fuentes antropogénicas, los cuales favorecen procesos abióticos (Marquez et al., 2007: p.142).

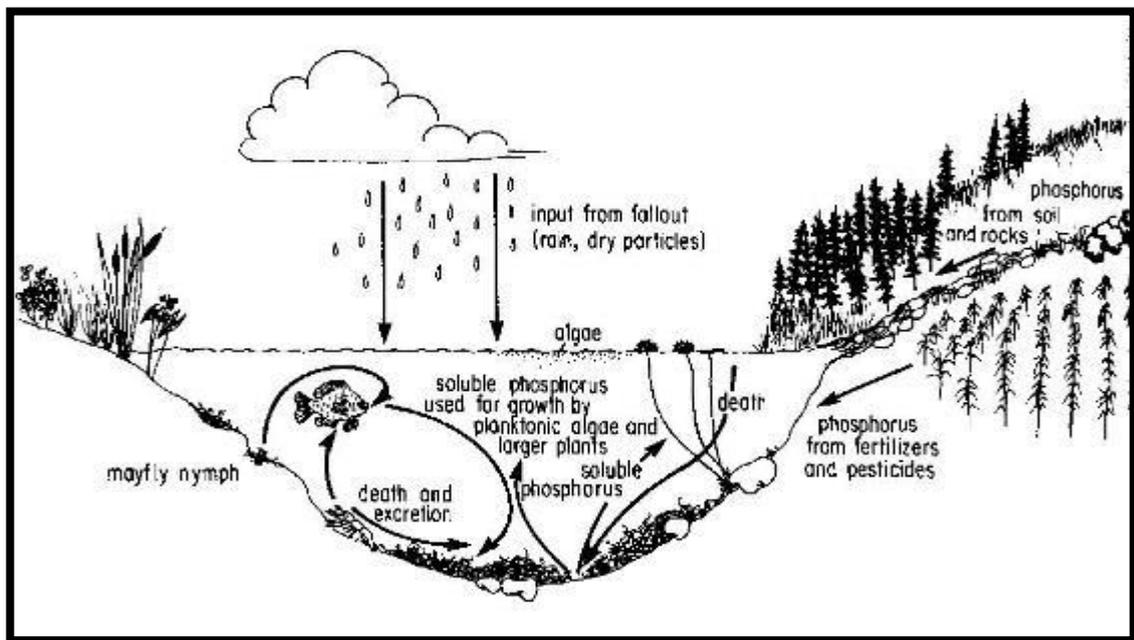


Figura 6-1. Ciclo simplificado del fósforo en sedimento lacustre.

Fuente: EXTENSION, Utah State University, 2022.

1.2.8. Incidencia de los nutrientes en los sedimento lacustres

En los lagos los depósitos de sedimentos funcionan como reserva o fuente de gran cantidad de nutrientes esenciales involucrados en procesos de eutrofización, los intercambios de nutrientes en los sedimentos y el agua adyacente depende de las condiciones y características químicas del sedimento y el agua (Wetzel, 1990, p.8).

Este comportamiento eco sistémico funciona como reserva tampón de nutrientes en la columna de agua, pues amortigua los aumentos de nutrientes en el medio de fuente por aportes directos de

la descomposición de materia orgánica, reteniendo parte de los mismos. En los lagos con abundancia de nutrientes y gran productividad, los sedimentos que predominan son de origen autóctono (Ramírez y Noreña, 2004: p.174).

1.2.9. Cationes intercambiables

Los cationes intercambiables incluyen los elementos como: Ca, Mg, K, Na considerando al Al y H en suelos ácidos, la característica de estos elementos los difiere de otros, ya que son los que se pueden cambiar por los cationes en una solución salina cuando es agregada en el suelo. Las concentraciones de los cationes cambiales están asociadas a la fertilidad de los suelos y muestra el equilibrio de los cationes en el suelo, lo que es muy esencial para el desarrollo de las plantas. La determinación de cada catión es más exacta para validar el carácter fértil del suelo en comparación a la medición de la capacidad de intercambio catiónico. Por otra parte, para la valoración de la fertilidad potencial de los suelos se evalúa la CIC (McKean,1993, p25).

Las condiciones con las que se realizan las mediciones dan origen a una variación de la CIC por lo que esta no es una propiedad fija. Por lo general se utiliza acetato de amonio pH7 como solución amortiguadora para la estimación de los cationes absorbidos en suelos alcalinos. Para los suelos ácidos con pH <5.5 con cargas variables, el aumento del pH incrementa la CIC por lo que el método de acetato de amonio sobrevalora la CIC. En otro caso, en suelos de carácter calcáreo o salino, se dan sobreestimaciones de la CIC por la presencia de la disolución de carbonato de calcio en el suelo. Por estas razones existen varios métodos para analizar en suelos ácidos, suelos alcalinos y suelos calcáreos. Para los suelos ácidos con cargas variables, se utiliza una sal no amortiguadora como el cloruro de potasio esto con el fin de desplazar los cationes intercambiables, a la suma de los cationes se denomina como la capacidad de intercambio catiónico efectiva (McKean,1993, p25).

1.2.10. Metales pesados y elementos traza

La terminología “metal pesado” se refiere al elemento químico que posee una elevada densidad relativa (por encima de 6 g/cm^3), la disponibilidad en la corteza de la tierra es inferior al 0.1%, y por lo habitual menor al 0.01%, suelen estar presentes en bajas concentraciones en la corteza (Pérez Naranjo et al. 2015, p. 4). Algunos de estos elementos son Cobre (Cu), Aluminio (Al), Berilio (Be), Hierro (Fe), Cadmio (Cd), Manganeseo (Mn), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), entre otros (Pabón et al. 2020). Los metales pesados son los elementos que poseen un peso atómico mayor que el hierro (55.85 g/mol), con esta afirmación se excluyen metales con pesos atómicos por debajo del hierro y que frecuentemente pueden ser elementos contaminantes como el V (50.95),

Cr (52.01), y a otros que no son metales como As, F y P. Por esta razón resulta preferentemente hablar de contaminación por elemento traza. Los elementos traza se presentan en bajas concentraciones (mg/kg) en la corteza terrestre, plantas y suelos. En su mayoría son importantes para el desarrollo de animales, plantas y seres humanos, no obstante pueden ser tóxicos si sobrepasan ciertos límites (Galán Huertos y Romero Baena, 2008: p. 49).

1.2.11. Afectaciones de metales pesados en el ambiente

1.2.11.1. Afectación por manganeso

El manganeso, al igual que el hierro, es el responsable de otorgarle al agua un color, sabor y olor no deseados. Su presencia genera manchas negras y cafés en los materiales en los cuales presenta contacto, por otra parte, ciertamente no produce problemas a la salud, pero si forma capas de baba color negra en la superficies con las que entra en contacto producto de actividad microbiana asociada al manganeso (Mcfarland y Dozier, 2017: p.1).

1.2.11.2. Afectación por plomo

El agua en regiones no contaminadas tiene concentraciones de plomo de 1 microgramo/litro en aguas superficiales, alrededor de 8 microgramos/litro en ríos, la concentración de plomo en agua de mar son más bajas que en aguas de lagos y ríos. La exposición a través del agua es mínima porque el plomo forma generalmente compuestos insolubles de tipo carbonatos y sulfatos. Los suelos son contaminados esencialmente por deposiciones de partículas suspendidas en el aire o por agua contaminadas industriales. Las cantidades ingeridas de plomo por medio de alimentos varían. Según el producto, por otro lado, alrededor del 9% de plomo absorbido en los alimentos es limitado por las heces, por lo que la ingestión de plomo es significativa solo cuando existe un alto índice de contaminación ambiental (Limo, 2003, p.9).

1.2.11.3. Afectación por cadmio

El elemento cadmio no es degradable en la naturaleza, una vez liberado en el medio ambiente, permanece en circulación, la alta movilidad, toxicidad en concentraciones bajas y poder bioacumulativo lo hacen un metal de mayor importancia. Estudios en varios cultivos han demostrado que reduce su crecimiento, la transpiración, el contenido de clorofilas y por ende una disminución en la actividad fotosintética de plantas (Hernández et al., 2019: p.2).

1.2.11.4. Afectación por aluminio

Uno de los factores limitantes para la producción y crecimiento de los cultivos en los suelos ácidos es el aluminio soluble Al^{3+} , influye en el fósforo y molibdeno disminuyendo su solubilidad, además conlleva al descenso de la concentración de macronutrientes en el suelo, en plantas causa alteraciones metabólicas inhibe el crecimiento radical lo que desencadena en la reducción de la toma de nutrientes y agua (Rivera et al., 2016: p.12).

1.2.11.5. Afectación por hierro

El hierro es capaz de otorgar sabor, color y olor indeseable al agua. El hierro genera manchas cafés y rojizas en platos, porcelana, ropa, vasos, objetos de plomería e incluso en material de construcción como el concreto. Las aguas contaminadas con este elemento ocasionalmente presentan bacterias de hierro, las cuales consumen los minerales que contiene el agua, sin embargo, estas no ocasionan problemas en la salud, pero si forman una capa de biofilm café-rojiza en las superficies (Mcfarland y Dozier, 2017: p.1).

1.2.12. Geo-disponibilidad de metales pesados y elementos traza

En los suelos los elementos traza pueden ser antropogénicos o geogénicos, los de origen natural dependen en gran medida de la geodisponibilidad. La geodisponibilidad de un compuesto o elemento químico de un material terrestre es una porción de la totalidad de su contenido que puede ser liberado a la superficie o cerca de la superficie (Biosfera) por procesos químicos, biológicos o mecánicos (Pollard et al., 1992: p.3).

La geo-disponibilidad de metales pesados depende de procesos para ser liberados como la lixiviación de mineralizaciones, la meteorización de la roca madre, emisiones volcánicas. La liberación de elementos también depende de la estabilidad termodinámica y estructura de los minerales de la roca. Estructuras mayormente polimerizadas son más resistentes y estables a la destrucción, la geodisponibilidad y la aportación al suelo de los elementos de las rocas es insignificante en relación con las producidas por las acciones antropogénicas (Huertos y Baena, 2008: p.50).

1.2.13. Procesos naturales que incrementan los metales en sistemas lacustres

Los metales ingresan a los sistemas lacustres de forma natural a partir de una variedad de fuentes, pero principalmente por escorrentías y flujos de agua subterránea que han secuestrado metales de la litología de la cuenca a través de la meteorización y otros procesos, o porque los metales se

emiten a la atmósfera. Aunque los metales de nuestro medio ambiente suelen evocar imágenes negativas en la mente de la mayoría de las personas, la biota necesita algunos de estos elementos (p. Ej., Hierro, zinc) en pequeñas cantidades para los procesos fisiológicos (Mason, 2013, p.704).

El principal factor que controla la distribución de metales en sistemas estratificados es la distribución de oxígeno. Durante el invierno las aguas de los lagos están bien mezcladas y hay poca estratificación vertical en cualquier parámetro. Sin embargo, a medida que las aguas superficiales se calientan en primavera y verano se produce una estratificación de la temperatura y esto evita la mezcla de oxígeno de la superficie a profundidad. A medida que avanza el verano, el contenido de oxígeno de las aguas del fondo disminuye a niveles indetectables debido a la oxidación de materia orgánica que se hunde o a la demanda de oxígeno del sedimento y las concentraciones de Fe y Mn aumentan simultáneamente con el agotamiento del oxígeno, en el sedimento superficial. La mezcla en otoño conduce a un perfil uniforme en el oxígeno y a niveles más bajos de Fe y Mn debido a la precipitación y eliminación de estos metales de la columna de agua. Se debe tener en cuenta que la concentración de Mn aumenta antes que el Fe a finales de la primavera debido a su disolución a un pH más alto que el Fe. Sin embargo, debido a la velocidad de oxidación más lenta del Mn II, persiste en la columna de agua en el otoño durante un periodo más largo que el Fe II (Mason, 2013, p.703).

1.2.13.1. La estratificación estacional en el ciclo de los metales

En estas condiciones se desarrolla la anoxia y se acumula sulfuro en las aguas del fondo. Las condiciones de bajo oxígeno y el desarrollo de anoxia en los sedimentos conducen a la disolución reductora de las fases de óxido y liberación de metales y metaloides en solución. Durante el tiempo bajo de oxígeno, los niveles de Fe disuelto y los niveles de Fe total, aumentan sustancialmente en estas aguas deficientes en oxígeno y las concentraciones de Fe total son órdenes de magnitud más altas que en las aguas superficiales. La mayor parte del Fe y Mn se encuentran en la fracción disuelta, y probablemente esté presente como Fe (II) y Mn (II) reducidos, ya que las formas oxidadas son altamente insolubles (Mason, 2013, p.702).

1.2.13.2. Cambios en fisicoquímicos y potencial redox

En los sedimentos, las variaciones en el potencial redox y las condiciones físico-químicas pueden generar escenarios para liberar metales hacia el agua, lo que causa la bioacumulación de metales en especies de ecosistemas acuáticos (Márquez et al., 2008: p.130).

1.2.14. Movilidad de metales pesados en sedimentos lacustres

Los metales pesados en los sistemas acuáticos no son biodegradables, las partículas suspendidas se pueden agrupar acumulándose por procesos químicos (coprecipitación, precipitados y formación de compuestos orgánicos), físicos (adsorción y sorción) y biológicos (Organismos acuáticos). Posteriormente dichas partículas se incorporan en los sedimentos por procesos de precipitación (Pérez et al., 2015: p.96).

La transferencia de metales pesados hacia los sedimentos a través del agua se da bajo diferentes procesos como sustitución de un metal, intercambio catiónico, adsorción, dilución y ciertas condiciones físico-químicas. Cambios de pH, potencial redox y temperatura pueden liberar los contaminantes de una fase sólida a una fase líquida, pudiendo generar el ingreso de contaminantes a la cadena trófica y la contaminación de los sistemas acuáticos (Pérez et al., 2015: p.96).

Por otro lado, en los ecosistemas acuáticos naturales gran parte de los metales transportados se fija de manera rápida sobre el material sólido. La unión del material en suspensión con el metal en el último de los casos llevará a la inserción de los elementos traza en los sedimentos. Por esto, los sedimentos son un almacén bastante concentrado de metales (Rubio et al., 1995: p.36).

Dentro de los sedimentos los metales pesados se distribuyen en determinadas fracciones geoquímicas, existiendo varios estados de movilidad, lixivialidad y biodisponibilidad variables. En general, los metales de los sedimentos acuáticos se pueden dividir en aquellos que son relativamente inmóviles a largo plazo y aquellos cuya facilidad de movilidad a corto plazo tiene cierta importancia en lo que respecta a la exposición a la biosfera (Badri y Aston, 1983: p.182).

Debido a las características geológicas y químicas, los metales pesados en los sedimentos pueden presentarse de diversas formas: Intercambiable, solubles, incluido en óxidos de Mn o Fe, ligado a la materia orgánica, como componente de fosfatos, sulfuros, carbonatos y otros minerales secundarios como silicatos de forma residual (Yang et al., 2009: p.3).

1.2.15. Abundancia de minerales en la corteza terrestre

Estudios afirman que la distribución de los minerales y su diversidad en la tierra se rige por el equilibrio del mismo tipo de procesos que originaron la vida tal y como se conoce. Revela una relación entre los minerales en la tierra y la abundancia cortical de 72 elementos esenciales que están en la composición de los minerales, se muestra una tendencia general en la que el mayor número de especies minerales se encuentran en los elementos más abundantes, por ejemplo el O, se encuentra en más del 80% de minerales corticales (3984). El Si con 1430 especies, Ca (1197), Fe (1043) y Al (1006) son los cationes corticales más abundantes con el mayor número de compuestos minerales. Los minerales de elementos abundantes como el O, Mg, Si, Ca, Al y Fe, dominan en la corteza terrestre de todos los ambientes geológicos (Jiménez, 2015, p.344).

Por otra parte, es posible evidenciar que existen algunos elementos que pueden formar más especies minerales de lo que se espera en relación a su baja abundancia, ejemplo: Ag, As, Cu, Bi, H, Hg, Pb, Pd, S, Te, U y Sb. La explicación para estos casos se encuentra en las características cristaloquímicas de los mencionados elementos. Ciertas características son: 1) el elemento se presenta en varios estados de oxidación y por ello cumple múltiples papeles cristaloquímicos; 2) aunque relativamente el elemento sea raro, posee mecanismos de concentración eficientes, lo que genera abundancias locales elevadas. Este sería el caso de menas de Cu, Hg, Pb y U producto de enriquecimientos hidrotermales; 3) el elemento se encuentra en ambientes geoquímicos relacionados a otros elementos raros, aumentando las posibilidades de combinarse para formar minerales poco frecuentes de composiciones diferenciadas (Jiménez, 2015, p.345).

1.2.16. Técnicas de normalización geoquímica

Las técnicas de normalización geoquímica permiten corroborar el origen, la fuente y el grado de contaminación de muestras de suelo o sedimentos a través del cálculo de índices de geoacumulación y sus factores de enriquecimiento. Estas técnicas se pueden aplicar a sustancias inorgánicas y orgánicas. El empleo de las técnicas es satisfactorio para determinación de metales pesados en sedimento y suelos. La metodología se basa en la comparación de concentraciones de metales con relación a un elemento representativo en la corteza terrestre, que es el cual no ha cambiado su concentración a lo largo del tiempo a pesar de efectos naturales o antropogénicos que puedan presentarse (Quevedo y Meneces, 2016: p.5).

1.2.17. Valores de fondo de los informes de Turekian & Wedepohl (1961)

Los valores de fondo para el cálculo de los índices de geo-acumulación y factores de enriquecimiento para sedimentos por Turekian & Wedepohl (1961) encontrados en pizarras sedimentarias.

Tabla 1-1. Valores de fondo por Turekian & Wedepohl (1961)

Elemento	Valores de fondo (ppm) (roca sedimentaria, esquistos) Turekian & Wedepohl (1961)
Cd	0.3
Pb	20
Fe	47200
Mn	850

Fuente: Turekian & Wedepohl (1961)

Realizado por: Campusano, Alex, 2022.

1.3. Bases conceptuales

1.3.1. Sistema lacustre endorreico

Es el conjunto de masas de agua cerradas, lo que significa que no tienen salida superficial de las aguas y como toda laguna endorreica, sus aguas solo se escapan por procesos naturales de evaporación y en consecuencia todos los materiales suspendidos o disueltos permanecerán en el lago, a no ser que se extraiga por medios artificiales (De La Hoz y Gotilla, 2009: p.114).

1.3.2. Sistema lacustre Alto Andino

Los sistemas lacustres de la cordillera de los Andes se encuentran primordialmente en ecosistemas de jalca, paramos y punas. Por su origen y tipo pueden ser lagunas y lagos de agua dulce (volcánico ,glaciar y tectónico), lagunas saladas (antiguos mares con poco suministro de agua dulce), salares (antiguos mares en evaporación), lagunas salobres (antiguos cuerpos de agua con mayor concentración de agua dulce), bofedales y turberas (fuentes subterráneas o inundaciones), mallines (con alimentaciones subterráneas y superficiales, otorgándole la denominación de “oasis” en las zonas áridas), aguas termales y géiseres (actividad geotérmica junto a las fuentes de agua), entre otros. Su valor económico, cultural, ecológico y social debe considerarse para la construcción y ejecución de políticas de desarrollo en las naciones donde se encuentran (Ordóñez, 2011, p.9).

1.3.3. Sedimento lacustre alóctono

Alóctono se refiere al material que se originó fuera del lago o del cuerpo de agua, como su cuenca o su cuenca. Por ejemplo, las partículas de arcilla y suelo que se erosionaron en un lago se considerarían alóctonos (SMOL, 2009, p.34).

1.3.4. Sedimento lacustre autóctono

El material autóctono, como el material de algas muertas o los cuerpos de animales acuáticos, restos de plantas macrófitas acuáticas y precipitados químicos de procesos que ocurren dentro de la cuenca del lago, se origina en el propio cuerpo de agua (SMOL, 2009, p.34).

1.3.5. Manganeso

Para algunas especies acuáticas el manganeso es esencial como metal para el metabolismo enzimático, en sistemas acuáticos presenta una alta capacidad para absorber metales debido a su gran reactividad, lo que incluye en el comportamiento y su caracterización de otros metales en lagunas y estuarios (Márquez et al., 2008: p.128).

1.3.6. Aluminio

El aluminio es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre constituyendo el 8%, se lo encuentra en combinación con el oxígeno, sílice, flúor, además se presenta en varias formas químicas en gran cantidad en suelos, rocas y vegetación, además se presenta en forma natural en corrientes de agua y en las partículas de polvo del aire. El aluminio nunca se encuentra en forma de metal en la naturaleza, se encuentra combinado junto a otros elementos formando compuestos. A pesar de que el aluminio sea abundante en el ambiente, normalmente se lo encuentra en formas estables y no interactúa con los procesos biológicos que se llevan a cabo en los organismos vivos. Por otra parte, en condiciones ácidas, el aluminio puede desprenderse de suelos y rocas de formas solubles que podrían ser absorbidos por animales y plantas (Asociación Española del Aluminio, 2008, p.1).

1.3.7. Plomo

Este elemento representa aproximadamente el 0.002% en la corteza terrestre, de los metales pesados es el más abundante con un número atómico superior a 60. Existen más de 200 minerales de plomo, los más importantes son la cerusita (PbCO_3), piromorfita ($\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$), la legalena (PbS) y la crocoíta (PbCrO_4). El plomo pertenece al grupo IV-A en la tabla periódica, además tiene dos estados de oxidación +II y +IV. En compuestos inorgánicos la mayoría presenta estados de oxidación +II; de éstos, las sales básicas y de carbonato son completamente insolubles, por otro son ligeramente solubles en agua aquellas sales de cloruro y bromuro (Condori, 2021, p.19).

En los sedimentos y suelos el comportamiento del plomo está regulado por tres factores: primero por su adsorción específica con algunas fases sólidas, en segundo lugar está la precipitación de compuestos de plomo con una elevada estabilidad, y finalmente la formación de quelatos o complejos muy estables con materia orgánica de sedimentos y suelos (Condori, 2021, p.19).

El plomo penetra en los organismos por medio de alimentos contaminados, polvos desprendidos de pinturas que los contengan, el agua y por inhalación de los gases liberados por los vehículos. Causa daño en casi todos los sistemas cuando se presenta en la sangre, además dificulta el desarrollo de hemoglobina impidiendo la capacidad de transportar oxígeno (Condori, 2021, p.19).

1.3.8. Hierro

En la corteza terrestre, el cuarto elemento más abundante es el hierro, con (54kg/t) y el segundo de los metales, luego del aluminio (81 kg/t). En rocas ígneas como el basalto puede presentar valores de hasta 96 kg/t, mientras que en el granito se presenta en 27 kg/T. En las aguas la concentración de hierro suele ser baja y depende de factores como el Eh y pH. Su carácter geoquímico es la razón de su abundancia en la naturaleza, es un elemento siderófilo, presenta gran afinidad por el oxígeno y el azufre. Ante los agentes meteorizantes los minerales de hierro se comportan de maneras diferentes, una vez disociados la movilidad también es variada de acuerdo al ambiente químico donde están, la estabilidad y solubilidad dependen de la presencia de oxígeno. Materia orgánica, y el nivel de acidez de las aguas donde se transporta (Ramirez Ortega y San José Arango 2001).

Es de interés particular como elemento para la vida acuática, ya que es esencial para la producción de pigmentos respiratorios en varios animales, uno de estos pigmentos es la hemoglobina, también es importante para la fotosíntesis, ya que toma parte en citocromos que realizan la transferencia de electrones en el proceso. En los embalses y lagos el hierro se presenta como trivalente en las capas superiores pero en los fondos anóxicos se transforma en hierro bivalente soluble. Las bacterias determinan muchos procesos de reducción y oxidación del hierro, una forma en la que el hierro está mayormente disponible para el fitoplancton es como $Fe(OH)_3$. (Roldán y Ramírez, 2008: pp. 237-238).

1.3.9. Cadmio

Este elemento se presenta distribuido ampliamente en la corteza terrestre en una concentración de media de 0,1 mg/kg. En rocas sedimentarias e ígneas la abundancia no excede de 0.3 mg /kg y las concentraciones son similares en los depósitos de rocas metamórficas y arcillosas. A pesar que los niveles altos de Cd en los suelos se relacionen principalmente con la contaminación, su origen se puede explicar por procesos litológicos, la dispersión del cadmio en los ambientes tiene como origen del desgaste y erosión de las rocas. Sin embargo, la actividad volcánica subterránea es considerada la mayor fuente no antropogénica de la liberación del cadmio en la atmosfera (Ramelli et al., 2009, pp.1-2).

En el medio acuático el cadmio se presenta en forma de ion libre o como con complejo iónico que está asociado con otras sustancias orgánicas u inorgánicas. Los compuestos de cadmio solubles se mueven en el medio acuático, por otro lado, los insolubles se depositan en los sedimentos (Sanchez,2016,p.86).

El cadmio no es degradable por naturaleza y, por lo tanto, una vez liberado al medio ambiente, permanecerá en circulación. Las nuevas emisiones se suman a los depósitos de cadmio ya

existentes en el medio ambiente. El cadmio y los compuestos de cadmio son, en comparación con otros metales pesados, relativamente solubles en agua (Nordic Council of Ministers, 2003, p.3).

1.3.10. Variabilidad espacial Método IDW

Es el más rápido en los cálculos, pero, por otra parte, suele producir patrones no tan reales llamados “ojos de buey” circundantes y con origen en los puntos de muestreo. Es un método recomendado para cuando las bases de datos son pequeñas, donde no son conocidos los parámetros del variograma, también cuando es muy grande la distancia de muestreo incluso cuando dicha distancia es mayor al rango de correlación espacial (Villatoro et al., 2008, p.98).

1.3.11. Factor de enriquecimiento (FE)

El factor de enriquecimiento (EF) se puede utilizar para discriminar si las concentraciones de metales observados en los sedimentos de los lagos están influenciados por fuentes antropogénicas o la meteorización natural (Ekengele et al., 2017: p.308).

El factor de enriquecimiento se desarrolló inicialmente para especular sobre el origen de elemento en la atmosfera, precipitación o agua de mar. Pero fue extendiéndose progresivamente al estudio de suelos, sedimentos lacustres, turba, relaves y otros materiales ambientales. El factor de enriquecimiento proporciona el número de veces que se enriquece un elemento en comparación a con la abundancia de este elemento en el material de referencia. El cálculo de FE se ha definido relacionando el contenido de una muestra que contamina la concentración de un elemento conocido relativamente inmóvil en la muestra en comparación con la misma proporción encontrada en el material de referencia. Se toma al hierro como elemento de referencia estacionario para realizar el cálculo (Ekengele et al., 2017: p.308).

1.3.12. Índice de geo acumulación (I-geo)

El índice de geo-acumulación (I-geo) propuestos por Müller (1969). Es utilizado para determinar la contaminación mediante la relación de la contracción de un analito en la matriz de estudio contra los valores de control o referencia (Mora, 2021, p.41).

El I-geo es una medida cuantitativa del grado contaminación en sedimentos acuáticos, este índice empírico compara una concentración dada con un valor como de antecedentes geoquímicos (Ekengele et al., 2017: p.308).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODÓGICO

2.1. Tipo de investigación

Fundamentalmente, se trata de un estudio de tipo exploratorio que busca conocer la composición metálica de los sedimentos de las lagunas en base a la investigación de campo que se llevó a cabo, y soportada en información bibliográfica específica.

2.2. Diseño de la investigación

La investigación es básicamente de campo; las muestras fueron recolectadas directamente en los lechos de la laguna, y transportadas posteriormente a los laboratorios.

2.3. Identificación del área de estudio

La laguna Magdalena del sistema lacustre de Atillo, contenido en el Parque Nacional Sangay, se ubica a una máxima altura de 3648 m.s.n.m., con Latitud: 2°11'35.9664"S y Longitud: 78°30'57.5928"W, entre las lomas: loma mesa Rushca, loma Filo Cuyug Hanua, loma Punta y Atillo Grande, y corresponde a un espacio relativamente pantanoso, siendo la laguna Colay o Magdalena nuestra zona de estudio, esta es ubicada en la provincia de Chimborazo, en la ciudad de Guamote, parroquia de Cebadas en la comunidad San José de Atillo, el ingreso al complejo lacustre se realiza por la carretera Guamote-Macas (Delgado Yáñez, et al, 2019).

El acceso desde Riobamba es por la vía asfaltada de primer orden Macas-Riobamba, cruzando las parroquias: Flores, San Luis y Cebadas, Punin, el trayecto es de dos horas aproximadamente (Chiluiza, 2020, p.31).



Figura 1-2. Laguna Magdalena
 Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

2.3.1. Ubicación geográfica

Las coordenadas UTM_WGS84 (775996; 9758069) y la zona 17 de América del Sur corresponden al Sistema lacustre Magdalena del complejo de lagunas de Attilo en el Parque Nacional Sangay.

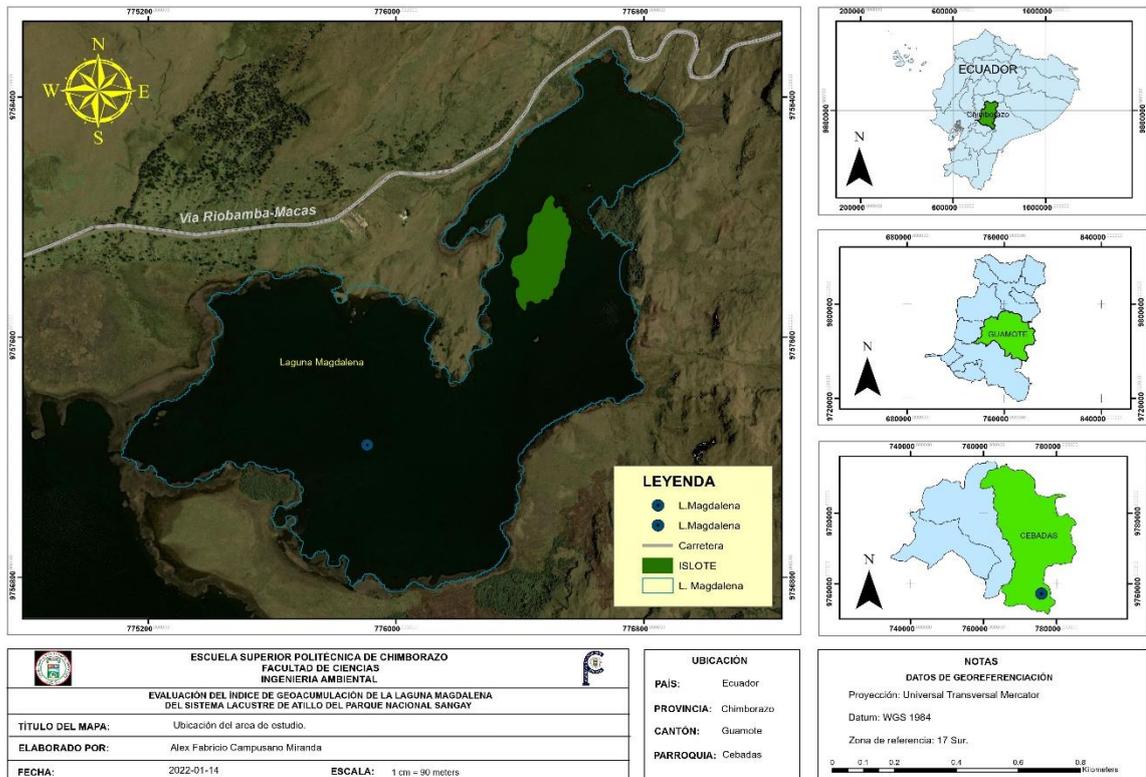


Figura 2-2. Ubicación del área de estudio

Realizado por: Campusano Alex, 2022. (GIDAC)

2.4. Características de la zona de estudio

La zona de estudio presenta ecosistemas de páramos con un entorno formado en su mayoría por montañas, compuesto por algunas lagunas de tamaño diferente. Están rodeadas por riscos y picos, amplias áreas de pajonales con riachuelos y descensos de agua, lo que hace más fácil el desarrollo de actividades piscícolas y eco turísticas. Complementando este marco de belleza apabullante se suman las especies de fauna y flora que viven en la zona, formando un auténtico edén para los sentidos (Bastidas, 2002, p.9).

En Atillo se presentan dos estaciones climáticas características, la época de lluvias y la época seca. La primera inicia en mayo y finaliza en septiembre, por otro lado, la segunda época empieza desde octubre y termina en abril. Desde junio a septiembre es temporada de fuertes vientos en el páramo, por otra parte, entre octubre y diciembre caen con frecuencia granizadas y heladas que inciden en las parcelas agrícolas que se encuentran en fase inicial de su crecimiento (Bastidas 2002). La comunidad de Atillo tiene una serie de lagunas (Cuyug, Negra, Colay, Champanapungo, Talalag). De la laguna Colay se origina el río Atillo, que es el afluente del río Chambo. La microcuenca del río Atillo es muy importante, porque de ella se irriga agua para los cultivos mediante canales de riego (Bastidas, 2002, p.33).

La vegetación de la zona es conformada principalmente por pajonales en los que se puede hallar diversa especies de plantas. Una de las representativas son la pumamaqui, la yagual, la sachá capulí, valeriana. La chuquiragua, chuca sunfo, caballo chupa, menta, tipillo, llantén, berrom ecorzonera entre otras. Ultimadamente, debido al crecimiento de la población, la necesidad de la leña ha ido aumentando, lo que ha conllevado a la extracción de leña de los chaparros localizados alrededor de la laguna y del Parque Nacional Sangay (Bastidas, 2002, p.35).

2.5. Determinación de los puntos de muestreo

La determinación del lugar y número de puntos para el muestreo se llevó a cabo previo a un recorrido preliminar por la zona de estudio, con el fin de realizar un análisis, prospección y definición de los factores determinantes para el muestreo. Como consideración se tomó en cuenta la representatividad del tamaño del área para el estudio, los objetivos establecidos, la tipología de datos necesarios, factores físicos superficiales determinantes en la accesibilidad. El área total de la investigación se dividió en 6 zonas de acuerdo a sus características superficiales. Cada uno de los puntos de recolección de muestra es lo más representativo de las características totales de las zonas sedimentarias que contiene la laguna, lo que significa que la muestra debe tomarse a distintas profundidades.

Otro criterio a tomarse en cuenta fue la accesibilidad, existen ciertas facilidades que debían presentar los puntos de muestro como son: el libre acceso vehicular lo más cercano posible a la

zona de estudio, distancia más corta para carga y transporte de materiales y muestras, todo con la única finalidad de minimizar el riesgo de accidentes y aprovechar eficientemente el tiempo disponible.

Con los criterios antes mencionados, se plateó lo siguiente: 6 zonas de muestreo en la laguna Magdalena, por su accesibilidad y diferentes características físicas externas e internas como: la presencia de vegetación superficial acuática, zonas de orilla, zonas centrales medianamente profundas, zonas libres o en aparente ausencia de vegetación subacuática, zonas con presencia de vegetación acuática y sub acuática y zonas centrales de poca profundidad.

Los puntos de muestreo fueron georreferenciados con una aplicación GPS móvil de acceso gratuito para celular (Coordenadas de mi GPS).

A continuación, se muestran las respectivas coordenadas de los puntos de muestreo de la laguna:

Tabla 1-2. Coordenadas de los puntos de muestreo

Punto	X	Y
p1 Z1	776680,834173	9758374,22372
p2 Z1	776802,754417	9758331,8903
p3 Z1	776616,301111	9758226,90342
p4 Z1	776689,300857	9758260,77016
P1 Z2	776680,834173	9758137,15658
P2 Z2	776545,367235	9758093,12982
P3 Z2	776535,207215	9758282,78354
P4 Z2	776447,153706	9758181,18333
p1 z3	776387,802254	9758057,78142
p2 z3	776379,864738	9757920,19781
p3 z3	776342,822997	9757769,38501
p4 z3	776344,939668	9757550,83874
P1 Z4	775582,938144	9757637,62225
P2 Z4	775860,222032	9757578,35546
P3 Z4	775784,021879	9757358,22169
P4 Z4	775498,271308	9757385,73841
p1 Z5	776129,568404	9757315,3591
p2 Z5	775912,609636	9757140,73375
p3 Z5	776089,880824	9756958,17089
p4 Z5	776277,735367	9757156,60878
P1 Z6	776468,235748	9757400,02594
P2 Z6	776600,527679	9757537,60955
P3 Z6	776640,215258	9757717,52657
P4 Z6	776629,631904	9757905,38111

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

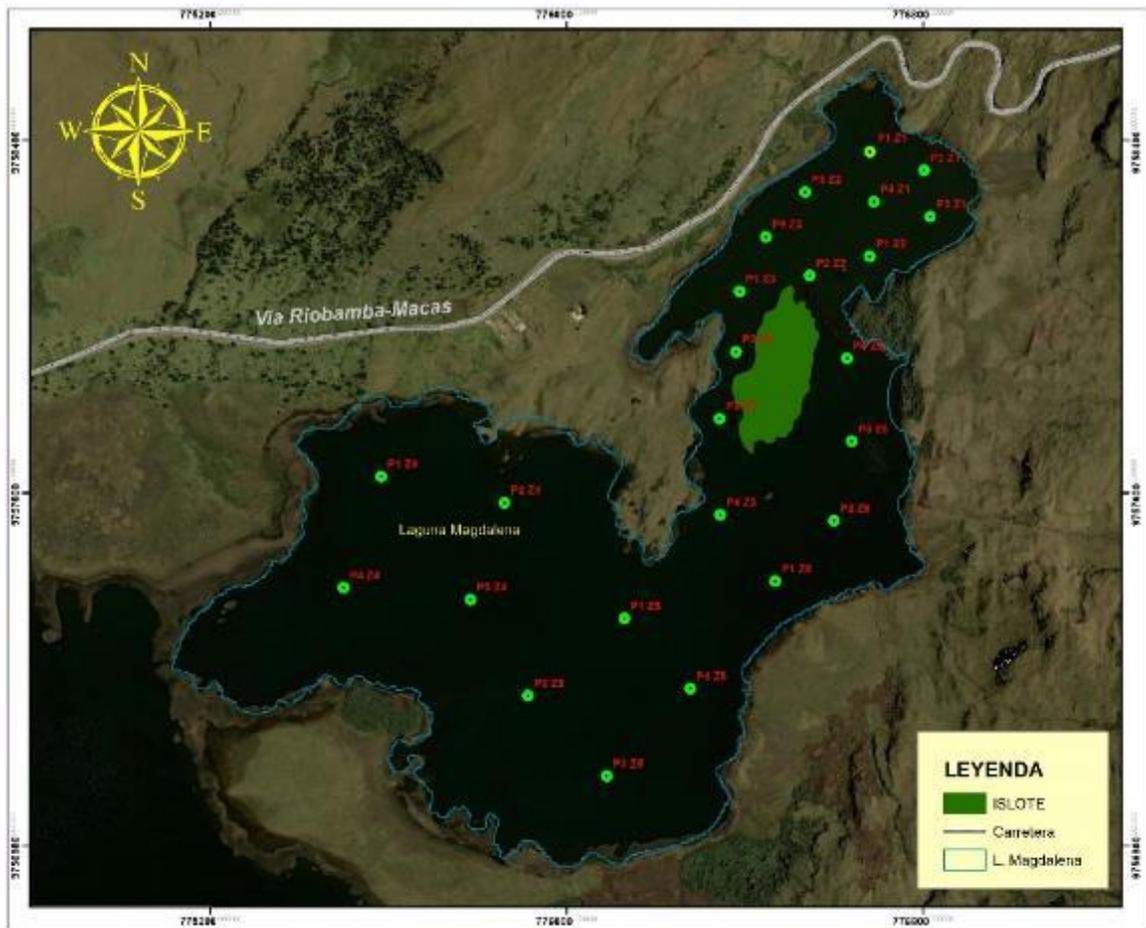


Figura 3-2. Puntos de muestreo en la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

2.5.1. Muestreo de sedimento

Para realizar la extracción de muestras es esencial definir un patrón de muestreo, que es aplicado consecuentemente en el área de estudio. El conjunto de características que describen la forma y el tipo de muestra que se tomara es definido bajo tres aspectos (AGQ, 2019, pp.4-6):

- Distribución espacial de las muestras.
- El patrón de muestreo debe ser elegido de acuerdo al tamaño y características morfológicas del área a muestrear.

La extracción de las muestras se la realizó con el uso de una draga van ven, con la cual se obtiene cerca de 500 g de sedimento del fondo de la laguna, lo que fue suficiente para los análisis de estudio. El muestreo se lo puede realizar con la embarcación en movimiento o en estado estacionario (AGQ, 2019, pp.4-6).

2.5.1.1. Muestra representativa de sedimentos

Los sedimentos de la laguna pueden definirse como el universo y de este se han de tomar 30 muestras de diferentes sitios de la laguna. Se debe tomar en consideración la tasa de sedimentación y el probable lugar de acumulación. Se contempla todas las posibilidades de escenarios, considerando su profundidad. Las muestras obtenidas en la superficie de los lagos corresponden a una capa de un par de centímetros de espesor (AGQ, 2019, p.5).

2.5.1.2. Equipos

Los equipos de campo aplicados de acuerdo a la tipología de la investigación se detallan a continuación:

- Draga Van Veen
- Cabo
- Recipiente de contención (Cubo plástico)
- Embarcación a motor y remos
- Espátula y o Palin de polietileno
- Palas
- Neveras
- Bosas de polietileno o envases de vidrio (Fundas Ciplox)

2.5.1.3. Procedimiento de extracción de muestras

El equipo específico utilizado corresponde a una draga Van Veen el cual permitió la manipulación de la capa más superficial del sedimento.

- Se procedió al armado y acondicionamiento del bote, para su uso en la investigación.
- Luego se activó el sistema de bloqueo de la draga en la posición de bocas abiertas, luego introdujo lentamente al agua y se lo dejó caer.
- El sistema de bloqueo se desactivó al momento que la draga tocó el fondo sedimentario, de forma que las bocas se cerraron instantáneamente capturando el sedimento dentro de la cavidad.
- Se haló de la cuerda o cadena para subir la draga hasta el recipiente de contención de la muestra, se abre la draga y el sedimento se guardó en fundas ciplox para ser llevadas al laboratorio (AGQ, 2019, p3).

2.5.1.4. *Prevención de riesgos*

Para llevar a cabo la toma de muestras fue necesario portar los materiales referenciados a continuación:

- Bote neumático
- Elemento sonoro
- Luces de posición
- Chalecos salvavidas
- Ropa de protección
- Botas de protección
- Guantes de protección
- Gafas de protección

2.5.1.5. *Envasado e identificación de muestras*

En bolsas de plástico herméticas se colocaron las muestras de sedimento y se rotuló cada una para identificarlas de la siguiente manera: código de la muestra, fecha recolección, lugar de extracción.

2.5.1.6. *Conservación y transporte de la muestra*

La conservación de las muestras se realizó a temperatura ambiente, cabe mencionar que no fue necesario el uso de conservantes químicos, su transporte se lo realizó con vehículo en bolsas plásticas grandes resistentes para evitar cualquier fuga o pérdida de muestra.

2.6. Tratamiento de las muestras

2.6.1. *Secado de muestras*

Existen diversos criterios para fijar la temperatura de secado de los sedimentos, ciertos investigadores como Crecelius *et al.*, (1975) y Welz & Meicher (1978) no reportan pérdida de mercurio a una temperatura de 60 °C de temperatura, no hay un acuerdo general, si existe pérdida de metales volátiles a temperaturas de entre 50-60 °C depende ciertamente de la naturaleza del sedimento, es decir por el tipo de enlaces que forman (elemental, metálico, iónico). Por otra parte, existen autores que manejan temperaturas para secado inferiores a 50 °C (Belkin y Sparck, 1993, pp. 106-110).

Tomando en cuenta la información anterior descrita y con el fin de evitar la pérdida de las propiedades químicas del sedimento, se procedió a secarlo a temperatura ambiente, esparciéndolo sobre papel cartón. Finalmente, se expuso el sedimento esparcido a la luz solar para acelerar el proceso de secado.

2.6.2. Tamizado de sedimentos

Para facilitar los análisis físico químicos de los sedimentos se procedió a secar y triturar con mortero y pistilo, para luego ser tamizados con tamices analíticos ASTM; se realizaron los siguientes pasos:

- Se trituró y molió las muestras que estaban completamente secas con la ayuda de un mortero y pistilo.
- Se tamizó las muestras con un tamiz de 2 mm y otro de 100 μm .
- Finalmente, se guardó la muestra tamizada en bolsas plásticas con seguros herméticos.

2.7. Medición de parámetros fisicoquímicos

2.7.1. Ensayo de pH

Un parámetro que tiene un efecto sobre la disponibilidad de los nutrientes minerales es el potencial de hidrógeno, es una propiedad química que se define como el logaritmo en base 10 del número de litros en dilución y que contiene el equivalente gramo de iones de hidrógeno; si existe más iones hidrogeno, el pH es ácido, por otra parte, si se presenta mayor cantidad de iones OH el pH es básico. El pH neutro se presenta cuando la concentración de iones OH e iones H se encuentran en la misma proporción (Mess, 2020, p.53).

El pH permite establecer la alcalinidad o la acidez. Cuando el pH es medio puede controlar las reacciones químicas de nutrientes del suelo que puedan o no encontrarse disponibles por su solubilidad para su absorción (Chiluiza, 2020, p.21).

El pH en sedimentos se determina en una suspensión del sedimento en agua destilada con una relación de 1:10 (Ordoñez, 2013, p.40). Las categorías o índices de Ph según el INIAP se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2-2: Índices de pH

PARÁMETRO	RANGO	INTERPRETACIÓN
pH	$\leq 5,5$	Ácido
	$> 5,5 - 6,5$	Ligeramente ácido
	$>6,5 - 7,5$	Prácticamente neutro
	$>7,5 - 8,0$	Ligeramente alcalino
	$>8,0$	Alcalino

Fuente: INIAP. EESC.2002.

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2021.

2.7.1.1. Procedimiento

El pH del sedimento de la laguna fue medido mediante un equipo medidor de pH marca Hanna bajo las siguientes consideraciones:

- Se realizó una disolución con agua destilada y la muestra.
- Se pesó 10 g de sedimento y se añadió a un vaso.
- Se midió en una probeta 40 ml de agua destilada.
- Se colocó los 40mL al vaso con la muestra de sedimento y se agito para homogeneizar.
- Se dejó en reposo durante 10 min aproximadamente hasta que sedimente.
- Se colocó la sonda del pH metro dentro del vaso para medir el pH. Se repitió el proceso con todas las muestras.

2.7.2. Ensayo de conductividad eléctrica

La capacidad medida de un material para facilitar el transporte de la corriente eléctrica se conoce como conductividad eléctrica, si el valor es alto, por ende la corriente se mueve a través del mismo con mayor facilidad, entonces se afirma que a mayor conductividad eléctrica, mayor será la concentración de las sales (Chiluiza, 2020, p.22).

De acuerdo con el INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, EC, 2000) Las interpretaciones de la conductividad eléctrica para muestras de suelo son las siguientes:

Tabla 3-2: Rangos de interpretación de Conductividad Eléctrica

PARÁMETRO	RANGO (dS/m)	INTERPRETACIÓN
Conductividad Eléctrica	$<2,0$	No salino
	2,0-3,0	Ligeramente salino
	3,1-4,0	Salino
	4,1-8,0	Muy salino

Fuente: INIAP.EESC.2002

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

2.7.2.1. Procedimiento

- Se realizó una disolución con agua destilada y la muestra de sedimento.
- Se pesó 10 g de sedimento y se añadió a un vaso.
- Se midió en una probeta 40 ml de agua destilada.
- Se colocó los 40 mL al vaso con la muestra de sedimento y se ajito para homogenizar.
- Se dejó en reposo durante 24 h aproximadamente hasta que sedimente.
- Se colocó la sonda del conductímetro dentro del líquido sobrenadante evitando tocar la parte sedimentada. Se repitió el procedimiento con todas las muestras.

2.7.3. Ensayo de color con el método Munsell soil color charts

La longitud de onda del espectro visible es el color que adopta el suelo cuando este refleja dichas ondas al ser impactado por la luz. Es una propiedad física del suelo que está relacionada con la cantidad de minerales de manganeso, hierro y materia orgánica. El color del suelo tiene un efecto sobre la humedad y su temperatura a causa del efecto sobre la energía radiante recibida. Los suelos oscuros bajo la energía radiante se seca más deprisa que uno de color claro, ya que el suelo oscuro absorbe mayor energía, por lo tanto, presentar mayor cantidad de energía calorífica disponible, con lo que se acelera el proceso de evaporación (Chiluiza, 2020, p.24).

2.7.3.1. Procedimiento

- Se tomó aproximadamente 1 cm^3 de muestra de sedimento seca y pulverizada.
- Se colocó la muestra de sedimento seca sobre una hoja blanca y limpia, luego se puso detrás de los círculos presentes en la tabla de Munsell.
- Se realizó la comparación de colores hasta dar con la que más semejanza tenga.
- Se tomó nota de la codificación de la tabla del color elegido, se tomó en cuenta el matiz, los valores numéricos localizados sobre la parte vertical izquierda como numerador y el croma localizado en la zona inferior en la tabla como denominador.
- Se anotó el equivalente a la clave ubicada en el reverso de la hoja anterior.

2.7.3.2. Interpretación:

Tres son las características incluidas en las cartas de color y un nombre para cada color. Por ejemplo, la clave de color rojizo puede ser 5YR 5/3. La primera característica, 5YR, representa al tinte o matiz (hue), el mismo que muestra la relación del color con verde, azul, amarillo, rojo o

purpura, y se designa una carta por cada matiz. La segunda característica, 5/, hace referencia al brillo o pureza (value) y muestra la claridad del color; presenta una variación desde el más claro en la parte superior hasta el más oscuro en la parte inferior de la carta. La tercera característica, 3, indica la saturación o intensidad (chroma), indica la desviación o la fuerza del color del gris con una igual claridad.

Color negro: Es asociado con condiciones de buena fertilidad, saturación y con gran actividad biológica, se relaciona a la incorporación de materia orgánica que es descompuesta y le da coloración al suelo, es un color asociado a la existencia de carbonatos Mg_{2+} o Ca_{2+} y otros cationes ($Na+$, $K+$).

Color rojo: Es relacionado con procesos bajo condiciones de altas temperaturas, provocando alteraciones de materiales parentales, baja actividad del agua, y acelerada incorporación de materia orgánica, además de una elevada liberación de Fe presente en las rocas; es un indicador de alta meteorización, asociada a niveles bajo de fertilidad, pH ácidos y ambientes con procesos oxidativos.

Color amarillo a marro amarillento claro: Indica la meteorización en ambientes aeróbicos, es relacionado con condiciones medias y bajas de fertilidad. Se lo relaciona con presencia de óxidos hidratados de Fe_{3+} .

Color marrón: Es relacionado con la ocurrencia de materia orgánica, ácida semi descompuesta y asociaciones de óxidos de Fe más materiales orgánicos. Presenta una relación con niveles bajos e intermedios de materia.

Color blanco o ausencia de color: es debido especialmente a la acumulación de los minerales como dolomita, calcita y yeso, así como también algunas sales y silicatos. Es igualmente asociado con tierras alcalinas ($CaCO_3$, $MgCO_3$) con presencia de sales altamente solubilizadas (cloruros, nitratos de $Na+$ y $K+$).

Color gris: suele ser indicativos de ambientes anaeróbicos. Este ambiente está presente en sedimentos profundos, donde el oxígeno suele ser escaso. En estas condiciones, bacterias anaerobias utilizan el Fe_{3+} presente en minerales como hematita y geotita como un aceptor de los electrones para su metabolismo.

Color verde: este color está presente en algunos suelos con mal drenaje. Es asociado con la existencia de Óxidos Fe_{2+} (oxidados incompletamente).

Color azulado: en zonas pantanosas, costeras o deltaicas donde existe presencia de aniones sulfato y predominan condiciones de reducción (Agotamiento del oxígeno y saturación con agua) adicionalmente, esta coloración se relaciona con la presencia de fosfatos ferrosos hidratados (vivianita) y óxidos hidratados de Al (Aloista) (Chiluiza, 2020, pp.24-26).

2.8. Materia orgánica por pérdida de peso por ignición (LOI)

Muchos nutrientes del suelo son almacenados en la materia orgánica. Mejora la estructura y sueltan los suelos de arcilla, mejoran la capacidad para retener nutrientes y previenen la erosión. La cantidad de materia orgánica depende de la vegetación, el clima, la textura del suelo, organismos vivos (Andrades et al., 2015: p.57).

De acuerdo con el INIAP (Instituto Autónomo de Investigación Agropecuaria, EC, 2000) El contenido de materia orgánica según su porcentaje es descrito de la manera siguiente:

Tabla 4-2: Interpretación de Porcentaje de materia orgánica

PARÁMETRO	RANGO	INTERPRETACIÓN
Materia Orgánica (%)	<3.0	Bajo
	3.0-5.0	Medio
	>5.0	Alto

Fuente: INIAP. EESC. 2002

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

2.8.1. Procedimiento

El método que se utilizó está basado en la calcinación de una pequeña cantidad de suelo seco (5 g) previamente pulverizado y pasado a través de un tamiz de 160 um para luego ser sometido en un horno mufla a 400 °C. A esta temperatura se produce la pérdida de materia orgánica del suelo en forma gaseosa, generalmente como vapor de agua y compuestos gaseosos de carbono (Andrades et al., 2015: pp.57-58).

- Se sometió al proceso de secado 24 crisoles, en una mufla a 800C durante 2 horas.
- Se extrajeron los crisoles luego de que la temperatura disminuyo a 360 C y se colocaron en un desecador para ser trasladado a la balanza analítica.
- Se rotuló y pesó cada uno de los crisoles.
- Se pesó 5 gramos de suelo secados al aire en cada crisol, se anotaron los datos obtenidos.
- Se colocó los crisoles con las muestras de suelo en la estufa, a 105 C, para un tiempo de 24 horas.
- Terminada las 24 horas se extrajo los crisoles para colocarlos en el horno mufla a una temperatura de 400 C durante 2 h.
- Finalmente, se pesaron nuevamente los crisoles con las muestras de suelo incineradas.
- Se aplicó la ecuación descrita en la metodología.

$$\%MO = \frac{m3-m4}{m3-m1} * 100 \quad (\text{Ec.1-2})$$

Donde:

M1 = Crisol vacío

M2 = Crisol más 5 gramos de muestra

M3 = Peso de crisol más muestra de estufa a 105 C

M4 = Peso del horno mufla 360 C

2.9. Nitrógeno por el método de Dumas

La combustión de Dumas es un método utilizado para obtener la cantidad de nitrógeno total en una matriz generalmente orgánica. En altas temperaturas, en atmosferas de oxígeno se combustiona una muestra. Por medio de tubos de reducción y oxidación, el nitrógeno se transforma cuantitativamente en N_2 . El nitrógeno es medido por un detector de conductividad. Los datos de los resultados se presentan a manera de porcentaje o en mg de litros (Müller, 2017. p2). De acuerdo a los lineamientos impuestos por el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, EC, 2000 (INIAP), es posible la interpretación de los niveles de nitrógeno en suelo de la siguiente manera:

Tabla 5-2: Rango de interpretación de Nitrógeno.

PARÁMETRO	RANGO	INTERPRETACIÓN
Nitrogeno (%)	< 0.15	Bajo
	0.15-0.30	Medio
	>0.30	Alto

Fuente: INIAP. EESC. 2002.

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

2.9.1. Procedimiento

- Se tamizó la muestra con un tamiz de 180 μ m.
- En una estufa se secó la muestra a 110 °C.
- Se tomó un gramo de muestra aproximadamente y se colocó en el equipo de análisis.
- Se determinó los porcentajes para N, C y H.

2.10. Fósforo por el método de Olsen

El método creado por Olsen et al, en 1954 consiste en la extracción por medio de bicarbonato de sodio. Sirve para la obtención de fósforo en tipos de suelo ácidos y alcalinos. La solución utilizada de bicarbonato de sodio tiene un pH de 8.50, en principio los iones de bicarbonato reemplazan a los fosfatos de aluminio y hierro en los suelos ácidos, por otra parte, en suelos alcalinos los iones

del bicarbonato producen precipitación de calcio como CaCO_3 por ende en la solución disminuye la actividad del calcio (McKean, 1993, p.39).

Tabla 6-2: Rango de interpretación de Fósforo

PARÁMETRO	RANGO	INTERPRETACIÓN
Fósforo (mg/L)	<10.0	Bajo
	10.0-20.0	Medio
	>20	Alto

Fuente: INIAP. EESC.2002.

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

2.10.1. Procedimiento

- Previamente, se prepara las soluciones necesarias para el desarrollo de la metodología, las cuales son: hidróxido de sodio 1 M, bicarbonato de sodio 0.5 M pH 8.5, ácido sulfúrico 2.5 M y la solución de color.
- Se colocó 2.5 g de suelo y 30 ml de 0.5 M de NaHCO_3 (pH 8.5) en un tubo falcón de 50ml con tapa.
- Se ajito las muestra en un agitador mecánico por 30 min.
- Se filtró las muestras con ayuda de un kitasato, papel filtro, embudo de buchner y bomba de vacío.
- Se tomó y coloco 5 ml de la solución filtrada en frascos contenedores, luego se añadió 1ml de H_2SO_4 2.5 M
- Se agitó los frascos para eliminar las burbujas.
- Se agregó 10 ml de la solución de color con la ayuda de una pipeta en cada uno de los frascos.
- Se esperó el tiempo de 15 min como indica la metodología.
- Se calibró el espectro fotómetro previamente con los patrones y longitud de onda de 860nm.
- Se colocó la muestra en celdas de cuarzo para su posterior lectura en el espectro.
- Se anotaron los valores de concentración y absorbancia.
- Se comprobaron los valores obtenidos en la curva de corrección para el método de Olsen.

2.11. Capacidad de intercambio catiónico

Para determinar los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) se empleó una solución de acetato de amonio amortiguada, dicha solución fue añadida en un volumen de 25 ml para cada muestra (McKean, 1993, p.25). La medida de la capacidad del suelo para el intercambio y retencion de nutrientes de cargas positivas (CIC). Comprende a los nutrientes como: Ca^{++} ; k^+ ; Mg^{++} y H^+ las cargas negativas atraen a los cationes que se encuentran asociandos con particulas del tamaño

de materia orgánica y arcilla. En suelos fértiles las bases intercambiables conforman cerca del 80-90% de la CIC total (Venlasaga y Flores, 2021, p.52).

$$CIC(meq) = \frac{ppm\ Ca}{200} + \frac{ppm\ Mg}{120} + \frac{ppm\ K}{390} + \frac{ppm\ Na}{230} \quad (\text{Ec.2-2})$$

2.11.1. Procedimiento

- Se pesó 5 g de suelo en envases plásticos de 50 ml.
- Se agregó 25 ml de acetato de amonio 1M y se lo agitó por 30 min.
- Se filtró al vacío. El filtrado se recogió en frascos de 100 ml.
- Se lavó el suelo con cantidades pequeñas de la solución de acetato de amonio.
- Se aforó la cantidad filtrada con agua ultrapura hasta los 100 ml.
- Se realizó una disolución tomando 2 ml a partir de los 100 ml iniciales para ser aforados con agua ultra pura hasta los 50 ml. Este paso se realizó para todas las muestras.
- Se analizaron las disoluciones con el espectro de absorción atómica.
- En el caso del sodio se requirió una segunda disolución, para lo cual se tomaron 10ml de la primera disolución para mezclarlos con 10 ml de agua ultra pura.
- Se calculó la CIC mediante la ecuación citada por Venlasaga y Flores (2021)

2.12. Determinación de aluminio intercambiable

Para suelos con $pH < 5.5$ la acidez intercambiable depende de la cantidad de aluminio e hidrogeno en el suelo (McKean, 1993, p.28).

2.12.1. Procedimiento

- Se prepararon los estándares a 5, 10, 20, 30 y 50 ppm para la curva de calibración.
- Se pesó 5 gramos por muestra de sedimento.
- Se agregó el sedimento en frascos de muestras con tapa.
- Se preparó 1 L de una solución de cloruro de potasio (KCl) 1 M.
- Se preparó una solución de yoduro de potasio (KI), con 5g en 100 ml.
- Se añadieron 25 ml de KCl a los frascos con sus respectivas muestras.
- Se agitaron los frascos tapados aproximadamente 10 min.
- Se filtró al vacío con el embudo Buchner y con papel filtro en el kitazato.
- Se colocó el extracto de sedimento en un frasco debidamente etiquetado y se agregó 1ml de la solución de KI.

- Se realizó la determinación por espectroscopia de absorción atómica en el equipo Thermo Fisher Scientific, con el uso de lampara de catodo hueco de aluminio.

2.13. Extracción de metales pesados método 3050B (EPA SW 846)

El método que se empleó en la investigación se basa en la digestión ácida para la preparación de sedimentos, lodos y muestras de suelo para análisis por espectrometría de absorción atómica de llama (FLAA). Este método es una técnica de digestión para la mayor parte de muestras, ya que disolverá casi todos los elementos que podrían volverse “ambientalmente disponibles” (EPA, 1996, p.1).

2.13.1. Procedimiento

- Se mezcló bien la muestra para lograr homogeneidad y se tamizó con un tamiz de 150 μm .
- Se pesó 1 g de muestra de sedimento seco en un matraz resistente al calor.
- Se añadió 10 ml de solución 1:1 HNO_3 , se mezcló y tapó el matraz con un vidrio reloj.
- Se colocó y calentaron las muestras a 95 °C durante 15 min.
- Se agregó 5 ml de HNO_3 concentrado y se dejó refluir por 30 minutos.
- Se añadió 5 ml de HNO_3 hasta que los humos marrones desaparecieron.
- Se colocó el filtrado en frascos para su posterior análisis.
- Se dejó enfriar la muestra y se añadió 2 ml de agua y 3 ml de H_2O_2 al 30%, nuevamente se dejó refluir.
- Se añadió H_2O_2 al 30% en alícuotas de 1 ml con calentamiento hasta que la efervescencia desapareció.
- Se dejó evaporar la muestra hasta 5 ml en un tiempo aproximado de 2 h.
- Se añadieron 10 ml de HCl concentrado a la muestra, se cubrió con el vidrio reloj y se calentó a 95 °C durante 15 minutos.
- Se filtró el digestado a través de papel filtro Whatman No.41.
- Se recogió 10 ml de filtrado y se aforo hasta 50 ml con agua ultra pura.

2.14. Concentración de metales pesados por el método 7000B, FLAA

Los metales en solución se pueden determinar fácilmente mediante llama (aspiración directa) atómica espectrofotometría de absorción. El método es simple, rápido y aplicable a una gran cantidad de muestras ambientales que incluyen, entre otras, aguas subterráneas, muestras acuosas, extractos, desechos industriales, suelos, lodos, sedimentos y desechos similares. Con la excepción

de los análisis de componentes disueltos, todas las muestras requieren digestión antes del análisis. El análisis de elementos disueltos no requiere digestión si la muestra se ha filtrado y luego se ha acidificado (EPA, 2007, p.1).

2.14.1. Procedimiento

Para la determinación de la concentración de metal, se determinó la concentración en la curva de calibración

- Si se requirió dilución de la muestra:

$$\mu\text{g/L de metal en la muestra} = \frac{A(C\%B)}{C} \quad (\text{Ec.3-2})$$

Donde:

A= $\mu\text{g/L}$ de metal en alícuota diluida de la curva de calibración.

B= Volumen de la muestra inicial, ml

C= Volumen final de muestra, ml (EPA, 2007).

- Para muestras sólidas, informe todas las concentraciones en unidades consistentes basadas en peso:

$$\text{Mg de metal/kg de muestra} = \frac{A*W}{W} \quad (\text{Ec.4-2})$$

Donde:

A= mg/L de metal en la muestra procesada de la curva de calibración.

V= Volumen final de la muestra procesada, L.

W= Peso de la muestra Kg.(EPA, 2007)

- No se deben utilizar tiempos de integración diferentes para muestras y estándares. En su lugar, la muestra se debe diluir y se debe usar el mismo tiempo de integración tanto para las muestras como para los estándares. Si se requirió dilución de la muestra:

$$\mu\text{g/L de muestra de metal} = \frac{Z(C\%B)}{C} \quad (\text{Ec.5-2})$$

Donde:

Z= $\mu\text{g/L}$ de metal leído de la curva de calibración o del sistema de lectura.

B= Volumen de muestra inicial, mL.

C= Volumen final de muestra, mL. (EPA, 2007)

2.15. Variabilidad espacial por el método de IDW

Para determinar la variabilidad espacial de las concentraciones de los metales analizados de la zona de estudio se utilizó el software Arcgis 10.3, herramienta con la cual se pudo aplicar la metodología del IDW la que se basa en modelos matemáticos que incluyen la auto correlación y presunción de distancia y dirección entre varios puntos lo que permite generar una superficie de predicción que refleja una correlación espacial. Dicha metodología se utilizó para explicar la variación de las concentraciones de los metales en la superficie de la zona de estudio. Con los resultados obtenidos se crearon mapas temáticos para su difusión y presentación.

2.16. Incidencia de nutrientes en metales con estadístico

2.16.1. Correlación de Pearson

El coeficiente R de correlación de Pearson permite determinar el grado de asociación y relación lineal entre dos variables cuantitativas. El valor del coeficiente de correlación está dentro del intervalo de $-1 < 0 < 1$; la correlación con valor igual a 0 significa ausencia de relación. Cabe recalcar que la magnitud de la relación se refleja en el valor numérico mientras que el signo es la dirección de tal valor. Dicho lo anterior, una correlación perfectamente es positiva cuando el valor es 1 mientras que es perfectamente negativa cuando la relación es -1. Cuando es positiva, la relación es directamente proporcional entre la variables, mientras que cuando es negativa la relación es inversamente proporcional (Franklin et al. 2018. PP.587-590).

Tabla 7-2. Interpretación del coeficiente de relación de Pearson según Cohen.

Rango de valores de R	Interpretación
$0 \leq r < 0.10$	Correlación nula
$0.10 \leq r < 0.30$	Correlación débil
$0.30 \leq r < 0.50$	Correlación moderada
$0.50 \leq r < 1.$	Correlación fuerte

Fuente: Franklin et al.2018.

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

2.16.2. Procedimiento

- En la interfaz del programa informático statgraphics se introdujeron los datos de concentración de nutrientes junto con los datos de contracción de metales para realizar el análisis estadístico de correlación lineal entre las variables cuantitativas.
- Se interpretaron los datos obtenidos aplicando los criterios para la magnitud del coeficiente de relación de Pearson según sugerencias de Cohen.

2.17. Determinación de Factor de enriquecimiento

Una vez que se obtuvieron las concentraciones de los metales analizados, se procedió con el cálculo del factor de enriquecimiento para cada punto de muestreo, para lo cual fue importante tener los valores de fondo de concentración para cada metal.

Tabla 8-2: Clases de factores de enriquecimiento de un metal pesado

Clase de Factor de enriquecimiento	Origen del elemento (metal pesado)
1-10	De la roca madre
10-500	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre
<500	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénico

Fuente: Lawson y Winchester, 1979

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

Los elementos mayormente abundantes en la corteza terrestre son tomados en cuenta para el cálculo del factor de enriquecimiento, elementos como Si, Al y Fe. El modelo del factor de enriquecimiento está dado por la ecuación (Juárez et al., 2005: p.158).

$$FE = \frac{\left(\frac{Me}{Fe}\right)_{sample}}{\left(\frac{Me}{Fe}\right)_{Background}} \quad (\text{Ec.6-2})$$

Donde:

FE: Factor de enriquecimiento.

$\left(\frac{Me}{Fe}\right)_{sample}$: Razón entre el metal *Me* y el Fe presente en la muestra.

$\left(\frac{Me}{Fe}\right)_{Background}$: Razón entre el metal *Me* y el Fe presente en la corteza terrestre (Juárez et al., 2005: p.158).

2.17.1. Procedimiento

- Primero se determinó la concentración de los metales mediante espectroscopia de absorción atómica.
- Se consideró el valor de fondo la concentración de hierro de la corteza terrestre.
- Se calculó el factor de enriquecimiento mediante la ecuación propuesta por la metodología utilizada.

2.18. Determinación de Índice de Geo-acumulación

Para la determinación de los índices de geo acumulación para cada punto fue necesario tener el valor en unidades de $\mu\text{g/g}$, ya que de esta forma nos facilitó la interpretación del resultado, se tomó en cuenta el valor de fondo más apegado a las condiciones geológicas a la zona de estudio.

Tabla 9-2: Grado de contaminación de acuerdo al Índice de Geo-acumulación.

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

Fuente: Serra, et al, 2014.

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022.

El índice de geo-acumulación se calcula de acuerdo a la ecuación de (Müller,1986).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_n}{1,5 \cdot B_n} \quad (\text{Ec.7-2})$$

Donde:

c_n : Corresponde a la concentración medida del metal n ($\mu\text{g/g}$ p.s.) en el sedimento.

B_n : Corresponde al valor background (concentración geoquímica) para el metal n.

El factor 1.5 es de correlación de la matriz de fondo, se utiliza para posibles variaciones en los datos de fondo debido a efectos litogénicos (Ekengle et al., 2017: p.308).

2.18.1. Procedimiento

- Se determinó las concentraciones de los metales mediante espectroscopia de absorción atómica.
- Se consideró el valor de fondo para cada metal en base a la bibliografía empleada.
- Se calculó el índice de geo acumulación aplicando la ecuación descrita.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros físico químicos

3.1.1. Color



Gráfico 1-3. Porcentaje de color promedio presente en sedimentos de la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

En el gráfico 1-3 se observa el porcentaje promedio por zona del color del sedimento seco obtenido por la metodología “Munsell soil color charts”. Los colores más representativos en el área de estudio son: dark gray, dark grayish brown y dark olive gray. No se presenta homogeneidad en cuanto a los colores dentro del área de estudio, lo que puede ser debido a las distintas condiciones del fondo sedimentario. El color dark gray es un indicativo de ambientes anaerobios de sedimentos profundos donde el oxígeno suele ser escaso, El color very dark grayish brown muestra la ocurrencia de materia orgánica ácida semi descompuesta en asociaciones con óxidos de hierro, finalmente el color dark olive gray es indicativo de la presencia de óxidos férricos. (Chiluiza, 2020, pp.24-26).

3.1.2. pH

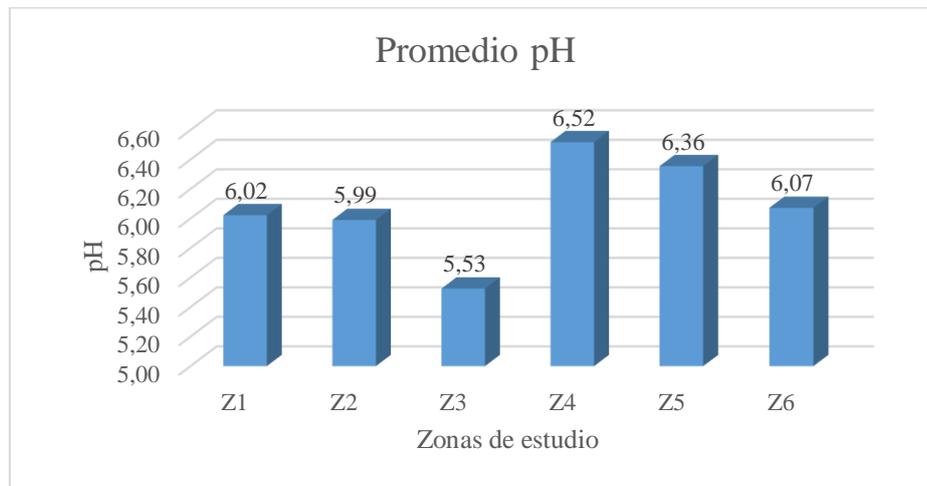


Gráfico 2-3. Valores de pH promedio en sedimentos de la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano, Alex, 2022. (GIDAC)

En el gráfico 2-3 se puede evidenciar valores promedios por zona para el pH en el sedimento, el pH más bajo está en la zona 3 mientras que el pH más alto le corresponde a la zona 4. Como resultado, en base a los índices establecidos por el INIAP. EESC.2002, el sedimento de la laguna Magdalena es considerado ligeramente ácido ya que los valores promedios obtenidos están dentro del intervalo de 5.5-6.5. En un estudio realizado por Ekengele et al. (2017) de los sedimentos del lago Lere el pH obtenido varía de 4.5 a 6.4 con un promedio de 5.5. El pH obtenido en estos sedimentos es ligeramente ácido a ácido. Esta acidez podría explicarse por la geología del área dominada por rocas graníticas y suelos rojos (Ekengele et al., 2017: p.308)

3.1.3. Conductividad eléctrica

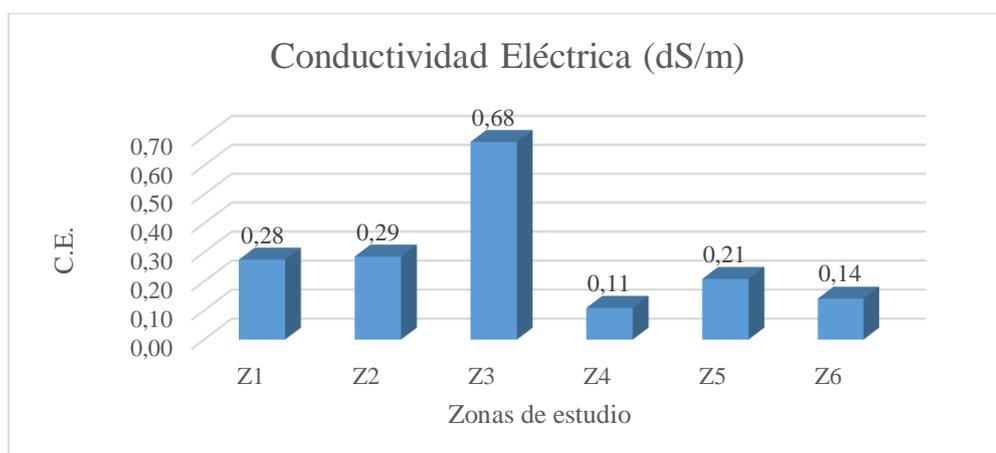


Gráfico 3-3. Conductividad eléctrica promedio en sedimentos de la laguna Magdalena.

Realizado por: Alex Campusano, 2022. (GIDAC)

En los sedimentos la conductividad eléctrica refleja la cantidad de sales que se encuentran presentes. Este parámetro puede determinar la fertilidad de los suelos, puesto que las sales conforman a los nutrientes que las plantas y organismos acuáticos necesitan para su crecimiento; por otra parte, un exceso de sales puede inhibir el desarrollo de los organismos acuáticos (McKean, 1993, p.15).

El gráfico 3-3 representa valores promedio de la conductividad eléctrica por zona de estudio en la laguna Magdalena, dichos valores se obtuvieron en el laboratorio y se evidencia no homogeneidad en los mismos; sin embargo, según el criterio establecido por el INIAP. EESC. 2002 los sedimentos analizados tendrían un carácter no salino debido a que los valores están por debajo del límite establecido (<2 dS/m).

3.1.4. *Materia orgánica*

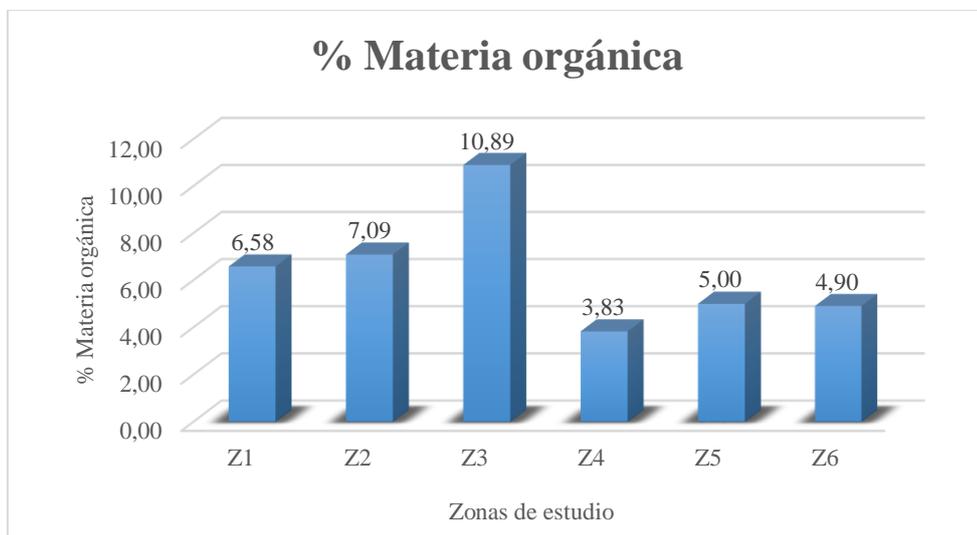


Gráfico 4-3. Porcentaje de materia orgánica en sedimentos de la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano, Alex, 2022. (GIDAC)

En base al resultado del gráfico 4-3 de los porcentajes de materia orgánica promedio de cada una de las zonas dentro de la laguna Magdalena, se puede observar que la zona 4 presenta el valor más bajo, esto debido a las condiciones de los puntos de muestreo como la profundidad, la poca presencia de vegetación acuática que se traduce en la falta procesos fotosintéticos que contribuyen a la fijación de carbono y poca actividad por biomasa en el lugar es lo que podría explicar el bajo porcentaje de materia orgánica en la zona 4. Por otro lado, el valor más alto en promedio obtenido corresponde a la zona 3 la cual presenta características como: presencia de vegetación acuática, profundidades menores en comparación a las otras zonas de estudio, presencia de material de origen orgánico como hojas secas provenientes de los árboles ubicados en el Islote, presencia de plantas sub acuáticas que por procesos de degradación y recirculación fomentan la producción y

concentración de materia orgánica. Según establece el INIAP. EESC.2002, en los índices para porcentaje de materia orgánica, los resultados obtenidos reflejan un alto contenido de materia orgánica en las zonas (Z1, Z2, Z3) por otro lado, las zonas (Z4, Z5 Y Z6), presentan un contenido de materia orgánica medio. En un estudio realizado por Ekengele et al. (2017) en los sedimentos del lago Lere con características similares al lago de estudio en esta investigación, se encontró que el contenido de materia orgánica varió de 0.180% a 5.170% con un promedio de 1.532%. El contenido de materia orgánica de los sedimentos es el resultado de la descomposición tanto de plantas como de otros organismos por acción bacteriana, además de los derivados de los depósitos terrígenos. Con sus propiedades coloidales, la materia orgánica juega un papel importante en la retención de metales pesados (Ekengele et al., 2017: p.309).

3.1.5. Fósforo

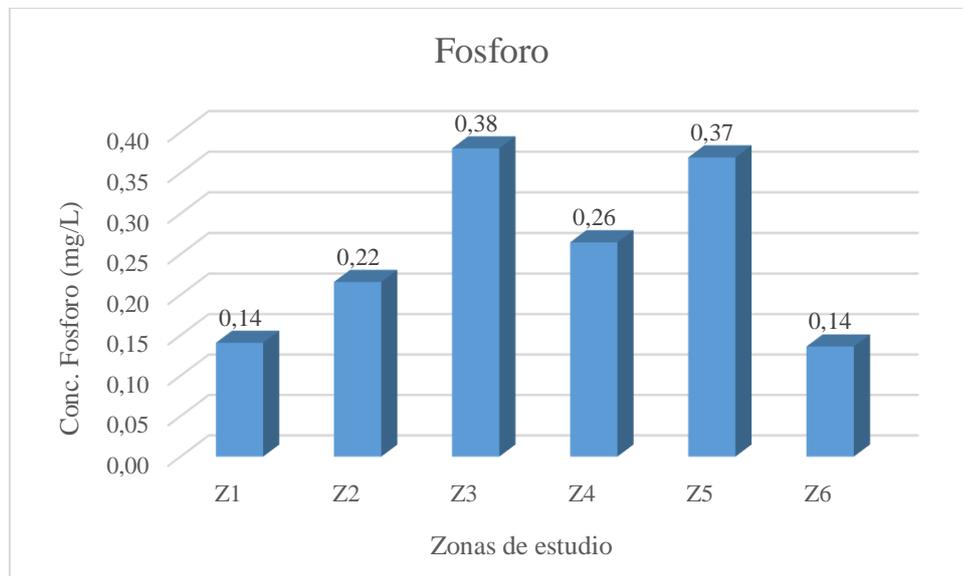


Gráfico 5-3. Concentración de fósforo en los sedimentos de la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano, Alex, 2022. (GIDAC)

Como se observa en el gráfico 5-3, las zonas de mayor concentración fósforo son: Z3 y Z5 con un valor máximo de 4.56 mg/L mientras que el valor más bajo está en la zona 6 con un valor de 1.63 mg/L. Según establece el INIAP. EESC.2002, para concentración de fósforo en suelo, los resultados obtenidos por zona están comprendidos dentro del rango de 0 a 10 mg/L lo cual indica que los niveles de fósforo en los sedimentos de la laguna magdalena son bajos.

3.1.6. Nitrógeno

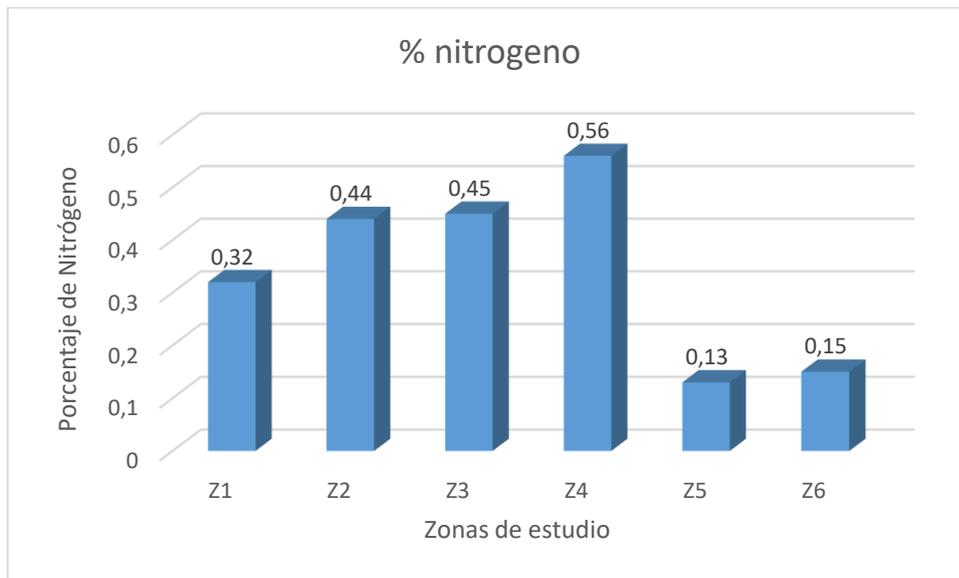


Gráfico 6-3. Porcentaje de nitrógeno en los sedimentos de la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

Según los índices establecidos por el INIAP. EESC.2002, los valores de porcentaje de nitrógeno en los sedimentos del gráfico 6-3, son altos en las zonas 1, 2, 3 y 4, ya que están por encima del 0.30%, mientras que en las zonas 5 y 6 los valores de porcentaje de nitrógeno en sedimentos están por debajo del 15%. En diferentes lagos de zonas templadas se han realizado estudios, los cuales demuestran que bacterias fijadoras de nitrógeno se encuentran en los sedimentos más no en la columna de agua de los lagos oligotróficos (Roldán y Ramírez 2008, p.245).

3.1.7. Capacidad de intercambio catiónico

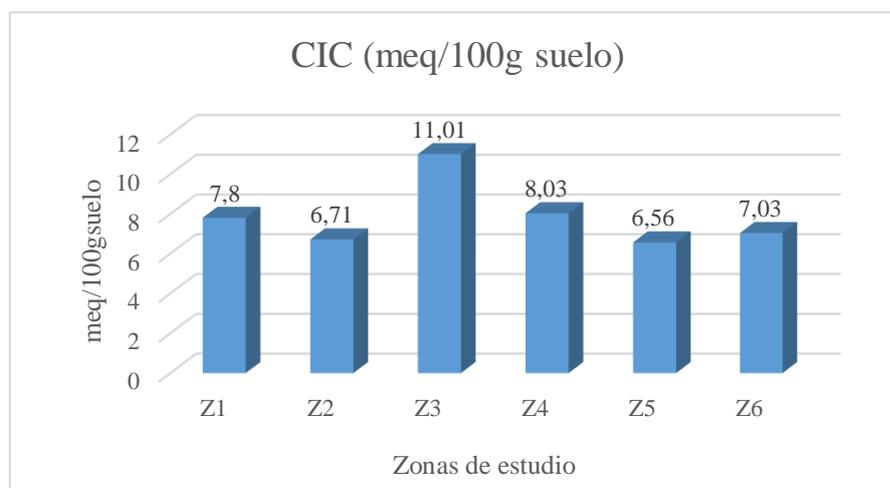


Gráfico 7-3. Capacidad de intercambio catiónico en sedimentos de la laguna Magdalena

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

En el gráfico 7-3, se observan los valores promedios por zona para la CIC en los sedimentos lacustres, la zona 3 presenta el valor más alto con un 11.01 meq/100 g, mientras que la zona 5 representa el valor más bajo con un 6.56 meq/100 g.

3.2. Determinación de Índices de geo-acumulación

Tabla 1-3: Índices de geo acumulación de metales

ÍNDICES DE GEO-ACUMULACIÓN								
ZONAS	Igeo (Cd)	Estado de contaminación	Igeo (Fe)	Estado de contaminación	Igeo (Mn)	Estado de contaminación	Igeo (Pb)	Estado de contaminación
Z1	-0,4	No contaminado	-4,7	No contaminado	-2,4	No contaminado	-2,2	No contaminado
Z2	-0,8	No contaminado	-5,4	No contaminado	-2,5	No contaminado	-4,4	No contaminado
Z3	0,6	No contaminado a moderadamente contaminado	-3,3	No contaminado	-1,9	No contaminado	-3,5	No contaminado
Z4	0,6	No contaminado a moderadamente contaminado	-3,0	No contaminado	-2,1	No contaminado	-4,8	No contaminado
Z5	-0,1	No contaminado	-4,8	No contaminado	-1,8	No contaminado	-5,0	No contaminado
Z6	-0,6	No contaminado	-5,4	No contaminado	-2,7	No contaminado	-5,1	No contaminado

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

3.2.1. Índice de geo acumulación para Cadmio

Los índices de geo-acumulación descritos en la tabla 1-3 para cadmio en el área de estudio no presentan homogeneidad debido a los resultados obtenidos. En las zonas (Z1, Z2, Z5 y Z6) el grado de contaminación está en un intervalo en el que se considera como no contaminado, mientras que en las zonas (Z3 y Z4) el criterio corresponde a no contaminado a modernamente contaminado.

3.2.2. Índice de geo acumulación para Plomo

Como consecuencia de la baja concentración de plomo detectada en las muestras analizadas, era de esperarse valores muy bajos en los índices de geo-acumulación, como se verifica en la tabla 1-3, de manera general el plomo no está presente en la laguna de estudio, o el método de detección del elemento es obsoleto para concentraciones muy bajas, no existe contaminación por plomo en la laguna Magdalena.

3.2.3. Índice de geo acumulación para Hierro

El hierro presente en la laguna magdalena es considerablemente alto en comparación a la

concentración de los otros elementos analizados; sin embargo, no representa contaminación, ya que no sobrepasa los valores necesarios para que el índice de geo-acumulación determine otro resultado descrito en la tabla 1-3.

3.2.4. Índice de geo acumulación para Manganeso

Los resultados obtenidos y descritos en la tabla 1-3 están basados en la concentración presente del metal y bajo la aplicación de la ecuación para los índices de geo acumulación indican que no existe contaminación por manganeso en la laguna Magdalena.

3.3. Variabilidad espacial de metales en la laguna Magdalena

3.3.1. Variabilidad espacial de Cadmio

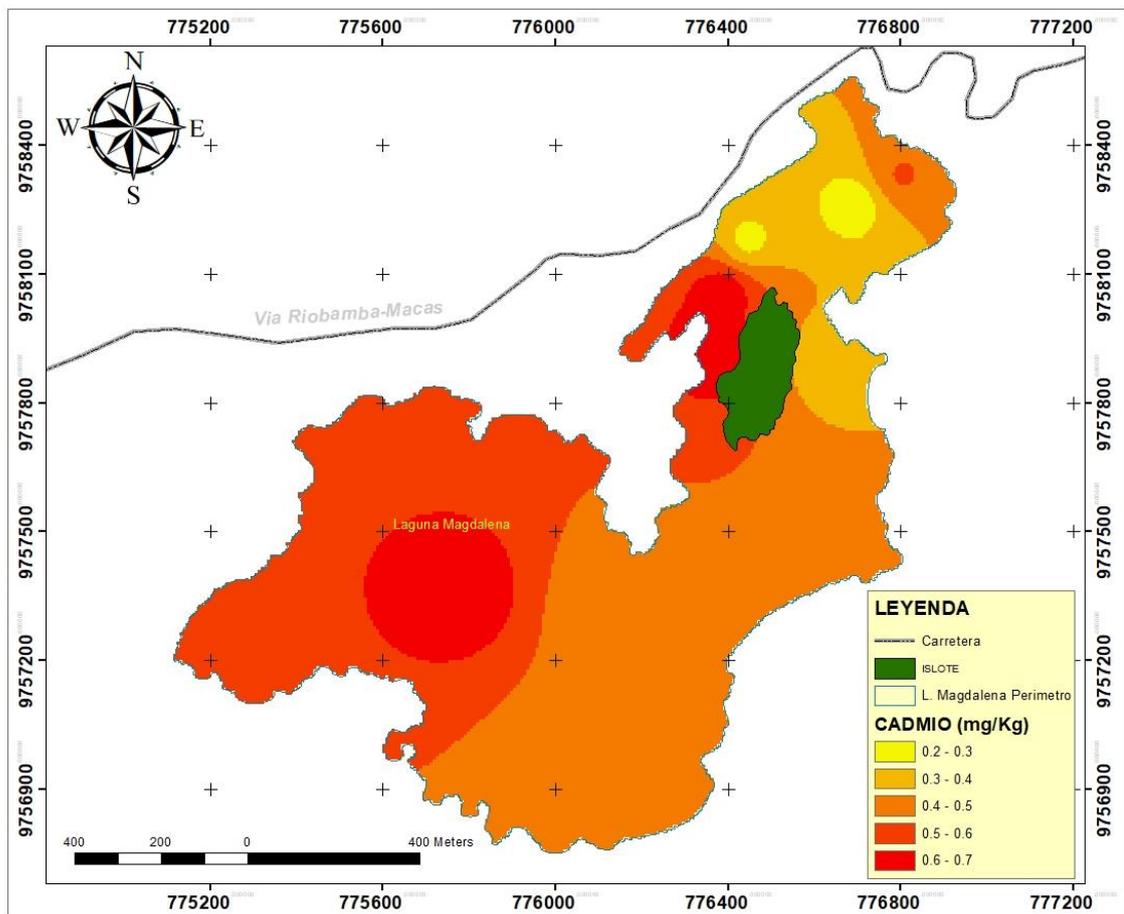


Gráfico 8-3. Variabilidad espacial de la concentración de cadmio

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

El gráfico 8-3 es el resultado de obtener la variabilidad espacial de la concentración de cadmio en mg/kg dentro del área de estudio se utilizó la herramienta de interpolación IDW del software ArcGis 10.3. Con el cual se obtuvo un mapa de distribución probable en 5 categorías, empezando por la más baja que registra un valor de 0.2 mg/ kg y el valor límite más alto que corresponde a 0.7 mg/kg. Las zonas 3 y 4 son las que presentan mayor concentración, lo que puede ser causado por procesos geológicos naturales como la pulverización del fondo rocoso de la laguna, cabe mencionar que no existe presencia de actividad antropogénica alrededor del área de estudio laguna Magdalena.

3.3.2. Variabilidad espacial de Plomo

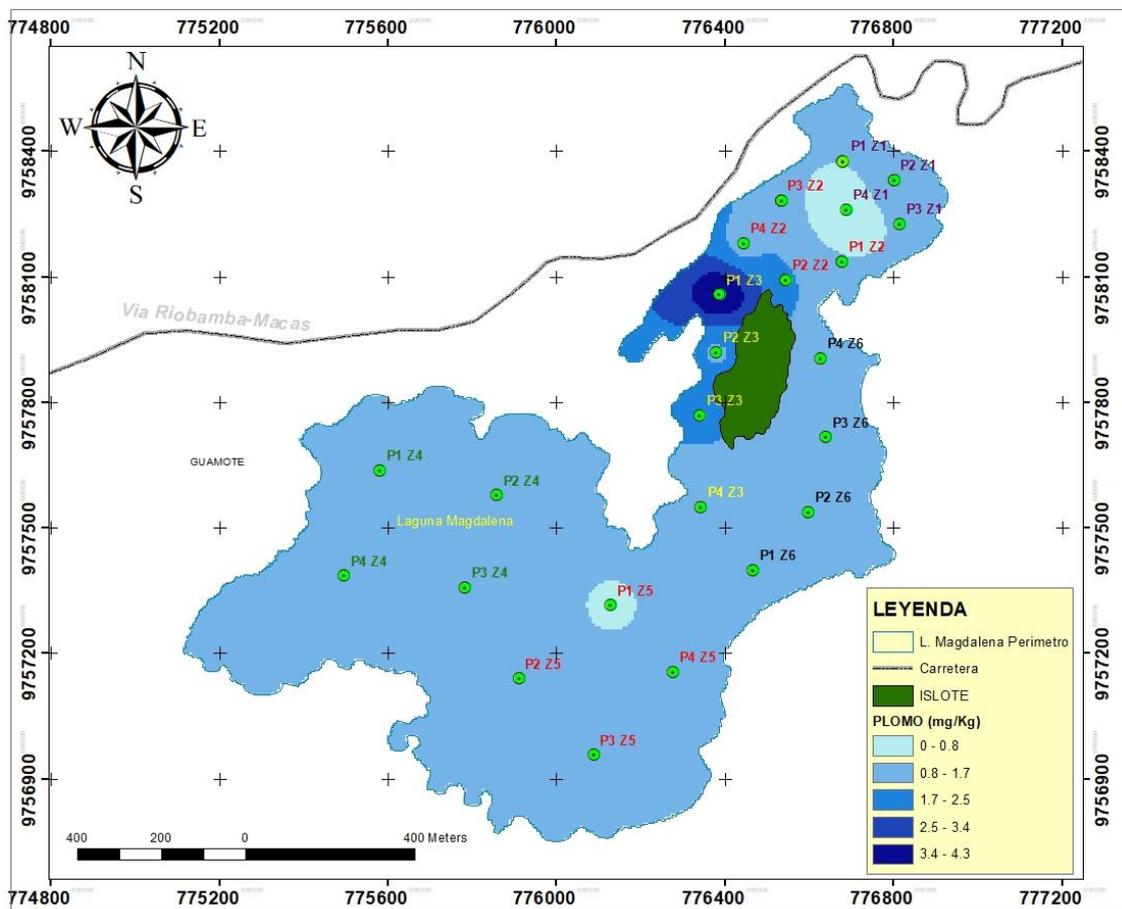


Gráfico 9-3. Variabilidad espacial de la concentración de plomo

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

Se utilizó la interpolación IDW para generar un mapa con ArcGis 10.3 de la variabilidad de distribución probable de las concentraciones de plomo dentro del área de estudio (gráfico 9-3). Se puede observar que existe poca variabilidad en la mayor parte de la laguna debido a la concentración constante de 0.8 mg/kg a 1.7 mg/kg de plomo, sin embargo, existe un foco de

concentración elevada en la zona 3 con valores comprendidos entre 3.4 mg/kg y 4.3 mg/kg de plomo. Las causas para explicar esta elevada concentración podría ser debido a procesos de bioacumulación existentes por la presencia de plantas acuáticas y sub acuáticas como totoras y algas, que por ciclos de absorción y retención de minerales puedan estar ocasionando dicha concentración en la zona 3, Existe la posibilidad que se deba a procesos de origen geológicos como pulverización de roca madre del fondo sedimentario de la laguna.

3.3.3. Variabilidad espacial de Hierro

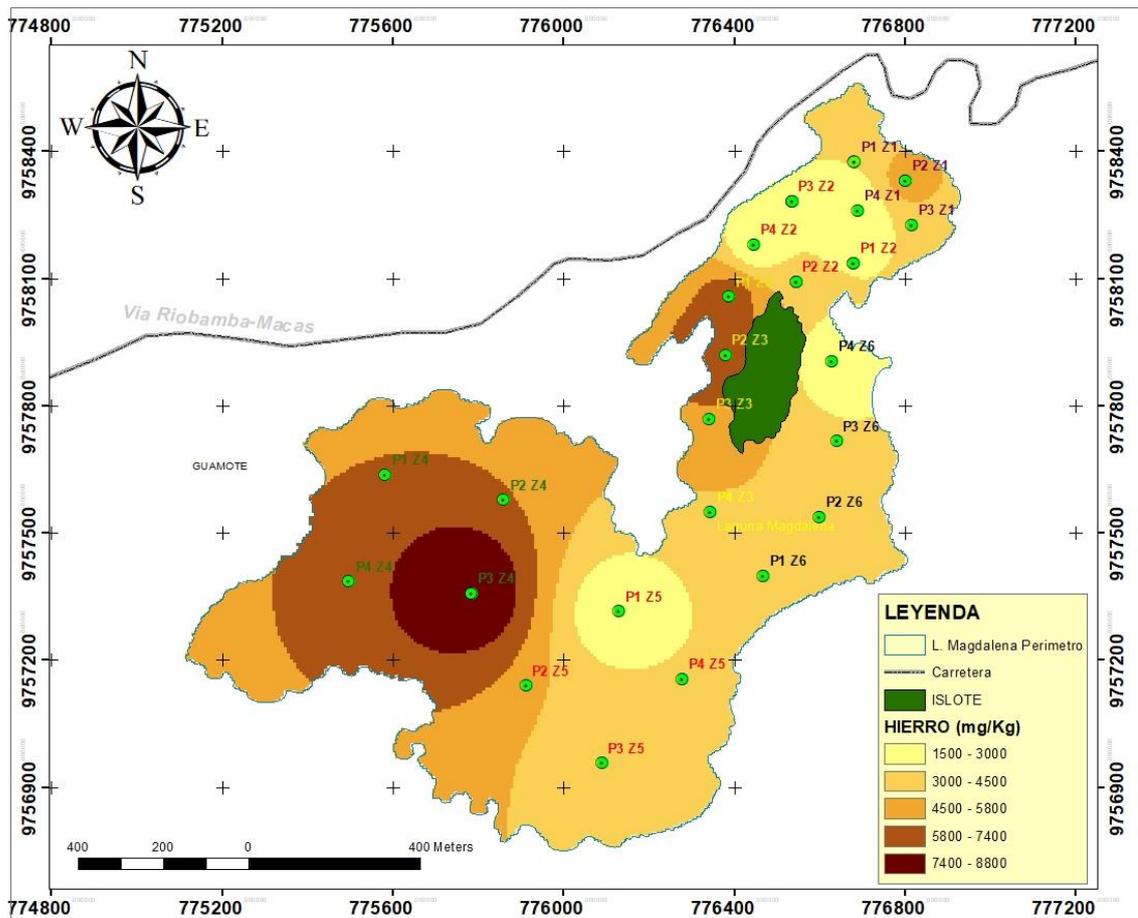


Gráfico 10-3. Variabilidad espacial de la concentración de hierro

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

En el gráfico 10-3 elaborado mediante ArcGis 10.3 con el método del inverso de la distancia ponderada (IDW), se puede observar la variabilidad en las concentraciones de hierro. El valor más bajo de 1500 mg/kg está presente en las zonas 2 y en una pequeña parte de la zona 5. El hierro al ser uno de elementos más abundantes en la corteza puede tener concentraciones altas siendo así para este estudio los 8800 mg/Kg el valor límite máximo obtenido. Las zonas 3 y 4 son las que mayor concentración presentan, la causa más probable para explicar la presencia de dichas

cantidades de hierro se debe principalmente a la pulverización de la roca madre del fondo sedimentario de la laguna. Otra causa para la cual se debería comprobar es la existencia de corrientes acuáticas establecidas por la dirección del viento así como también el nivel de fondo de la laguna que al ser más profundo funcionar como sumidero de materia arrastrada por la corriente.

3.3.4. Variabilidad espacial de Manganeso

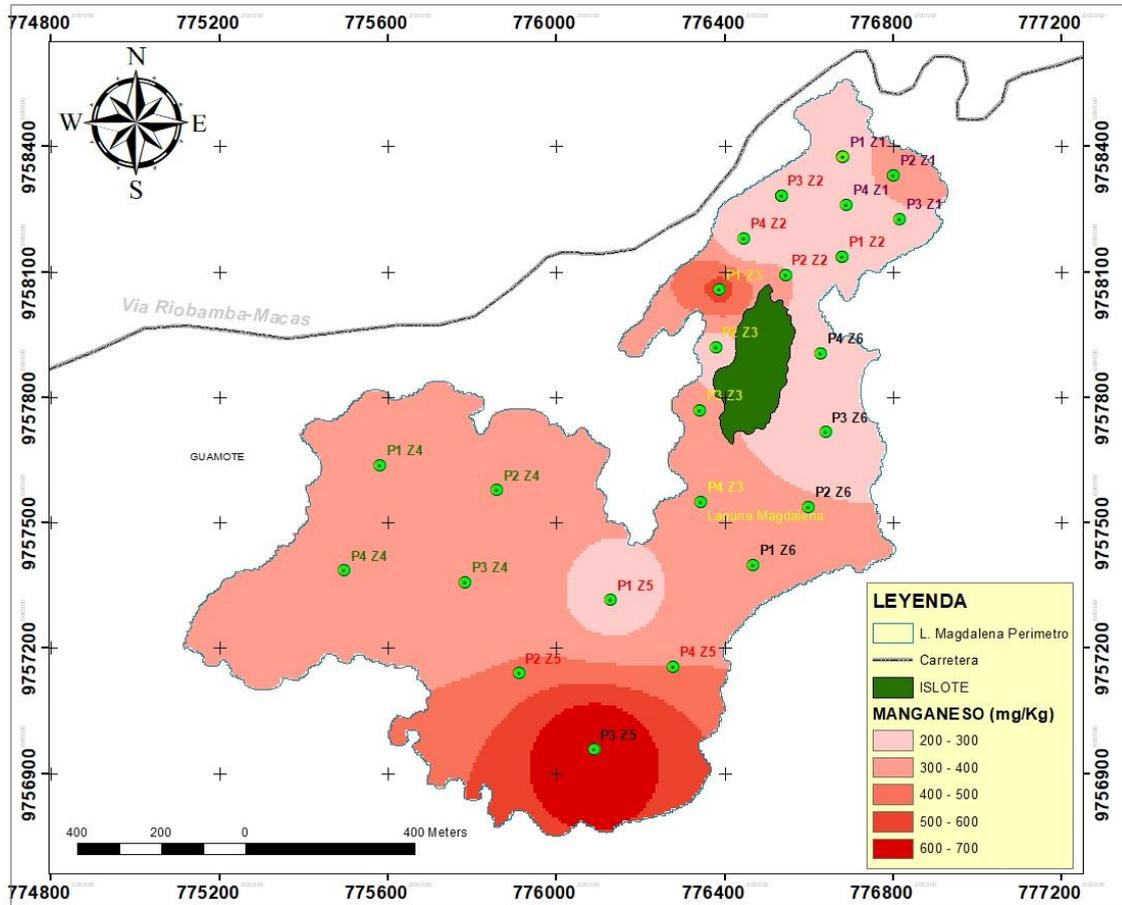


Gráfico 11-3. Variabilidad espacial de la concentración de manganeso

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

La variabilidad espacial es baja para la concentración de magnesio mediante el IDW como se muestra en el gráfico 11-3, ya que no refleja cambio o variaciones significativas en el área de estudio, sin embargo, existen focos de concentración los cuales pueden deberse al tipo de sustrato o fondo sedimentario existente. Los valores más bajos están presentes con un rango de entre los 200 mg/kg y 300 mg/kg de manganeso en las zonas 1, 2 y 6, mientras que para la zona 5 y 3 tenemos focos de concentraciones elevadas con valores comprendidos en el rango de 600 mg/kg a 700 mg/kg de manganeso. En la zona 3 al igual que pasa con la mayoría de elementos estudiados,

el origen de la concentración elevada puede deberse a la presencia de materia orgánica justificada con la existencia de gran cantidad de plantas.

3.4. Influencia de nutrientes en metales pesados

Tabla 2-3. Correlación entre concentración de nutrientes y concentración de metales.

	Conc. Corregida mg/kg Mn	Conc. Corregida mg/kg Fe	Conc. Corregida mg/kg Pb	Conc. Corregida mg/kg Cd
% MATERIA ORGÁNICA	-0,0266	-0,6538	-0,6916	-0,6489
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,9458	0,0561	0,039	0,0587
% CARBONO ORGÁNICO	-0,0265	-0,6539	-0,6914	-0,649
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,9461	0,0561	0,0391	0,0586
FÓSFORO	-0,2836	-0,4235	-0,5173	-0,4444
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,4596	0,256	0,1538	0,2308
NITRÓGENO	0,4977	0,5471	-0,3811	0,7568
<i>Tamaño de muestra</i>	(4)	(4)	(4)	(4)
<i>Nivel de significancia</i>	0,5023	0,4529	0,6189	0,2432
meq Ca/100g suelo	-0,4288	-0,3398	-0,4786	-0,4037
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,2495	0,371	0,1924	0,2813
meq Na/100g suelo	-0,7174	-0,3865	-0,4382	-0,2966
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,0296	0,3041	0,2381	0,4383
meq K/100g suelo	-0,8562	-0,4274	-0,4768	-0,4836
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,0032	0,2512	0,1944	0,1872
meq Mg/100g suelo	-0,439	-0,033	-0,3332	-0,219
<i>Tamaño de muestra</i>	(9)	(9)	(9)	(9)
<i>Nivel de significancia</i>	0,2372	0,9932	0,3809	0,5713

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

Los datos obtenidos en la tabla 2-3 representan el valor de correlación de Pearson obtenido al comparar las variables de nutrientes vs los metales, aquellos valores correspondientes a las casillas azules representan un nivel de significancia aceptable menor a 0.05 el cual indica una relación existente entre las variables, los valores por encima de 0.05 indican la no existencia de relación entre las variables. Existen cuatro correlaciones fuertes negativas entre las

concentraciones de (K y Mn), (Na y Mn), (carbono orgánico y Pb) y (MO y Pb). Una correlación negativa indica una relación inversamente proporcional entre las variables.

3.5. Determinación de factores de enriquecimiento

Tabla 3-3. Factores de enriquecimiento en sedimentos de la laguna Magdalena.

FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO								
ZONAS	FE (Cd)	Origen del elemento	FE (Fe)	Origen del elemento	FE (Mn)	Origen del elemento	FE (Pb)	Origen del elemento
Z1	20,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	1	De la roca madre	5,3	De la roca madre	0,1	De la roca madre
Z2	24,3	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	1	De la roca madre	7,1	De la roca madre	2,0	De la roca madre
Z3	15,4	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	1	De la roca madre	2,9	De la roca madre	1,0	De la roca madre
Z4	12,1	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	1	De la roca madre	1,9	De la roca madre	0,3	De la roca madre
Z5	27,1	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	1	De la roca madre	8,0	De la roca madre	0,9	De la roca madre
Z6	28,1	Moderadamente enriquecido, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	1	De la roca madre	6,7	De la roca madre	1,3	De la roca madre

Realizado por: Campusano Miranda, Alex, 2022. (GIDAC)

3.5.1. Factor de enriquecimiento para Cadmio

Los resultados obtenidos en la tabla 3-3 mediante la fórmula para el factor de enriquecimiento muestran que el origen según establece la clasificación para los valores encontrados es de tipo moderadamente enriquecido, además indica una fuente adicional a la roca madre, debido a que alrededor de la zona de estudio no existe presencia de actividad antropogénica considerable se descarta dicha posibilidad por lo que la presencia de cadmio podría estar asociada a procesos geológicos de pulverización de roca sedimentaria.

3.5.2. Factor de enriquecimiento para Plomo

Las concentraciones obtenidas para plomo en el espectrofotómetro son muy bajas, por lo que la incertidumbre es alta al referirnos de la presencia de plomo en la muestra. Sin embargo, fueron considerados para el cálculo del factor de enriquecimiento, los valores obtenidos descritos en la tabla 3-3, se encuentran por debajo del límite de clasificación establecido, mientras que otros están dentro del límite inferior. Como resultado general, en la laguna Magdalena la presencia del elemento no es homogénea, ya que en algunos puntos no existe concentración considerable, la presencia del elemento en los sedimentos es de origen de la roca madre.

3.5.3. Factor de enriquecimiento para Hierro

El hierro es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, por ende era de esperarse concentraciones elevadas en comparación a la de los otros elementos analizados en este estudio. El resultado obtenido muestra homogeneidad de la zona de estudio, ya que el factor de enriquecimiento es el mismo para todas las muestras, lo que se traduce a que el hierro presente es de origen de la roca madre, es decir, por procesos geofísicos naturales.

3.5.4. Factor de enriquecimiento para Manganeso

Este elemento es al igual que el hierro, es uno de considerable presencia por origen natural en la corteza terrestre, al obtener los factores de enriquecimiento reflejados en la tabla 3-3, para cada una de las muestras analizadas muestra homogeneidad en cuanto a la clasificación asignada, considerando así de forma general que la laguna Magdalena presenta manganeso en los sedimentos que son de origen de la roca madre y a su vez por procesos geológicos naturales.

CONCLUSIONES

- La variabilidad espacial de cada elemento depende de la distribución del nivel de concentración hallado en la zona de estudio, con base en esto y con ayuda de Arcgis 10.3 se determinó que para el elemento plomo existe variabilidad espacial baja, sin embargo, presenta un foco de concentración elevado dentro de la zona 3 de estudio que podría ser debido a procesos de bioacumulación por la presencia de plantas acuáticas y subacuáticas fijadoras del elemento. La variabilidad espacial para hierro es media, ya que existen focos de concentración elevada tanto en la zona 3 y 4, pero disminuye gradualmente al alejarnos dentro del área de análisis, para el elemento manganeso su variabilidad espacial es baja debido a que no existe diferencia significativa dentro de casi toda el área de estudio, sin embargo, presenta una zona de concentración elevada la cual podría deberse a procesos de erosión de la roca madre. Finalmente, la distribución casi homogénea de las concentraciones de cadmio a lo largo del área de la laguna sumada a dos zonas de alta concentración indica una variabilidad espacial media, dichos niveles hallados podrían deberse a procesos naturales, ya que no existen fuentes emisoras antropogénicas alrededor de la laguna.
- La influencia de los nutrientes sobre los metales se determinó a través de un análisis estadístico de correlación de Pearson, el cual determina que existen correlaciones significativas entre la concentración de nutrientes como el Mg y K frente a la concentración de Mn. Por lo tanto, los nutrientes mencionados presentes en los sedimentos de la laguna Magdalena del Sistema lacustre de Atillo influyen de forma inversamente proporcional a la presencia de manganeso
- El F.E. mostró un enriquecimiento moderado para el elemento Cd, además dicha concentración indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre; sin embargo, y en contraste mediante la aplicación del Igeo el elemento Cd no representa contaminación, la fuente de dicho elemento podría deberse a procesos geológicos como meteorización de la roca sedimentaria del fondo de la laguna. Para los demás elementos (Mn, Fe y Pb) el FE nos indica que sus orígenes son de la roca madre. La determinación de índices y factores de enriquecimiento nos permite obtener un conocimiento preliminar de estado de los sedimentos de la laguna Magdalena. La información alcanzada permitirá sentar bases comparativas para futuras investigaciones. Además de ser un aporte al conocimiento científico de la región, el cual puede ser tomado en consideración para establecer políticas o criterios de evaluación de la calidad de los sedimentos, los que estarán orientados a la conservación y cuidado de los ecosistemas lacustres del país.
- El estudio realizado determina que las concentraciones de los elementos analizados (Fe, Cd, Mn y Pb) en los sedimentos del área de estudio son bajas, lo que implica que los índices de geocumulación para cada metal recaen en la categoría de no contaminado,

evidenciándose que la laguna Magdalena del sistema lacustre de Atillo no está contaminada por los mencionados metales. Los valores de concentración hallados por el método de espectroscopia de absorción atómica junto con los índices desarrollados servirán como línea base para establecer criterios de calidad de sedimento para la gestión y cuidado los ecosistemas lacustres del país.

RECOMENDACIONES

- Es importante fomentar las investigaciones de este tipo porque se genera información científica que puede ser utilizada como base bibliográfica, para establecimiento de futuros límites permisibles nacionales para calidad de sedimentos en ecosistemas acuáticos endorreicos, hoy en día no existe en Ecuador tal normativa direccionada al control de las concentraciones de metales en los sedimentos, bajo estos argumentos se recomienda continuar con los estudios y análisis en las otras lagunas que componen al sistema lacustre de Atillo así como también diferentes sistemas acuáticos a lo largo del país.
- Se recomienda ampliar el análisis para otros elementos metálicos (Cu, Ni, Bi, Zn) que no se consideraron en este estudio con la finalidad de dar a conocer el estado actual de la laguna, tanto por su estado de contaminación y el origen de enriquecimiento de los mismos.
- Para garantizar que las concentraciones halladas de los metales en los sedimentos se mantengan sin aumento, se recomienda realizar un monitoreo de sedimentos al menos dos veces al año, de preferencia en época lluviosa y época seca, con la finalidad de verificar y conservar el sistema lacustre analizado.

BIBLIOGRAFÍA

AGQ, L. Toma de muestras de sedimentos PICH-303. Ecuador, 2019. pp. 4-6.

ANDRADES, M., MOLINER, A. & MASAGUER, A. “Prácticas de edafología : métodos didácticos para análisis de suelos”. *Universidad de la Rioja*, vol. 15, no. 7 (2015), p. 82.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DEL ALUMINIO. “Aluminio y Salud”. *European Aluminium Association* [En línea], 2008, (España) 51(8), pp. 1-2. [Consulta: 10 abril 2022]. Disponible en: <https://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/aluminio-medioambiente.pdf>

BADRI, M.A. & ASTON, S.R. “Observations on heavy metal geochemical associations in polluted and non-polluted estuarine sediments”. *Environmental Pollution. Series B, Chemical and Physical*, vol. 6, no. 3 (1983), pp. 181-193.

BASTIDAS, C. La comunidad de Atillo y la conservación de sus páramos. Quito-Ecuador: Abya-Yala, 2002. ISBN 9978222987, pp.9-35.

BELKIN, H.E. & SPARK, H.M. “Sparck, mercury, arsenic, antimony, and selenium contents of sediment from the Kuskokwim River, Bethel, Alaska, USA”. *Environmental Geology* [En línea], 1993, 22 (1), pp. 106–110, [Consulta: 10 abril 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00789322>

CEDEÑO, M. Evaluación del riesgo de contaminación por metales pesados en sedimentos de manglar en Ecuador [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales. Guayaquil – Ecuador. 2016. pp.1-5. [Consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/25242/1/Tesis Chame 6Rf.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/25242/1/Tesis%20Chame%206Rf.pdf)

CERVANTES, M. “Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México”. *Instituto Politécnico Nacional*, vol. 1, no.1 (2012), pp. 36-67.

CHILUIZA, B. Evaluación De Los Humedales Del Sistema Lacustre En La Laguna Magdalena-Atillo Del Parque Nacional Sangay Como Sumidero De Carbono [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias. Riobamba-Ecuador. 2020. pp. 24-31. [Consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13800/1/236T0477.PDF>

CISTERNAS, M.; et al. Sedimentos como indicadores de eventos erosivos en una pequeña cuenca lacustre de Chile central. 1997. p. 104.

CONDORI, K. Estimación del factor de enriquecimiento, índice de geo-acumulación y los riesgos ecológicos de elementos ecotóxicos en los sedimentos marinos del puerto de Matarani, 2019 [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Ingeniería de Procesos, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Arequipa-Perú. 2021. p.19. [Consulta: 3 marzo 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12174/IAcosuka.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

DE LA HOZ, C. & GOTILLA, C. “Modelo para la predicción de parámetros de calidad del agua del lago de Valencia utilizando imágenes de satélite”. *XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, (2009), pp. 113-116.

DELGADO YÁNEZ, M.S.; et al. “Valoración económica del servicio limnológico de la laguna Magdalena-Atillo, Riobamba-Ecuador”. *Enfoque UTE* [En línea], 2019, 10 (2), pp. 1-16. [Consulta: 18 marzo 2022]. ISSN 1390-9363. Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v10n2/1390-6542-enfoqueute-10-02-00001.pdf>

EKENGELE, L.N.; et al. “Accumulation of heavy metals in Surface sediments of Lere Lake, Chad”. *Geosciences Journal*, vol. 21, no. 2 (2017), pp. 305-315. ISSN 15987477.

EPA. “Método 7000B Espectrofotometría de absorción atómica de llama”. *Scielo* [En línea], 2007, 67(6), pp. 14-21. [Consulta: 18 marzo 2022]. ISSN 1413-8123. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-75772018000200067&lng=en&tlng=en&SID=5BQIj3a2MLaWUV4OizE

FRANKLIN, J.; et al. “Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones”. *AVFT Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* [En línea], 2018, pp. 587-59. [Consulta: 18 abril 2022]. Disponible en: <http://www.revistaavft.com/>

GALÁN HUERTOS, E. & ROMERO BAENA, A. “Contaminación de Suelos por Metales Pesados”. *Macla*, vol. 10, no. 1 (2008), pp. 48-60.

GARCÍA, C., MORENO, J., HERNÁNDEZ, M. & POLO, A. “Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo”. *Ciencia y medio ambiente- CCMA-CSIC* [En línea], 2002, pp. 125-138. [Consulta: 18 marzo 2022]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/111812>

GONÇALVES, F. “Controles limnológicos sobre a formação de rochas generadoras de petróleo lacustres: Aspectos Geológicos E Físico-Químicos Dos Lagos”. *UNESP*, vol. 20, nº1 (2001), pp. 5-23.

HERNÁNDEZ, M.T.; et al. “Fracciones biodisponibles de arsénico, plomo, cadmio y mercurio en sedimentos de corrientes superficiales seleccionadas”. *Rev. Hig Epidemiol*, vol. 37, no. 3 (1999), pp. 132-135.

HERNÁNDEZ-BARANDA, Y.; et al. “Toxicity of Cadmium in plants and strategies to reduce its effects. Case study: The tomato”. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas* [En línea], 2019, (Cuba) 40(3), p.2. [Consulta: 19 enero 2022]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/343571321>

HERRMANN, H. & BUCKSCH, H. *Ecolología*. 2014. ISBN 9788478290840, p. 515.

JIMÉNEZ MILLÁN, J. “La diversidad mineral de la Tierra es única en el Universo”. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 23, no. 3 (2015), pp. 343-343. ISSN 2385-3484.

JIMÉNEZ-MILLÁN, J.; et al. “Diagénesis salina de arcillas en niveles lacustres plio-pleistocenos ricos en materia orgánica de la Cuenca de Guadix-Baza (Cordillera Bética)”. *Macla: revista de la sociedad Española de mineralogía*, no. 1 (2017), p.1. ISSN 1885-7264.

JUÁREZ, P.; et al. “Determinación de factores de enriquecimiento y geo-acumulación”. *Ciencia ergo sum* [En línea], 2005, 12(2), pp. 154-161, [Consulta: 15 abril 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/104/10412207.pdf>

LIMO, U. Estudio sobre la presencia del plomo en el en el año 2003. Ubillus Limo, Julio. medio ambiente de Talara, 2003. p.9.

LÓPEZ MARTÍNEZ, M.L. & MADROÑERO PALACIOS, S.M. “Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: Caso Laguna de la Cocha”. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* [En línea], 2015, 25(2), p. 21, [Consulta: 10 abril 2022]. ISSN 0124-8170. Disponible en: <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>

MARQUEZ, A.; et al. “Concentraciones de nitrógeno y fósforo en sedimentos”. *Espacio y Desarrollo*, vol. 46, no. 2 (2007), pp. 137-145.

MÁRQUEZ, A.; et al. “Concentraciones de metales en sedimentos y tejidos musculares de algunos peces de la laguna de Castellero, Venezuela”. *Revista Científica, FCV-LUZ*, vol. 8, no.1 (2008), pp. 121-133.

MCFARLAND, M.L. & DOZIER, M.C. “Problemas del agua: El hierro y el manganeso”. *El Sistema Universitario Texas A&M*, n°3 (2017), p. 1.

MCKEAN, S. “Manual de análisis de suelos y tejido Vegetal”. *Early Science and Medicine*, n°1. (1993), pp. 15-25.

MESS, A. Calidad de agua en embalses. 2020. pp. 53-55.

MORENO, S. *La química de la vida*. 2016. [Consulta: 18 marzo 2022]. Disponible en: www.web.ecologia.unam

MÜLLER, G. “Schadstoffe in Sedimenten - Sedimente als Schadstoffe”. *Umsch Wissensch Techn*, vol. 79, no. 24 (1986), pp. 778-783.

MÜLLER, J. “¿Dumas o Kjeldahl para el análisis de referencia?”. *Analytics Beyond Measure, FOSS* [En línea], 2017, (España) 2(1), pp. 1-5. [Consulta: 19 marzo 2022] Disponible en: https://www.fossanalytics.com/-/media/files/documents/papers/laboratories-segment/the-dumas-method-for-nitrogenprotein-analysis_es.pdf

NORDIC COUNCIL OF MINISTERS. “Cadmium Review”. *Cowi*, no. 4 (2003), p. 26.

ORDOÑEZ, C. Caracterización geoquímica de sedimentos de la laguna Limoncocha [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Ambientales. Quito – Ecuador. 2013. p. 40. [Consulta: 19 enero 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/610/1/CARLOS%20GILBERTO%20ORDOÑEZ%20CAMPAIN.pdf>

ORDÓÑEZ, J. ¿Qué Es Cuenca Hidrológica? [En línea]. Lima-Perú: Sociedad Geográfica de Lima, 2011. [Consulta: 20 marzo 2022]. Disponible en:

https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp_sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf

ORDÓÑEZ-DELGADO, L. Caracterización biofísica de los sistemas lacustres del Parque Nacional Podocarpus y Parque Nacional Yacuri, Andes Tropicales del Sur del Ecuador [En línea]. Loja- Ecuador: Ministerio del Ambiente- Regional -7, 2011. [Consulta: 18 enero 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326978444_Caracterizacion_biofisica_de_los_sistemas_lacustres_del_Parque_Nacional_Podocarpus_y_Parque_Nacional_Yacuri_Andes_Tropicales_del_Sur_del_Ecuador

PABÓN, S., BENÍTEZ, R., SARRIA, R. & GALLO, J. “Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción”. *Entre Ciencia e Ingeniería* [En línea], 2020, 14(27), pp. 9-18. [Consulta: 25 marzo 2022]. ISSN 1909-8367. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=es

PALAU, A., ALONSO, M. & CORREGIDOR, D. “Análisis del ciclo de carbono en embalses y su posible efecto en el cambio climático Aplicación al embalse de Susqueda (río Ter, NE España)”. *Ingeniería del agua* [En línea], 2010, 17(3). p. 248 [Consulta: 25 marzo 2022]. ISSN 1134-2196. Disponible en: <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2978>

PARRA, O.; et al. “Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile Central”. *Limnetica* [En línea], 2003, (Chile) 22(1-2), pp. 51-83. [Consulta: 19 marzo 2022]. ISSN 02138409. Disponible en: <https://www.limnetica.com/documentos/limnetica/limnetica-22-1-p-51.pdf>

PEREZ MORA, W.H. “Evaluación del índice de geo-acumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá”. *Revista ION* [En línea], 2021, (Colombia) 34(1), pp. 37-45. [Consulta: 29 marzo 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3420/342068398005/>

PÉREZ NARANJO, C.G.; et al. “Determinación de elementos mayores en sedimentos provenientes de zonas afectadas por actividades petroleras en Ecuador”. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* [En línea], 2015, (Ecuador) 7(2), p. 4. [Consulta: 29 marzo 2022]. ISSN 1390-5384. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3420/342068398005/>

POLLARD, S.J.; et al. “Geoenviromental models of mineral deposits funamentals and applications”. *BMC Public Health* [En línea], 1992, 5(1), pp. 1-8. [Consulta: 22 marzo 2022]. ISSN 14712458. Disponible en: <https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298><http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf><http://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005><http://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58><http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>

PRAST, A.; et al. Ciclos biogeoquímicos y cambios globales. Cambio global: una mirada desde Iberoamérica. 2018. pp. 110-125.

QUEVEDO, José & MENESES, L. “Geoaccumulation Index and Enrichment Factor for Lead, Cadmium and Nickel in Agricultural Soils of San Alfonso Area in Machachi”. *ResearchGate*, no.1 (2016), p. 5.

RAMELLI, G.P.; et al. “Paroxysmal tonic upgaze of infancy: 5 additional cases”. *European Journal of Paediatric Neurology* [En línea], 2009, 13(6), p.10. [Consulta: 4 febrero 2022]. ISSN 10903798. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2012.04.004>

RAMIREZ ORTEGA, A. & SAN JOSÉ ARANGO, C. “El hierro en la naturaleza”. *Anales de la Real Academia de Doctores*, vol. 5 (2001), pp. 331-341.

RAMÍREZ, J.J. & NOREÑA, R.J. “Characterization of the sediment in a tropical shallow lake”. *Caldasia*, vol. 26, no. 1 (2004), pp. 173-184.

RIVERA, Y.; et al. “La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite”. *Palmas* [En línea], 2016, 37 (1), pp. 11-23. [Consulta: 12 marzo 2022]. Disponible en: <file:///C:/Users/Pracom/Downloads/11696-12949-1-SM.pdf>

RIZZO, A; et al. “Concentraciones de metales pesados en distintos compartimentos de lagos andinos de Patagonia Norte”. *Ecología Austral*, vol. 20, no. 2 (2010), pp. 155-171. ISSN 03275477.

RIZZOL, A. Dípteros quironómidos (Insecto)subfósiles y recientes en sedimentos lacustres andino-patagónicos: influencia de loa eventos paleoambientales naturales y artificiales, [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de la Plata, Facultad de

Ciencias Naturales y Museo. Argentina. 2007. pp. 7-18. [Consulta: 15 febrero 2022]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/4418>

ROLDÁN, G. & RAMÍREZ, J. Fundamentos de limnología neotropical. Medellín-Colombia: Universidad de Antioquia, 2008. ISBN 9789587141443, pp. 50-253.

RUBIO, B.; et al. “Distribución y enriquecimiento de metales pesados en sedimentos actuales de la parte interna de la Ría de Pontevedra”. *Thalassas* [En línea], 1995, 11(35), pp. 35-45. [Consulta: 15 marzo 2022]. Disponible en: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Distribuci?n+y+enriquecimie nto+de+metales+pesados+en+sedimentos+actuales+de+la+parte+interna+de+la+R?a+de+Ponte vedr#0>

SÁNCHEZ, B. Evaluación estadística y eutrófica de la calidad del agua de un embalse tropical. Instituto Politécnico Nacional, 2018. pp. 20-21.

SANCHEZ, G. “Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio”. *Facultad De Farmacia Universidad Complutense Trabajo* [En línea], 2016, 5(6), p. 23. Disponible en: http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA_SANCHEZ_BARRON.pdf

SERRA, A., CUADRADO, D. & BOTTÉ, S. “Índice de geo-acumulación (Igeo) y factor de enriquecimiento (FE) en sedimentos del estuario de Bahía Blanca”. *Universal Nacional del Sur* [En línea], 2014, 1(1), p. 2. [Consulta: 1 abril 2022]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4715.7364>

SW-846 TEST METHOD 3050B. *Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soilds.*

VASCONEZ, M.; et al. CUENCAS HIDROGRÁFICAS. Quito-Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2019. ISBN 9789978103807, p. 2.

VÁZQUEZ-CASTRO, G.; et al. “Mineralogía magnética como indicador de sequía en los sedimentos lacustres de los últimos ac. 2,600 años de Santa María del Oro, occidente de México”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 25, no. 1 (2008), pp. 21-38.

VENLASAGA, G. & FLORES, G. Influencia de la acidez del suelo en la capacidad de intercambio catiónico (bases+CIC) de la microcuenca del río Atillo y Ozogоче, del parque

Nacional Sangay [En línea]. (Trabajo de titulación) (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2021. p. 52. [Consulta: 4 marzo 2022]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15339/1/236T0572.pdf>

VIEIRA, R.; et al. “Análisis Sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima”. *Investigaciones Geográficas*, vol. 30, no.1 (2015), pp. 3-30.

VILLATORO, M., HENRÍQUEZ, C. & SANCHO, F. “Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo”. *Agronomía Costarricense*, vol. 32, no. 1 (2008), pp. 95-105.

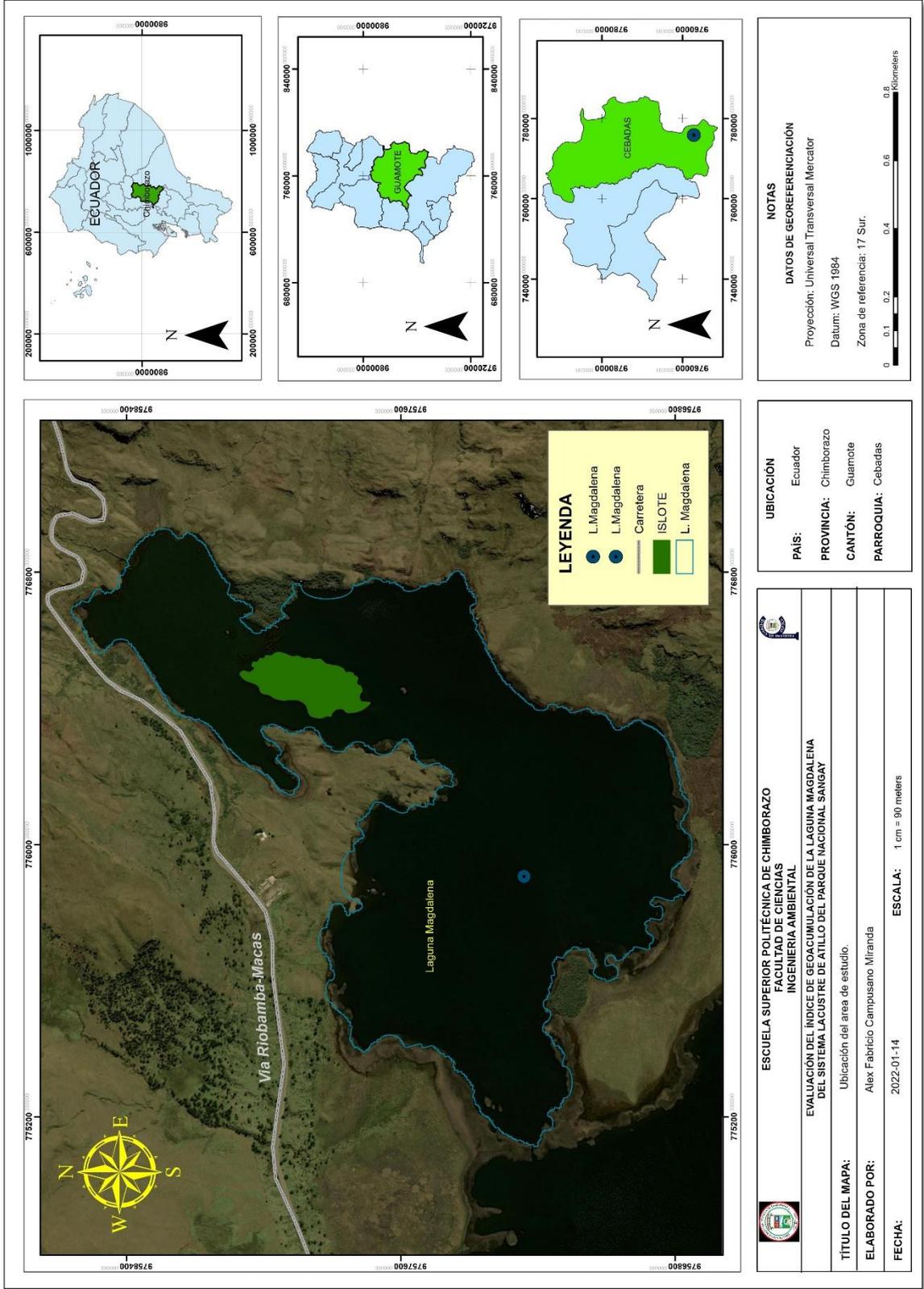
WETZEL, R.G. “Limnology: An Overview”. *Universidad de Alabama* [En línea], 1990, 24(1975), pp. 6-24. [Consulta: 12 marzo 2022]. Disponible en: <http://garfield.library.upenn.edu/classics1993/A1993LT56100001.pdf>

YANG, Z.; et al. “Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China”. *Journal of Hazardous Materials* [En línea], 2009, 166(2-3), pp. 1186-1194. [Consulta: 12 marzo 2022]. ISSN 03043894. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.034>

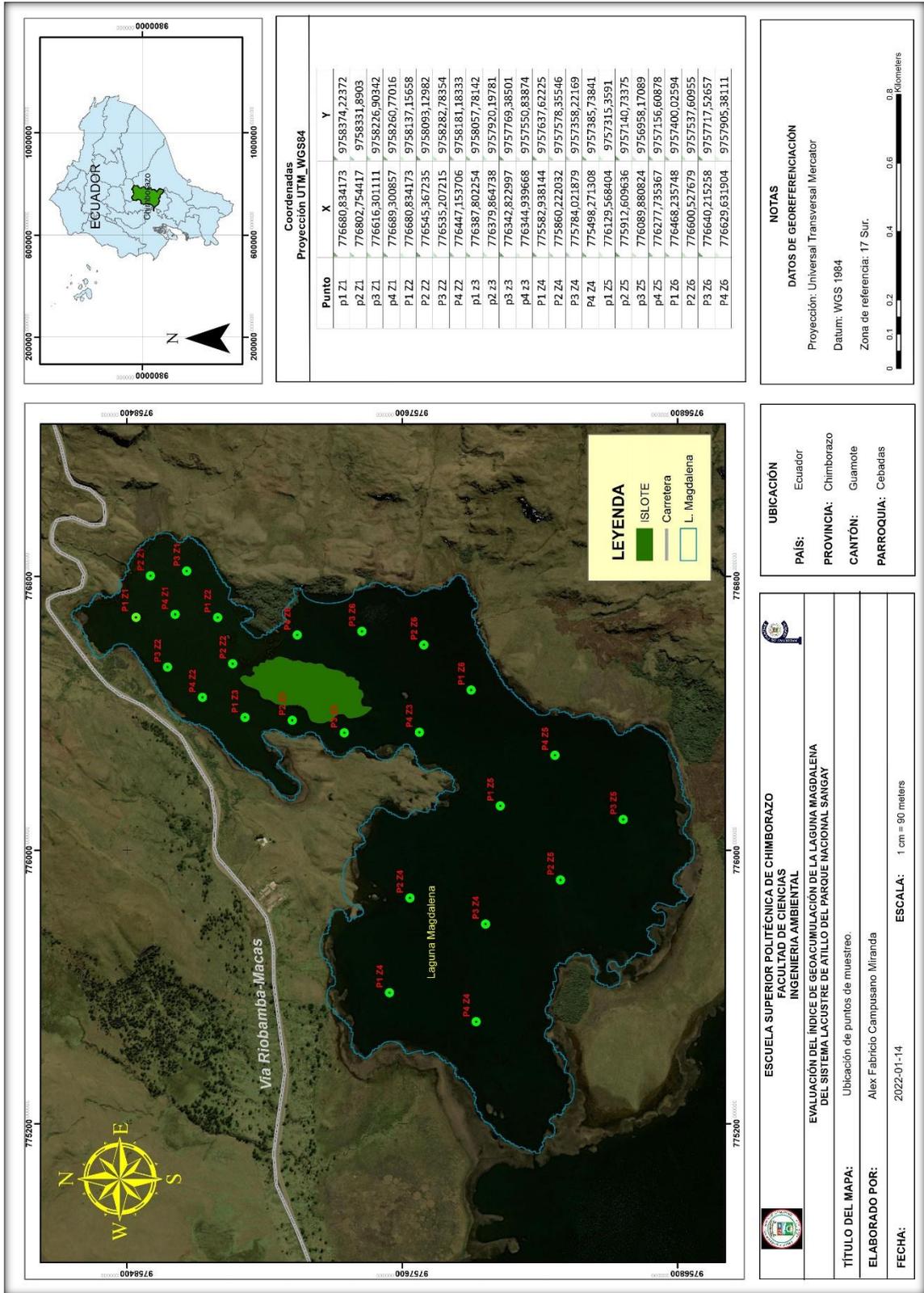
ZAFRA, C.; et al. “Contaminación por metales pesados en los sedimentos acumulados sobre el corredor vial Bogotá – Soacha”. *Revista Tecnura* [En línea], 2013, 17(37), p. 99. ISSN 2248-7638. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.3.a09>

ANEXOS

ANEXO A. MAPA DE UBICACIÓN ÁREA DE ESTUDIO



ANEXO B: MAPA DE UBICACIÓN PUNTOS DE MUESTREO



ANEXO C. PREPARACIÓN DEL BOTE



ANEXO D. COLECTA DE MUESTRA DE SEDIMENTO



ANEXO E. SECADO DE LAS MUESTRAS



ANEXO F. DETERMINACION pH Y CONDUCTIVIDAD



ANEXO G. DETERMINACIÓN DE COLOR (MUNSELL)



ANEXO H. DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA



ANEXO I. DETERMINACIÓN DE FÓSFORO POR OLSEN



ANEXO J. DETERMINACIÓN DE CATIONES INTERCAMBIABLES



ANEXO K. DIGESTIÓN ÁCIDA DE SEDIMENTO



ANEXO L. ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (METALES)





CERTIFICADO

A QUIEN INTERESE:

CERTIFICO QUE: Alex Fabricio Campusano Miranda, con cédula de identidad 092356978-4, estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, desarrollará el proyecto de titulación "Evaluación del índice de geoacumulación de metales en los sedimentos del sistema lacustre de Atillo del parque nacional Sangay", mismo que forma parte del Proyecto de Investigación IDIPI-234 "Los sistemas lacustres del centro del Ecuador como fuente o sumideros de dióxido de carbono como determinante para su conservación" del Instituto de Investigaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, dirigido por mi persona,

Este proyecto de titulación contribuirá a la consecución de los objetivos propuestos en el mencionado proyecto de investigación, razón por la cual se otorga el **AVAL** para la realización de las diferentes actividades y el apoyo técnico que así lo requiera el estudiante.

Cabe mencionar que el patrimonio intelectual de los resultados que se obtengan del proyecto de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 11 de noviembre de 2021

Atentamente,

NORMA SOLEDAD ERAZO SANDOVAL
Firmado digitalmente por
NORMA SOLEDAD ERAZO
SANDOVAL
Fecha: 2021.11.12
19:06:58 -0500

Dra. Norma Erazo Sandoval

DIRECTORA SUBROGANTE

PROYECTO IDIPI-234



esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

*UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 20 / 06 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Alex Fabricio Campusano Miranda
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Ambiental
Título a optar: Ingeniero Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.



1167-DBRA-UTP-2022



Firmado electrónicamente por:
LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE