



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ALUMINIO EN
SUELOS DE SISTEMAS LACUSTRES Y VALLES
PERIGLACIARES DE LAS MICROCUENCAS DE ATILLO Y
OZOGOCHÉ**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Propuesta de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES: GUZÑAY CAIZAGUANO JHON FERNANDO

ORTEGA SALINAS HERMANT EMANUEL

DIRECTOR: Ing. ANDRÉS AGUSTÍN BELTRÁN DÁVALOS MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Hermant Emanuel Ortega Salinas & Jhon Fernando Guzñay Caizaguano

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

Nosotros, HERMANT EMANUEL ORTEGA SALINAS y JHON FERNADO GUZÑAY CAIZAGUANO, declaramos que el presente trabajo de integración curricular es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos 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, 02 de febrero de 2022



.....
Hermant Emanuel Ortega Salinas
C.I.: 190051469-4



.....
Jhon Fernando Guzñay Caizaguano
C.I.: 172682008-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, “**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ALUMINIO EN SUELOS DE SISTEMAS LACUSTRES Y VALLES PERIGLACIARES DE LAS MICROCUENCAS DE ATILLO Y OZOGOCHE**”, realizado por los señores: **HERMANT EMANUEL ORTEGA SALINAS** y **JHON FERNANDO GUZÑAY CAIZAGUANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal 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
Dr. Edgar Iván Ramos Sevilla PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-02-02
Ing. Andrés Agustín Beltrán Dávalos MSc. DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-02-02
Dra. Magdy Mileni Echeverría Guadalupe PhD. MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-02-02

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico principalmente a Dios, ya que gracias a su bendición y misericordia he sido capaz de salir adelante ante todos los retos y obstáculos que se han presentado durante toda mi carrera universitaria. A mis padres Pascual Guzñay Quishpe y María Juana Caizaguano Chafla, quienes me apoyaron incondicionalmente en todo momento brindándome su amor, confianza y sacrificio, lo que me permitió superarme cada día hasta llegar a ser un gran profesional. A mis hermanos José Luis Guzñay, María Guzñay, Juana Guzñay y Rosa Guzñay, y a mi sobrina Mery Pérez; quienes siempre estuvieron conmigo en los momentos más difíciles para aconsejarme, apoyarme y motivarme a culminar mis estudios de pregrado. A mi amigo y compañero de tesis Hermant Ortega, quien ha sido un pilar fundamental para cumplir esta meta, ya que siempre me ha brindado su apoyo durante este arduo camino. Por todos ustedes se ha hecho posible este trabajo de integración curricular, son lo mejor que tengo en mi vida. Y finalmente a todas las personas tanto familiares, como amigos y docentes quienes han contribuido con su ayuda para lograr este gran objetivo.

Jhon

El presente trabajo de investigación se lo dedico primordialmente a Dios, por regalarme vida, salud y sabiduría. A mis padres Martha Rocío Salinas Gómez y Manuel de Jesús Ortega Ramón por su amor, paciencia, trabajo, preocupación y sacrificio diario, son dignos merecedores de todos mis logros. A mi hermana Yoselin Saraí Ortega Salinas ya que ha sido un apoyo moral a lo largo de mi vida y por sobre todo por apoyarme en los buenos y malos momentos. A Fabian Arrobo y Neus Arrobo que me han ayudado en la medida de lo posible. A mis tíos Mariza Salinas, Georgina Ortega, Carmen Ortega, Bidolino Troya, Nancy Ortega, Rosa Ortega y Germán Ortega que a pesar de la distancia han sido un apoyo incondicional a lo largo de mi vida. A mis primos Darwin Ortega, Rubí Ortega, Maritza Ortega, David Ortega y demás familia. A mi compañero de tesis, Jhon Fernando Guzñay Caizaguano, ya que a lo largo de los años se volvió un amigo incondicional, el cual me ha apoyado tanto en el ámbito estudiantil como en lo personal innumerables veces. Y finalmente, a cada una de las personas que me han apoyado a lo largo de mi vida.

Hermant

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios, por ser el motor de nuestras vidas. A nuestros padres ya que sin su apoyo y colaboración no seríamos los profesionales que hoy en día somos. A nuestra familia. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarnos la oportunidad de ser parte de tan prestigiosa universidad y de poder adquirir los conocimientos necesarios para poder obtener una profesión. A nuestro director de trabajo del trabajo de integración curricular Ing. Andrés Agustín Beltrán Dávalos, a nuestra miembro de tribunal Dra. Magdy Milleni Echeverría Guadalupe, a los técnicos de laboratorio Ing. Freddy Armijos Arcos e Ing. Natali Figueroa, por impartirnos los conocimientos necesarios para llevar a cabo nuestro proyecto de Trabajo de Integración Curricular y además por habernos brindado la oportunidad de formar parte de un prestigioso grupo de investigación como lo es el GIDAC. Además, un profundo agradecimiento a nuestros maestros durante todos nuestros años de estudio ya que sin los conocimientos que nos brindaron no hubiésemos podido llegar a cumplir nuestra meta, en especial al Ing. Paúl Palmay, Bqf. Benjamín Román, Ing. Cristina Ramos, Ing. Víctor Valverde, Dra. Silvia Haro, Ing. Carla Haro. Para finalizar a todos nuestros amigos en especial a: Katty Duchicela, Ivonne Rivera, Lesly Pilataxi, Katty Yáñez, Daniel Espín, Carlos Montaña, Amy Zambrano, Pablo Aldaz, Melvin Gualli, Hartman Tituana, Andrés Flores, Byron Flores, Marcelo Savedra, Alan Padilla, Edgar Amaguaña y Andrés Masapanta.

Hermant & Jhon

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Bases teóricas.....	5
1.2.1. Incidencia de las propiedades físicas y químicas del suelo	5
1.2.1.1. Indicadores físicos y químicos del suelo	5
1.2.1.2. Suelos ácidos.....	13
1.2.2. Enriquecimiento de metales pesados	16
1.2.2.1. Factor de enriquecimiento	16
1.2.2.2. Índices de geo-acumulación.....	17
1.2.3. Comportamiento del aluminio en el suelo.....	18
1.2.3.1. Aluminio intercambiable	18
1.2.4. La estadística como objeto de estudio de la pedometría.....	19
1.2.4.1. Funciones de Edafotransferencia	19
1.2.5. La toxicidad del aluminio en el suelo	20
1.2.5.1. Fuentes naturales y antrópicas del aluminio	20
1.2.5.2. El aluminio como toxicante en el agua	21
1.2.5.3. El aluminio como toxicante en el suelo.....	22
1.2.5.4. Efectos del aluminio en las plantas.....	22
1.2.6. Biomarcadores como herramienta de toxicidad de elementos químicos.....	23
1.2.6.1. Plantas como bioindicadores	24
1.2.6.2. Criterios de selección de biomarcadores vegetales	24
1.2.6.3. Principales biomarcadores vegetales	25
1.2.6.4. Uso de <i>Lactuca sativa</i> L. como biomarcador	25

1.2.7.	<i>Espectrofotometría de absorción atómica</i>	26
1.2.7.1.	<i>Principio</i>	26
1.2.7.2.	<i>Fundamento</i>	26
1.2.7.3.	<i>Ecuación de Lambert-Beer</i>	28
1.2.7.4.	<i>Instrumentación</i>	28
1.3.	Bases conceptuales	31
1.3.1.	<i>Sistemas Lacustres</i>	31
1.3.2.	<i>Sistemas Fluviales</i>	31
1.3.3.	<i>Páramo</i>	31
1.3.4.	<i>La infiltración</i>	31
1.3.5.	<i>Humedales</i>	32
1.3.6.	<i>Eutrofización</i>	32
1.3.7.	<i>Microcuenca</i>	32
1.3.8.	<i>Hidrólisis</i>	32
1.3.9.	<i>Pedometría</i>	32
1.3.10.	<i>Funciones de edafotransferencia</i>	32
1.3.11.	<i>Aluminio Intercambiable</i>	33
1.3.12.	<i>Índice de Geo-acumulación</i>	33
1.3.13.	<i>Biomarcador</i>	33
1.3.14.	<i>Lechuga (Lactuca sativa L.)</i>	33
1.3.15.	<i>Índice de Germinación</i>	33
1.3.16.	<i>Dosis letal media (DL50)</i>	34

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	35
2.1.	Tipo de Investigación	35
2.2.	Identificación de variables e hipótesis	35
2.3.	Ubicación del área de estudio	36
2.3.1.	<i>Ubicación Geográfica</i>	37
2.3.2.	<i>Preparación y sistematización de las muestras en el laboratorio</i>	38
2.4.	Etapas de la investigación	38
2.4.1.	<i>Determinación de la concentración de aluminio</i>	38
2.4.1.1.	<i>Obtención del extracto de suelo</i>	38
2.4.1.2.	<i>Determinación</i>	39
2.4.1.3.	<i>Evaluación del comportamiento del aluminio</i>	40

2.4.2.	<i>Ensayo toxicológico del Aluminio en el biomarcador Lactuca sativa L.....</i>	40
2.4.2.1.	<i>Materiales, equipos y organismos de prueba.</i>	40
2.4.2.2.	<i>Preparación de las concentraciones de aluminio</i>	41
2.4.2.3.	<i>Esquema del bioensayo</i>	42
2.4.2.4.	<i>Procedimiento de la prueba toxicológica</i>	42
2.4.2.5.	<i>Índice de germinación.....</i>	42
2.4.2.6.	<i>Dosis letal media DL₅₀.....</i>	43
2.4.2.7.	<i>Curva Probit</i>	43
2.4.3.	<i>Incidencia de variables fisicoquímicos y químicos en la concentración de Al³⁺ ...</i>	44
2.4.4.	<i>Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento</i>	44
2.4.4.1.	<i>Índice de geo-acumulación</i>	44
2.4.4.2.	<i>Factor de enriquecimiento</i>	44
2.5.	Selección de Test estadísticos	45

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	47
3.1.	Análisis intercuartiles del comportamiento del aluminio.....	47
3.1.1.	<i>Atillo</i>	51
3.1.2.	<i>Ozogoche</i>	51
3.1.3.	<i>Diagrama de cajas</i>	52
3.2.	Bioensayo toxicológico	53
3.2.1.	<i>Preparación de las concentraciones</i>	53
3.2.2.	<i>Porcentaje de germinación relativa de semillas (GRS)</i>	54
3.2.3.	<i>Crecimiento relativo de la radícula (CRR).....</i>	55
3.2.4.	<i>Índice de germinación (IG)</i>	55
3.2.5.	<i>Porcentaje de mortalidad</i>	55
3.2.6.	<i>DL₅₀</i>	56
3.3.	Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento	57
3.4.	Análisis de correlación entre las variables fisicoquímicas y la concentración de Al.....	58
3.4.1.	<i>Coefficiente de correlación entre el pH y la concentración de Al³⁺</i>	59

CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Clasificación del diámetro de partículas.....	6
Tabla 2-1:	Clasificación específica del diámetro de partículas.....	6
Tabla 3-1:	Rangos del pH en los Suelos	8
Tabla 4-1:	Caracterización del grado de enriquecimiento	17
Tabla 5-1:	Clases y Valores de los Índices de Geocumulación.	18
Tabla 6-1:	Tipos de llamas.....	29
Tabla 1-2:	Descripción e identificación de las variables de estudio	35
Tabla 2-2:	Ubicación Geográfica y elevación de Atillo.....	38
Tabla 3-2:	Ubicación Geográfica y elevación de Ozogоче.....	38
Tabla 4-2:	Análisis estadísticos aplicados en función de las variables e hipótesis	45
Tabla 1-3:	Valores mínimos y máximos de la concentración de Al^{3+}	47
Tabla 2-3:	Cuartiles y rangos de la concentración de Al^{3+} en la zona de estudio	48
Tabla 3-3:	Valores anómalos en el comportamiento de la concentración de Al^{3+}	48
Tabla 4-3:	Clasificación de las concentraciones de Al^{3+} en función de la litología	51
Tabla 5-3:	Volumen de agua y estándar de aluminio utilizados para la preparación de las diferentes concentraciones.....	53
Tabla 6-3:	GRS, CRR e IG obtenidos a partir del bioensayo	54
Tabla 7-3:	Descripción del porcentaje de mortalidad de las semillas de Lactuca Sativa L	56
Tabla 8-3:	Índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento	58
Tabla 9-3:	Análisis de correlación de la humedad, MO, CO, CE y CIC	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Distribución de los nutrientes en función al pH del suelo	9
Figura 2-1: Comportamiento de la CIC en distintas texturas de suelo	10
Figura 3-1: Ciclo del carbono orgánico en el suelo	11
Figura 4-1: Conductividad eléctrica en el suelo	12
Figura 5-1: Deformación de las raíces causada por Al^{+3}	22
Figura 6-1: Morfología de la plántula y la semilla de lechuga <i>Lactuca sativa</i> L	25
Figura 7-1: Diagrama de un equipo de absorción atómica	28
Figura 8-1: Lámpara de cátodo hueco	29
Figura 9-1: Componentes de un atomizador de llama	30
Figura 1-2: Bioensayo de la toxicidad de la concentración de aluminio	42

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1-2:	Mapa temático del área de estudio	36
Gráfico 1-3:	Análisis intercuartiles del comportamiento del aluminio intercambiable	47
Gráfico 2-3:	Distribución del comportamiento del aluminio intercambiable en la microcuenca de Atillo.....	49
Gráfico 3-3:	Distribución del comportamiento del aluminio intercambiable en la microcuenca de Ozogoche.....	50
Gráfico 4-3:	Diagrama de cajas de la concentración de Al^{3+} en función de la litología o uso de suelo	52
Gráfico 5-3:	Comparación del GRS, CRR e IG con cada una de las concentraciones empleadas.....	54
Gráfico 6-3:	Grafica Mortalidad (%) vs Concentración de aluminio (ppm).....	56
Gráfico 7-3:	Curva probit del biomarcador Lactuca Sativa L.....	57
Gráfico 8-3:	Distribución de la concentración de Al^{3+} y su correlación con el pH de Atillo y Ozogoche.....	59

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** VISITAS A LAS ZONAS DE ESTUDIO
- ANEXO B:** TRITURACIÓN Y SECADO DE LAS MUESTRAS
- ANEXO C:** TAMIZADO DE LAS MUESTRAS SECAS
- ANEXO D:** ETIQUETADO Y ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS
- ANEXO E:** ANÁLISIS DE LOS EXTRACTOS DE SUELO EN EL
ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN
- ANEXO F:** DETERMINACIÓN DE LA DL50

RESUMEN

El presente estudio avalado por el GIDAC, evalúa el comportamiento del aluminio intercambiable (Al^{+3}) en los suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoché (Chimborazo); se analizaron 100 muestras de suelo por Espectroscopia de Absorción Atómica (E. A. A.), empleando el equipo Thermo Fisher Scientific con lámpara de cátodo hueco de aluminio (Al) y con llama de óxido nitroso-acetileno. Se desarrolla el bioensayo toxicológico (por triplicado) utilizando el biomarcador *Lactuca sativa* L., donde se evalúa su comportamiento bajo diferentes concentraciones de aluminio. Además, se realiza un análisis del coeficiente de correlación entre la concentración de Al^{+3} y los factores: humedad, pH, materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Finalmente se aplica y se valora la fórmula del índice de geo-acumulación y el factor de enriquecimiento, para conocer el valor y la fuente de contaminación por Al^{+3} en estos suelos. La concentración promedio de Al^{+3} es de 1.74 ppm; donde se reconocieron tres cuartiles: $Q1=0.39$, $Q2=1$ y $Q3=1.84$, los cuales permitieron identificar la distribución de este elemento en la zona de estudio. El bioensayo toxicológico determina el IG mínimo y máximo del biomarcador *Lactuca sativa* L., en 0.33 y 88.54 %, respectivamente; y la dosis letal media (DL50) en 20,42 ppm. De manera general la concentración de Al^{+3} en esta zona es baja con respecto a otros suelos de similares características, con un grado de variabilidad elevado, debido a las características propias del sector. Sin embargo, se encontraron zonas que presentan elevadas concentraciones con respecto al comportamiento general del Al^{+3} en estas microcuencas; por lo que se recomienda realizar estudios para identificar los factores que ocasionan este comportamiento.

Palabras clave: <ALUMINIO INTERCAMBIABLE>, <GEOACUMULACIÓN>, <LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)>, <ÍNDICE DE GERMINACIÓN (IG)>, <DOSIS LETAL MEDIA (DL50)>, <ATILLO Y OZOGOCHÉ (MICROCUENCAS)>.

LEONARDO
FABIO
MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente
por LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE
Fecha: 2022.02.04
10:05:33 -05'00'



0204-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

The current research, authorized by the GIDAC, evaluates the behavior of interchangeable aluminum (Al^{+3}) in the soils of lake systems as well as periglacial valleys of Atillo and Ozogоче micro-basins located in Chimborazo. One hundred soil samples were analyzed through Atomic Absorption Spectroscopy (A.A.S.), using the aluminum (Al) hollow-cathode lamp - Thermo Fisher Scientific equipment with a nitrous oxide-acetylene flame. The toxicological bioassay is carried out in triplicate using the *Lactuca sativa* L. biomarker, which evaluates its behavior at different aluminum concentrations. In addition, an analysis on the coefficient correlation between the concentration of Al^{+3} and the humidity, pH, organic matter (OM), organic carbon (CO), electrical conductivity (EC) and cation exchange capacity (CEC) factors is carried out. Finally, the geo-accumulation index formula and the enrichment factor are applied and assessed to know the value and contamination source of Al^{+3} in these soils. The Al^{+3} average concentration is 1.74 ppm; where three quartiles were identified: $Q1=0.39$, $Q2=1$ and $Q3=1.84$, these allowed to identify the distribution of this element in the study area. The toxicological bioassay determines the minimum and maximum GI of *Lactuca sativa* L. biomarker (0.33 and 88.54%, respectively); and the median lethal dose (LD50) at 20.42 ppm. The concentration of Al^{+3} in this area is generally low compared to other soils with similar characteristics and with a high degree of variability due to the characteristics of the area. However, some areas with high concentrations regarding the general behavior of Al^{+3} were found in these micro-basins; so, it is recommended to carry out studies in the areas where these anomalous values were found in order to identify the factors that cause this behavior.

Keywords: <EXCHANGEABLE ALUMINUM>, <GEOACCUMULATION>, <LETTUCE (*Lactuca sativa* L.)>, <GERMINATION INDEX (GI)>, <MEDIAN LETHAL DOSE (LD50)>, <ATILLO AND OZOGOCHE (MICRO BASINS)>.



Firmado electrónicamente por:
**PAUL ROLANDO
ARMAS PESANTEZ**

INTRODUCCIÓN

❖ Enunciado del problema

La Provincia de Chimborazo cuenta con aproximadamente 6.490 km² de páramos (649.000 ha), ubicados principalmente alrededor y dentro de dos áreas protegidas: Parque Nacional Sangay y la Reserva Nacional de Fauna Chimborazo (Bustamante, 2011, p.32). Estos páramos de Chimborazo son los de mayor extensión y mejor conservados en el país, representan aproximadamente el 30% de los páramos existentes a nivel nacional y este ecosistema representa el 36,9% de la superficie provincial (Caranqui, 2013, p.18).

El suelo de dichos páramos forma parte de los elementos principales del medio natural, en donde se desarrollan todos los procesos de los seres vivos que lo utilizan como soporte y fuente primordial de materia prima (Bustamante, 2011, p.32).

Los páramos de Atillo presentan en su gran mayoría suelos andosoles alofánicos, es decir que son de origen volcánico, por esta razón presentan un alto contenido de hierro y aluminio en su composición; el aluminio en la naturaleza está presente en dos formas: Al⁺ y Al⁺³, siendo este último un contaminante perjudicial para el correcto funcionamiento de un sistema edáfico (Duche y Lluga, 2020, p.27; Podwojeski, 2000, p. 16).

Este elemento en su forma intercambiable Al⁺³ tiene una relación directa con el pH del suelo, de tal manera que al aumentar la concentración de aluminio incrementa su acidez, causando problemas en la fertilidad del sistema edáfico, debido a que se altera su capacidad de intercambio catiónico (Espinosa y Molina, 1999, p.43). Por ende, es necesario analizar la concentración de aluminio intercambiable en las microcuencas de Atillo y Ozogoché utilizando métodos estadísticos.

Existe una variedad de problemas que pueden ocasionar la acidez del suelo, en el presente trabajo únicamente se tomará en cuenta los factores de mayor importancia: humedad, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica.

Las deficientes prácticas de fertilización correspondientes al uso excesivo de fertilizantes orgánicos no estabilizados, puede ser un factor perjudicial para el pH óptimo del suelo, generando una nitrificación que se traduce en la disminución del pH y por ende un déficit de materia orgánica (Sadeghian, 2016, p.23).

Por otra parte, las bajas temperaturas y por consiguiente una excesiva precipitación registrada en los últimos 10 años en la zona de estudio, posiblemente sean los precursores del alto porcentaje de hidromorfismo del sector, que a su vez genera una alta escorrentía edáfica, la cual está relacionada directamente con la lixiviación de nutrientes esenciales y la fertilidad del suelo (Gobierno Autónomo Descentralizado de Cebadas, 2015, p.22).

❖ **Formulación (Incógnita)**

¿La elevada concentración de aluminio intercambiable (Al^{+3}) ocasionada por los cambios de uso de suelo, la meteorización natural o antrópica del suelo, provoca una remoción de nutrientes básicos, dejando en su lugar el aluminio intercambiable y de esta manera acidificando los suelos de los sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche?

❖ **Justificación**

En el presente trabajo de integración curricular se plantea un problema de interés social y académico, el cual corresponde a la contaminación del suelo por la elevada concentración de aluminio intercámbiale, su relación con la acidez del suelo y su efecto en suelos de tipo andisol de los sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche. Se propone realizar la determinación de la concentración de Al^{+3} en estas microcuencas, además se aplicará un análisis estadístico en función de dichas concentraciones para definir su comportamiento. Por otra parte, se identificarán los principales factores que están involucrados con la presencia de este elemento y además se determinará qué tan fuerte es la correlación existente entre el pH del suelo y la concentración de Al^{+3} . Para medir la concentración del aluminio se utilizará el espectrómetro de absorción atómica usando una lámpara de cátodo hueco de Al^{+3} (Sadeghia, 2016, p.27).

El aumento de acidez en estos suelos es un problema que ocasiona que los cultivos no consigan su desarrollo y disminuyan su calidad; ya que en la zona hay un elevado índice de precipitación lo cual ocasiona la lixiviación de cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na), los cuales se irán perdiendo gradualmente y serán reemplazados por cationes ácidos como el aluminio (Castellanos, 2014, p.38; Toledo, 2016, p.68).

La presente investigación tiene un alto alcance, ya que con ayuda del índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento se podrá conocer fácil y rápidamente el grado de contaminación en cualquier suelo debido a este elemento, por lo cual se podrá predecir en qué tipo de suelo es factible llevar a cabo las principales actividades económicas de la zona. Finalmente, con la aplicación de un bioensayo y utilizando el biomarcador *Lactuca sativa* L. se generará una curva calibración para determinar la dosis letal media de Al^{+3} .

Esta investigación se realizó bajo la asesoría del GIDAC-Grupo de Investigación-Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

❖ Objetivo General

Evaluar el comportamiento del aluminio intercambiable en suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche.

❖ Objetivos específicos

- Determinar la toxicidad del suelo debido a la concentración de aluminio en función del biomarcador *Lactuca sativa* L.
- Valorar el índice de geoacumulación y el factor de enriquecimiento a partir de la concentración de aluminio intercambiable.
- Establecer los principales factores que ocasionan la acidez del suelo a partir de la concentración de aluminio intercambiable.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

A lo largo del tiempo el hombre ha ido colonizando nuevos territorios y modificando sus suelos y sedimentos dependiendo de sus intereses; lo que ha alterado el ciclo natural de diferentes metales contenidos en los mismos como el hierro (Fe), magnesio (Mg) y aluminio (Al). Los suelos con una alta concentración de estos tres metales combinado con un pH inferior a 5,5 pueden presentar toxicidad y generar problemas en la agricultura (Toledo, 2016, p.54).

El aluminio en su forma intercambiable (Al^{+3}) es un elemento que influye directamente en el pH del suelo, es decir que mientras mayor sea la concentración del Al^{+3} más ácido se tornará el suelo y más toxico será para las plantas y los macroinvertebrados (Sadeghian, 2016, p.25).

Las zonas volcánicas a nivel mundial presentan diferentes altitudes, climas y latitudes, y se encuentran asociados a sistemas edáficos con propiedades ándicas, que se formaron a partir de un adecuado drenaje y abundante precipitación, lo que facilita la acumulación de materia orgánica caracterizado por su acelerada meteorización del material parental; estos suelos contienen elevadas concentraciones de aluminio intercambiable (Al^{+3}) debido a que se formaron en condiciones ácidas con un rango de pH entre 4,9 y 6,0 (Ortiz et al., 2014, p.2).

Las zonas cafeteras de Colombia están ubicadas en suelos con propiedades ándicas, ya sean estas no alofánicas (Mayor contenido de C. Orgánico y $pH < 5$), o alofánicas (Menor contenido de C. Orgánico y $pH > 5$); los cuales incrementan la acidez de estos suelos, por lo que Ortiz et al., (2014, p.3) determinaron el aluminio intercambiable por absorción atómica en estos sistemas edáficos y de esta manera valorar la toxicidad a partir de este elemento.

En otro estudio realizado la Universidad Zamorano de Honduras, realizaron la determinación de la acidez intercambiable tanto del aluminio como del hidrógeno en función del pH, en diferentes suelos de la cuenca del Pacífico; realizaron la determinación del aluminio intercambiable a través del método de Bremner y Mulyaney con ayuda del extractante KCl (Oliva 2009, p.6).

En el estudio anteriormente mencionado determinaron que tanto el aluminio intercambiable como el hidrógeno son dependientes del pH del suelo, además establecieron que en suelos de origen volcánico la acidez intercambiable tendrá mayor relación con el pH del suelo, en otras palabras, el pH y el aluminio intercambiable tendrán una relación inversamente proporcional (Oliva 2009, p.6).

Hasta la actualidad los estudios que se han desarrollado en los suelos y sedimentos de las microcuencas de Atillo y Ozogoché se han enfocados en la estimación del carbono orgánico total

y humedales, respectivamente. Shagñay (2014, p.13), realizó el “Levantamiento de línea base de los humedales de la comunidad de Ozogoche, parroquia Achupallas, provincia de Chimborazo”; mientras que Duche y Llugsa (2020, p.32) desarrollaron la “Estimación de carbono orgánico total en el suelo y biomasa del páramo andino de Yasipan y Atillo”.

Es evidente que no se ha realizado un estudio del efecto que tiene el aluminio intercambiable en los suelos y sedimentos, así como la relación que tiene la concentración de este elemento con el pH edáfico, por lo cual la presente investigación puede ser el pilar que incentive el análisis de otros metales importantes para este tipo de suelos como el hierro y manganeso.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Incidencia de las propiedades físicas y químicas del suelo

El suelo es uno de los recursos naturales esenciales y elementales de nuestro planeta, donde se desarrollan las plantas, organismos y microorganismo, comprende un conjunto de materia orgánica e inorgánica, minerales y nutrientes que permiten el desarrollo y sostén de la vida del hombre (ISO, 2014, p.4).

1.2.1.1. Indicadores físicos y químicos del suelo

❖ Propiedades físicas

Es muy importante conocer la calidad del suelo para definir su uso, y las propiedades físicas nos permiten realizar esta valoración, estas propiedades cambian en función de las prácticas de manejo y uso del suelo (García et al., 2012, p.31).

La principal actividad que se realiza en el suelo es la producción agrícola, la cual depende de la calidad de suelo en la que se lleva a cabo, por ende, es necesario conocer sus propiedades físicas las cuales están relacionadas con la cantidad de nutrientes, la disponibilidad de agua y el uso de pesticidas; dando lugar a la denominada calidad física del suelo (García et al., 2012, p.32).

Según García et al. (2012, p33), las determinaciones físicas del suelo pueden ser observaciones sencillas basadas en la experiencia con perfiles de suelo, o a su vez requerir instrumental de diverso grado de precisión, dependiendo del caso. El suelo posee muchas propiedades físicas, a continuación, se nombrarán las más importantes:

- **Densidad Aparente**

Es la relación entre el espacio poroso y la parte sólida del suelo, que se define como la masa del suelo por unidad de volumen (g.cm³), esta propiedad física puede variar dependiendo del contenido de materia orgánica y la textura; y se da generalmente en los suelos que contienen arcilla variando estacionalmente por la humedad y por efecto de cultivos (Rojas y Sáenz, 2012, p.25). Para calcular la densidad aparente se emplea el método del cilindro, sin embargo, existen otros métodos más sencillos como el método de la probeta para muestras alteradas y el método de la parafina para muestras inalteradas (Rojas y Sáenz, 2012, p.26).

- **Textura**

Al estudiar las partículas del suelo se pueden diferenciar dos tipos: los que presentan un diámetro mayor a 2 mm denominados gruesos y los que tienen un diámetro menor a 2 mm denominados finos, de los cuales los elementos finos son empleados para determinar la textura (Gisbert et al., 2015, p.37).

De acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA), podemos encontrar las siguientes partículas con un diámetro menor a los 2 mm:

Tabla 1-1: Clasificación del diámetro de partículas

Nombre	Diámetro
Arena muy gruesa	$2 > \emptyset > 1$
Arena gruesa	$1 > \emptyset > 0.5$
Arena media	$0.5 > \emptyset > 0.25$
Arena fina	$0.25 > \emptyset > 0.10$
Arena muy fina	$0.10 > \emptyset > 0.05$
Limo	$0.05 > \emptyset > 0.002$
Arcilla	$\emptyset < 0.002$

Fuente: (Gisbert et al., 2015, p.41).

Sin embargo, se los puede clasificar únicamente en tres diámetros de partícula:

Tabla 2-1: Clasificación específica del diámetro de partículas

Nombre	Diámetro (mm)
Arena	$2 > \emptyset > 0,05$
Limo	$0.05 > \emptyset > 0.002$
Arcilla	$\emptyset < 0.002$

Fuente: (Gisbert et al., 2015, p.42).

Es muy importante reconocer que la textura del suelo cambia dependiendo del horizonte que se está analizando, en este contexto es incorrecta la definición “textura del suelo” de manera general, ya que existe una determinada textura para cada uno de los horizontes del suelo (Gisbert et al., 2015, p.42).

El método de Bouyoucos es utilizado para conocer la textura exacta de una muestra de suelo en el laboratorio, mientras que en el campo se realiza indirectamente al momento de realizar la descripción del perfil (Gisbert et al., 2015, p.42).

- **Color**

El color es la tonalidad que puede presentar el suelo dependiendo de su composición, esta propiedad es muy útil para distinguirla y caracterizarla, esta propiedad no afecta de manera directa en el desarrollo de la planta, aunque tiene un efecto indirecto en la humedad y la temperatura, es decir que mientras más energía calórica esté disponible o retenida en el suelo, provocará mayor cantidad de evaporación (Domínguez et al., 2011, p.34).

La concentración de ciertos elementos derivados de la roca parental puede dar diferentes tonalidades al suelo, estos elementos se conocen como agentes cromógenos (FAO, 2009, p.3).

Para establecer el color del suelo se utiliza las tablas Munsell, donde se compara el color de la muestra con los diferentes patrones de color establecidos en la tabla y se define un color en función del brillo, croma y matiz (Ramón et al., 2015, p.28).

- **Estructura**

La estructura se refiere a la agregación o unión de partículas individuales del suelo para generar unidades de mayor tamaño conocidas como agregados o terrones y que son el resultado de procesos pedogenéticos, dichos agregados se separan entre sí por medio de vacíos o poros (Ramón et al., 2016, p.31).

En la determinación de la estructura de un suelo es necesario tener en cuenta que se debe seleccionar un terrón grande del perfil y que es necesario que el suelo no tenga humedad, es decir que debe estar seco y en el peor de los casos levemente mojado; esta estructura se puede describir en función del tamaño, tipo de agregados y grado; en el caso de que un horizonte presente agregados con más de un tamaño, tipo de agregados y grado es necesario señalar sus relaciones y describirlos individualmente (FAO, 2009, p.6).

❖ Propiedades químicas

Las propiedades químicas del suelo nos permiten distinguir las condiciones presentes en la relación entre el suelo y la planta, la propiedad amortiguadora, la calidad y disponibilidad de agua, así como los nutrientes que se pueden aprovechar por las plantas y microorganismos (García et al., 2012, p.43).

Entre los de mayor importancia tenemos:

- **El pH en los suelos**

Es un parámetro el cual permite saber que tan alcalino o ácido es un suelo, mediante la medición del potencial de iones hidrógeno; este es un indicador muy económico, útil y sencillo de determinar en los suelos, además permite conocer las diferentes propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo las cuales actúan directamente sobre la disponibilidad de los nutrientes principales en las plantas (INTAGRI, 2018, p.17). La concentración de pH la cual este dentro de un determinado rango posibilita que los nutrientes se encuentren disponibles. En el caso de que el pH se encuentre por debajo de un determinado rango puede presentar inconvenientes de insuficientes concentraciones de potasio, calcio, fósforo, nitrógeno, magnesio o azufre, otro caso es en el cual el pH se puede encontrar es por encima de un rango, en este se puede encontrar una disminución de la disponibilidad de nutrientes como el zinc, manganeso, cobre o hierro (Hepp, 2019, p.23).

El pH determina la concentración de iones hidrogeno, la cual mediante unos valores de 0.0 a 14.0 expresa que tan ácido o base es un suelo. En la siguiente tabla se pueden ver los distintos rangos de pH en los suelos:

Tabla 3-1: Rangos del pH en los Suelos

Rango de pH		Categoría de Ph	Respuesta al encalado
pH agua	pH CaCl2		
< 5.0	< 4.3	Muy fuertemente ácido	Alta a muy alta
5.1 - 5.5	4.4 - 4.8	Fuertemente ácido	Media a alta
5.6 - 6.0	4.9 - 5.3	Moderadamente ácido	Baja a media
> 6.0	> 5.3	Ligeramente ácido	Nula a muy baja

Fuente: (Hepp, 2019, p.44).

Según Hepp (2019, p.44), hay cuatro intervalos de pH los cuales permiten conocer lo que sucede en el suelo, los cuales son:

- Concentración de pH la cual sea menos a 4.0, esta indica la presencia de ácidos libres los cuales son producto de la oxidación de sulfuros.
- Concentración de pH menos a 5.5, en esta se encuentra el manganeso en gran concentración y el Aluminio intercambiable.
- Concentración de pH la cual este en un rango de 7.3 a 8.4, en este rango se pueden encontrar carbonatos de calcio.
- Concentración de pH mayor a 8.2, se puede encontrar presencia de elevadas concentraciones de sodio intercambiable.

La concentración de pH en los suelos que se considera el más apropiado, por lo que en este se encuentra gran disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, es el que va del rango 6.0 a 6.5; existe una excepción en el tipo de suelos andosoles, ya que en este a pesar de que el pH se encuentre dentro de un rango óptimo, muestra diversos problemas como por ejemplo baja concentración de fósforo y elevada concentración de aluminio (INTAGRI, 2018, p.21).

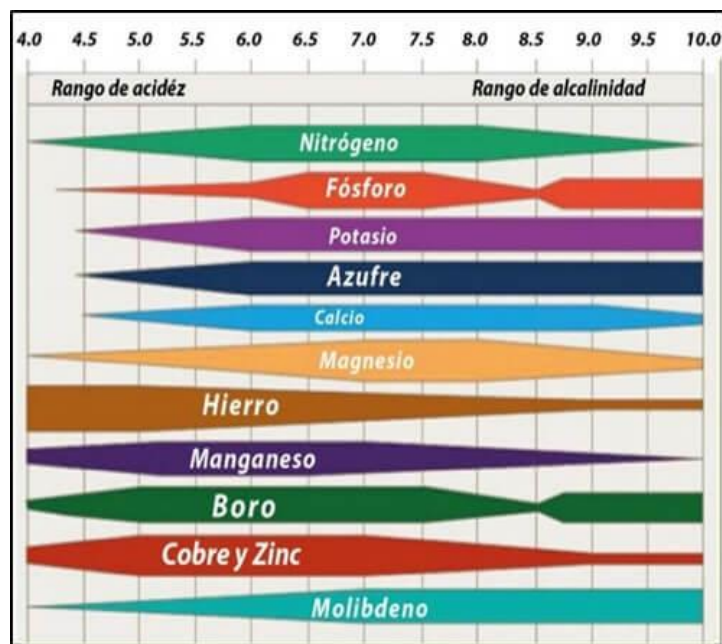


Figura 1-1. Distribución de los nutrientes en función al pH del suelo

Fuente: (INTAGRI, 2018, p.21).

- **Capacidad de Intercambio Catiónico**

Es una propiedad química del suelo que permite conocer el número total de cargas negativas o cationes intercambiables que un determinado sistema edáfico es capaz de reservar, es decir que permite conocer los cationes totales disponibles alrededor de cada fracción de suelo (INTAGRI, 2015, p.19).

Una definición técnica de la capacidad de intercambio catiónico o CIC en el suelo es la carga eléctrica que presenta la materia orgánica en conjunto con las arcillas, dicha capacidad depende del pH o a su vez puede ser permanente y es expresada en cmol.kg^{-1} de suelo (Pérez et al., 2017, p.15).

La materia orgánica y las arcillas poseen una CIC de 200 a 400 cmol.kg^{-1} y 10 a 150 cmol.kg^{-1} respectivamente, lo que indica que la materia orgánica es la que posee una mayor capacidad de retener nutrientes (INTAGRI, 2015, p.20). Por ende, esta propiedad es muy importante para conocer la capacidad que tiene un suelo para intercambiar o retener los nutrientes.

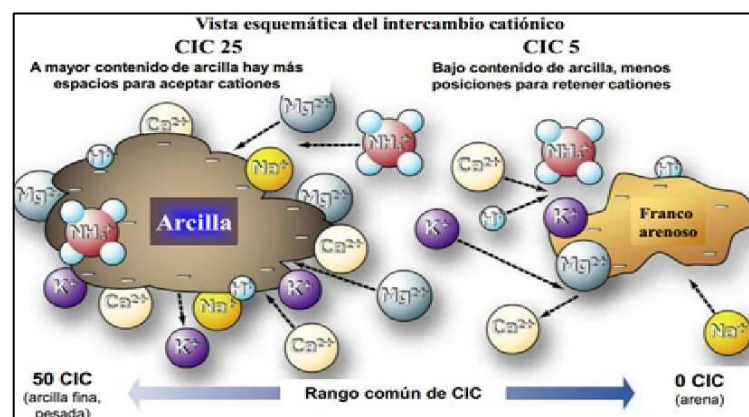


Figura 2-1. Comportamiento de la CIC en distintas texturas de suelo

Fuente: (INTAGRI, 2015, p.21).

Si los suelos y sedimentos son muy meteorizados y ácidos pueden desarrollar una capacidad de intercambio aniónico (presencia de cargas positivas), que atrae cargas negativas como partículas de Cl y P, afectando a su fertilidad natural (Sadeghian, 2016, p.29).

La unidad de medida de la Capacidad de Intercambio Catiónico puede estar expresada en miliequivalente por 100 gramos ($\text{meq}/100 \text{ g}$) del suelo o en centimoles de carga positiva por kilogramo ($\text{cmol (+)}/\text{kg}$). Se puede entender a esto como el número de miligramos de algún catión el cual puede almacenarse en 100 gramos de suelo (Palmer y Troeh, 1995, p.65).

Un ejemplo es el potasio este lleva una carga de (+1) y 1mmol potasio (1+) es equivalente a 1meq potasio (1+). Otro ejemplo es el calcio el cual lleva una carga de (+2), es decir 1 mmol de calcio (+2) es equivalente a 2meq de calcio (Fertilizer, 2020, p.42).

- **Carbono orgánico en el suelo**

Dentro del ciclo global del carbono, que involucra a la atmósfera, el océano, la vegetación y el suelo; podemos encontrar una parte que corresponde al carbono orgánico presente en el suelo (COS). Se valora que 1500 PgC de COS están almacenados en el primer metro de los sistemas

edáficos, lo que supera, incluso combinados, al carbono presente en la vegetación y la atmósfera siendo estos 500 PgC y 800 PgC respectivamente (FAO, 2009, p.7). Por esta razón El COS representa un 69,8 % del carbono orgánico total de la biosfera (Martínez et al., 2008, p.36).

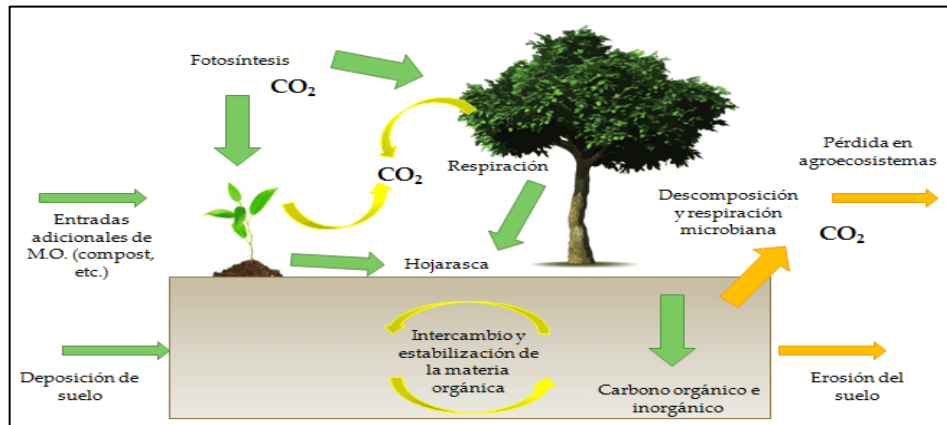


Figura 3-1. Ciclo del carbono orgánico en el suelo

Fuente: (Layla, 2016, p.36).

- **Conductividad eléctrica**

Se entiende a la conductividad eléctrica como la medida de la capacidad que tiene una solución para conducir una corriente eléctrica y está también puede ser conocido como “conductancia específica”. Esta se define como la recíproca o inversa de resistencia eléctrica, las unidades de medida son mhos, en el cual la millonésima parte de un mhos es igual a microsiemens o micromhos, más conocido como μS (HACH COMPANY, 2017, p.11).

Un disolvente polar es el agua (H_2O), las moléculas de agua poseen una distribución imparcial de los electrones lo que provoca que una parte de la molécula negativa, y otra parte de la molécula positiva; por lo cual se afirma que el agua no es un conductor eficiente de la corriente eléctrica, siempre y cuando esta no contenga sustancias disueltas o impurezas (Castro et al., 2017, pp.135-145). La medida de la conductividad eléctrica es afectada por el número de iones disueltos en una solución y esta se incrementará si la movilidad y la cantidad de los iones aumenta. Si la conductividad eléctrica es mayor, la capacidad de la solución para conducir electricidad también será mayor (HACH COMPANY, 2017, p.11).

Es sumamente importante la conductividad eléctrica ya que este indica la cantidad de iones que se encuentran en una solución; un ejemplo, en agua que es muy pura, la cantidad de iones 0.05 S/cm afectan en la medición de la conductividad, esto afecta ya que se puede crear depósitos no deseables en partes cromadas, lo cual causara problemas importantes a la hora de la fabricación de los semiconductores y componentes de turbinas utilizadas en la industria de la energía (Castro et al., 2017, pp.135-146).

La (CE) mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción de esta; por lo tanto, la CE mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo; su valor es más alto cuanto más fácil se mueva dicha corriente a través del mismo suelo por una concentración más elevada de sales así mismo esta aptitud depende principalmente del contenido, movilidad e interacción (fuerzas interiónicas) entre los iones (cationes y aniones) presentes en la disolución (Castro et al., 2017, pp.135-146).

- **Conductividad eléctrica en suelos**

Además, Cortés et al. (2013, p.43), agregan que cuando un suelo tiene un exceso de sales solubles se le denomina suelo salino; la medida de la conductividad eléctrica (CE) del suelo y de las aguas de riego permite estimar en forma casi cuantitativa la cantidad de sales que contiene. El análisis de la CE en suelos se hace para establecer si las sales solubles se encuentran en cantidades suficientes como para afectar la germinación normal de las semillas, el crecimiento de las plantas o la absorción de agua por parte de las mismas; las sales solubles que se encuentran en los suelos en cantidades superiores al 0.1 % están formadas principalmente por los cationes Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{2+} asociados con los aniones Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- (Cortés et al., 2013, p.43).

A través de la medición de ciertas características del suelo, como es el caso de la conductividad eléctrica (CE) y su posterior mapeo, se permite establecer la factibilidad, la viabilidad y el buen desarrollo de un producto en un suelo específico, ya que se considera un método rápido y económico de indicar su productividad (McBride, 1990, p.121). Además, la CE se ve influenciada por el contenido de agua, el de arcilla y la presencia de iones intercambiables en el suelo capaces de conducir la corriente eléctrica y que inciden en las características nutritivas del suelo (Corwin et al., 1999, p.103). Estas propiedades están claramente asociadas con la salinidad del suelo y su estimación y predicción espacial representan un especial interés científico, para nuevas aplicaciones agrícolas o ambientales (Allaire et al., 2012, p.72).

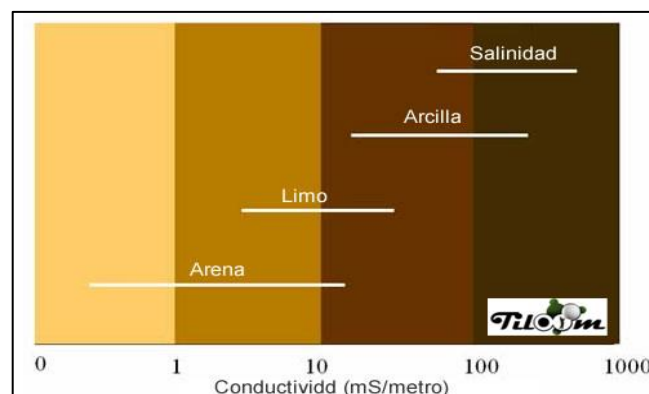


Figura 4-1. Conductividad eléctrica en el suelo

Fuente: (Tiloom, 2016, p.53).

1.2.1.2. Suelos ácidos

El suelo tiene distintos elementos químicos, muchos son necesarios para la nutrición de las plantas, los nutrientes elementales para las plantas son el magnesio, calcio, sodio y potasio, los cuales se los conoce como iones positivos o cationes básicos, estos elementos mencionados son relacionados con arcillas y la materia orgánica, estos cationes se encuentran en un gran porcentaje y dan a conocer que el suelo está sano, se los puede determinar mediante un análisis de suelo lo cual provee datos de la capacidad de intercambio catiónico (Hepp, 2019, p.52).

En climas húmedos generalmente se produce la lixiviación de los cationes básicos, por lo cual el suelo va perdiendo los cationes y el suelo se va empobreciendo; el lugar de los cationes básicos es reemplazado por los cationes ácidos, los cuales suelen ser hidrógeno y aluminio; con el aumento del hidrogeno y aluminio el pH del suelo va disminuyendo y la acidez ira aumentando (Castellanos, 2014, p.47).

El aluminio e hidrógeno en altas concentraciones acidifican los suelos, para poder determinar la medida de acidez de un suelo se utiliza el pH, el cual es la medida del grado de alcalinidad o acidez de un suelo (Castellanos, 2014, p.47).

❖ Origen de la acidez del suelo

La acidez del suelo puede ser inducido por el hombre o también puede ser por un proceso natural (Castellanos 2014, p.48).

Entre las principales maneras en las que acidifica el suelo se tiene:

• Remoción de nutrientes por los cultivos

Los suelos que son cultivados durante largos periodos de tiempo y usados intensivamente, ocasionan acidez en el suelo ya que se da absorción de cationes básicos como por ejemplo el calcio, magnesio y potasio; los cultivos al captar los cationes básicos liberan hidrógeno para que se mantenga el equilibrio, esto colabora con la reducción del pH del suelo y por lo cual se genera acidez (Castellanos, 2014, p.49; Espinosa y Molina, 1999, p.117; Sánchez, 2012, p.58).

• Elevada precipitación

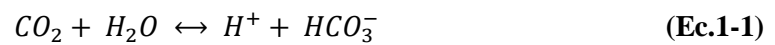
Los suelos con el pasar de los años han sido afectados por una fuerte meteorización, algunos de los factores causantes de la meteorización han sido el relieve y el clima; los ambientes húmedos ocasionan la lixiviación o el lavado de cationes intercambiables (nutrientes) como el potasio,

magnesio y calcio, los cuales dan lugar a ser gradualmente sustituidos por iones ácidos como hierro, manganeso, hidrogeno y aluminio (Molina, 2014, p.84).

Los iones más fácilmente sustituidos son el potasio y sodio ya que tiende a lixivarse rápidamente y estos son sustituidos por el hidrógeno y aluminio (Castellanos, 2014, p.51).

- **Descomposición de la materia orgánica**

La materia orgánica del suelo se descompone por acción de microorganismos, lo cual produce constantemente suplemento de dióxido de carbono (CO_2), el cual sencillamente se transforma a bicarbonato (HCO_3^-) (Molina, 2014, p.86).

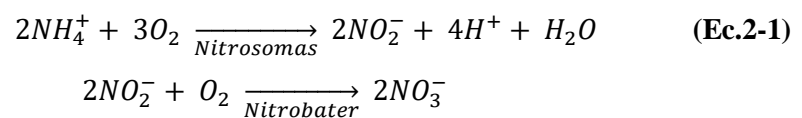


La reacción libera hidrógeno y bicarbonato, el hidrógeno disminuye el pH del suelo lo cual ayuda con la acidificación del suelo; además, el hidrógeno y el bicarbonato se pueden unir sin complicaciones con los cationes básicos lavándolos del suelo, lo cual también ayudara a tener condiciones adecuadas para la acidez (Molina, 2014, p.86).

La materia orgánica está compuesta por grupos fenólicos y carboxílicos activos, los cuales se pueden descomponer y liberar iones hidrogeno en el suelo; la cantidad de materia orgánica va a depender del sitio en donde se encuentre, por lo cual la aportación a la acidez es cambiante (Espinosa y Molina, 1999, p.119).

- **Uso de fertilizantes nitrogenados de reacción ácida**

Los diferentes tipos de fertilizantes nitrogenados que producen o contienen amonio ayudan en el aumento de la acidificación del suelo, a menos de que los cultivos absorban el amonio. Algunos de los ejemplos de fertilizante comunes que aumentan la acidez en el suelo son, la urea, nitrato de amonio y sulfato de amonio. Al utilizar los fertilizantes mencionados en el suelo, ocurre una reacción en la cual se libera amonio (NH_4^+). El amonio se transforma en nitrato (NO_3^-), por la oxidación biológica (Espinosa y Molina, 1999, p.120). El procedimiento por el cual sucede la transformación se lo conoce como nitrificación, las siguientes reacciones son como se representa:



La reacción de la nitrificación se da naturalmente y es necesaria, esta da origen a un exceso de hidrógeno lo cual produce acidez en el suelo; la transformación del amonio (NH_4) a nitrato (NO_3), se da gracias a que las plantas principalmente usan nitrato en su alimentación; por lo cual, en la reacción, por cada molécula de amonio que se transforma a nitrato, se van a liberar dos moléculas de hidrógeno; los suelos deben estar aireados para que las reacciones ocurran, ya que estas requieren de oxígeno para que se dé el proceso de nitrificación (O_2) (Espinosa y Molina, 1999, p.120).

❖ **Clasificación de la acidez**

Según Espinosa y Molina (1999, p.122) la naturaleza de la acidez de los suelos anteriormente mencionados se clasifica en:

- **Acidez potencial:** Acidez no intercambiable más acidez intercambiable.
- **Acidez activa:** Determina la actividad de los cationes de hidrogeno. Es el ion hidrógeno el cual se encuentra disociado en el suelo y proveniente de distintas fuentes, se lo puede determinar mediante el pH en agua.
- **Acidez intercambiable:** Aluminio e hidrógeno intercambiables (H, Al) los cuales por fuerzas electrostáticas se encuentran en los coloides del suelo. Es extraíble con cloruro de potasio (KCl) a 1M.
- **Acidez no intercambiable:** Es el hidrógeno en enlace covalente. Se encuentran en la superficie de los minerales arcillosos los cuales tienen carga variable y materia orgánica. Extraído con acetato de calcio ($C_4H_6CaO_4$).

❖ **Efectos**

La producción de cultivos en suelos ácidos impide conseguir altos potenciales de rendimiento y buena calidad de las cosechas, en estas condiciones del suelo, la solubilidad del aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn) es elevada y sus concentraciones aumentan hasta llegar a niveles muy tóxicos para las plantas; por su parte, el aluminio también impide la absorción de calcio y magnesio, y finalmente, las raíces se acortan y engrosan, impidiendo así la absorción de agua y nutrimentos, en particular, el abasto de fósforo (P) y molibdeno (Mo) se ve seriamente comprometido (Demanet, 2017, p.64; Castellanos, 2014, p.52).

Otros efectos o consecuencias que causa la acidez en el suelo según Demanet (2017, p.65):

- Afecta el desarrollo de las raíces.
- Reduce la capacidad de profundización de las raíces en el suelo.
- Incrementa la susceptibilidad de las plantas a la sequía.
- Disminuye el uso de nutrientes del subsuelo.

- Inhiben la elongación radical.
- Disminuye el crecimiento de la planta.
- Aumenta la sensibilidad a los cambios ambientales (frío, sequía, inundaciones, sobre pastoreo).
- Limita la nutrición y productividad de las pasturas.

❖ **Medición de la acidez del suelo**

Para realizar la medición de la acidez del suelo existen dos métodos diferentes los cuales son: el método más empleado y preciso es el potenciómetro. El método mencionado ayuda a determinar el pH de los suelos, el potenciómetro tiene un electrodo de vidrio el cual se lo pone en contacto con agua destilada y suelo en suspensión, el electrodo arroja un resultado en la escala que el equipo este calibrado (Espinosa y Molina, 1999, p.126).

El otro método es el uso del papel indicador, el cual es útil en el campo ya que brinda una valoración rápida del pH y los datos los cuales brinda es más o menos aproximado al valor real. Ya que el método no es tan preciso la persona la cual utilice el papel indicador debe de tener experiencia para poder evitar posibles errores en la medición (Espinosa y Molina, 1999, p.126).

1.2.2. Enriquecimiento de metales pesados

También conocido como acumulación de metales pesados, son métodos de normalización geoquímica, estas ayudan saber los factores de enriquecimiento y los índices de geo-acumulación (Aguila et al., 2005, p.49).

1.2.2.1. Factor de enriquecimiento

Es sumamente empleado para la valorización de metales pesados en suelos, sedimentos lacustres y sedimentos fluviales (Quevedo, 2013, p.43). En Química Ambiental a este concepto se lo emplea como marco de referencia para poder conocer la fuente de contaminación de metales en el suelo o sedimentos y así poder valorar si la procedencia de la contaminación es de origen natural o antropogénico (Aguila et al., 2005, p.50).

A fin de estandarizar la aproximación y poder conseguir la concentración verdadera del metal se determinó la siguiente ecuación adimensional (Guzmán et al., 2019, p.5):

$$FE = \frac{\left(\frac{x}{y}\right)_{muestra}}{\left(\frac{x}{y}\right)_{fondo}} \quad \text{(Ec.3-1)}$$

Donde:

X: Concentración del metal pesado potencialmente enriquecido

Y: Concentración del metal pesado de referencia utilizado

Los metales que son de referencia se los valora como conservativas ya que constituyen a minerales que son fuertes a la meteorización química. La categorización del grado de enriquecimiento se presenta en la tabla 4-1.

Tabla 4-1: Caracterización del grado de enriquecimiento

Clases de FE	Origen del elemento X (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: (Aguila et al., 2005, p.24).

1.2.2.2. Índices de geo-acumulación

El índice de geo-acumulación fue planteado por Müller en el año de 1969, es ampliamente utilizado para hacer una valoración del impacto ambiental que ocasiona los distintos metales pesados en suelos y sedimentos (Trujillo y Torres, 2015, p.16).

El empleo de los índices posibilita conocer el valor de contaminación del suelo o sedimento por los metales pesados, el valor que brinda determina si el suelo o sedimento se ha contaminado por sustancias orgánicas e inorgánicas (Serra et al., 2014, p.6). El factor evalúa la contaminación mediante una relación entre la concentración del metal estudiado y valores que ya están establecidos (Águila et al., 2005, p.25).

El índice puede ser calculado a través de la siguiente ecuación:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right) \quad (\text{Ec.4-1})$$

Donde:

Cn: Concentración del metal en el sedimento (Concentración del elemento examinado)

Bn: Concentración geoquímica del metal (Metal encontrado en la corteza terrestre)

1,5: Factor de corrección de efectos litogénicos.

En la tabla 5-1 se muestra el valor, clase y grado de contaminación de la geo-acumulación.

Tabla 5-1: Clases y Valores de los Índices de Geo-acumulación

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

Fuente: (Aguila et al., 2005, p52).

1.2.3. Comportamiento del aluminio en el suelo

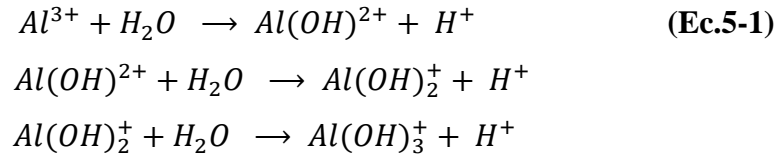
La elevada concentración de aluminio en el suelo tiene los siguientes efectos negativos en el desarrollo de las plantas:

- Incrementa la susceptibilidad a los cambios ambientales (frío, sequía, inundaciones)
- Ralentiza el crecimiento de la planta
- Perjudica el desarrollo de las raíces
- Las plantas son más susceptibles a la sequía

1.2.3.1. Aluminio intercambiable

Uno de los principales elementos en el aumento de la acidez de los suelos es el aluminio intercambiable (Al^{+3}), donde los cationes de aluminio que se desplazan de las arcillas se hidrolizan, es decir, reaccionan con una molécula de agua y liberan hidrógenos; esta reacción al liberar hidrógenos ayuda a el aumento de la acidez del suelo, lo que favorece la presencia de más iones de aluminio, los cuales se encuentran disponibles para reaccionar otra vez (Castellanos, 2014, p.62).

Las reacciones de hidrólisis del Al^{3+} son similares a la reacción de un ácido fuerte como el ácido acético que libera iones H^+ (Espinosa y Molina, 1999, p.129). La hidrólisis de las formas monoméricas del Al se ilustra en las siguientes reacciones:



1.2.4. La estadística como objeto de estudio de la pedometría

La expresión “pedometría” esta derivada de dos raíces griegas pedos (suelo) y metrón (medición), unificando dos ideas principales: la pedología que corresponde al estudio del suelo y el aspecto métrico que obedece a métodos estadísticos y matemáticos, por ende, se define a la pedometría como el estudio de la génesis y distribución del suelo utilizando métodos cuantitativos (Odeh y McBratney, 2005, p.29).

La pedometría tiene un enfoque cuantitativo por lo que necesita la recopilación de información cuantitativa a partir del suelo de campo, para de esta manera abordar temas relevantes como la gestión ambiental y la seguridad alimentaria; asimismo, dicha información cuantitativa del suelo puede ser empleado para otros ámbitos como la hidrología, climatología, agricultura y entre otros, para predecir adecuadamente sus efectos (Minasny et al., 2014, p.32).

1.2.4.1. Funciones de Edafotransferencia

De manera general se puede definir a las funciones de edafotransferencia (FET) como el uso de datos generales del suelo en información útil y específica, empleando métodos matemáticos y correlaciones, dichas funciones pueden predecir diferentes propiedades complejas o costosas del suelo, utilizando como base otras propiedades que son sencillas de medir y económicamente accesibles; es decir que una FET permite realizar una correlación entre dos o más propiedades del suelo que son simples de determinar, con propiedades que son complicadas de obtener en su fase experimental, ya sea por tiempo que se emplea en su realización o a su elevado costo (Odeh y McBratney, 2005, p.31).

La textura, agregados, contenido de materia orgánica, densidad aparente y pH de campo, son propiedades que no son complejas de medir en el estudio de suelo y por ende son las más utilizadas para generar un factor de edafotransferencia que permita predecir las propiedades complejas de medir y de esta manera realizar una evaluación edáfica de calidad (Soracco et al., 2010, p.36).

1.2.5. La toxicidad del aluminio en el suelo

Los suelos ácidos comprenden más del 40% de la superficie agrícola en toda la tierra, que corresponde aproximadamente a 37,8 millones de km², este tipo de suelos es causado principalmente por la elevada concentración de aluminio que a su vez provoca una acidez edáfica la cual interfiere en la productividad y crecimiento de las plantas (Casierra y Aguilar, 2018, p.35).

Esta acidez afecta de manera directa al correcto funcionamiento de la solución del suelo disminuyendo la concentración de macronutrientes y el descenso de la solubilidad del molibdeno y fósforo (Rivera et al., 2016, p.73). En estos suelos y sedimentos el aluminio ocupa la mayor parte de los lugares de intercambio correspondiente a las arcillas, es decir que el aluminio toma el lugar de cationes elementales como el Ca, el Mg y K (bases intercambiables), generando un pH inferior a 6 (Casierra y Aguilar, 2018, p.36).

Debido a la elevada acidez del sistema edáfico y por ende el aumento de la carga positiva de dicho sistema se produce una disminución de la capacidad que tiene el suelo de retener los cationes esenciales de intercambio como el Na, K, Ca y Mg. La elevada precipitación en conjunto con la reducción de la capacidad de retención catiónica aumenta la probabilidad de que se genere una lixiviación de las bases esenciales del suelo (Toledo, 2016, p.62).

1.2.5.1. Fuentes naturales y antrópicas del aluminio

❖ Fuentes Naturales

El aluminio es el metal más abundante el cual está presente en la corteza terrestre, además es el tercer elemento más abundante, es parte de los animales, plantas y suelos, además se encuentra permanente en su forma elemental en la naturaleza; mientras que en la litosfera jamás se encuentra al aluminio como un metal puro, pero este se encuentra en gran cantidad en combinación con otros elementos como lo son el oxígeno y silicio, también se encuentran en minerales aluminosilicatos insolubles y complejos, los cuales se encuentran en gran cantidad en rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas (Sancha et al., 2005, p.48).

En los procesos de desgaste natural de los suelos, el aluminio se halla en forma de mineral secundario estable, como por ejemplo hidróxido de aluminio, silicatos de aluminio impuros o arcillas, entre otros (Sancha et al., 2005, p.49).

La mayoría de los sistemas hídricos tienen la posibilidad de disolverlo, pero debido a que el aluminio es un metal insoluble, la cantidad presente en fuentes de aguas naturales es comúnmente < 1 mg/L, sin embargo, existen algunas excepciones, una de ellas son las aguas de alto o bajo pH, o aguas en la cuales se encuentre alta presencia de orgánicos, en este caso el aluminio puede ser

más soluble; mientras que en aguas subterráneas ácidas se puede encontrar altas concentraciones de aluminio, en aguas superficiales, las cuales son acidificadas naturalmente y se encuentran con un $\text{pH} < 4$, también se puede encontrar grandes concentraciones de este elemento (Sancha et al., 2005, p.50).

❖ **Fuentes Antrópicas**

En el año 1825 fue cuando se aisló por primera vez el aluminio, posteriormente transcurrieron 60 años para que se produjera este metal industrialmente (Asociación Española del Aluminio, 2008, p.4).

La producción de aleaciones de aluminio, aluminio metálico y otros productos, o también conocido como minería y procesamiento de minerales de aluminio, pueden ser generadores de altas concentraciones de aluminio hacia la naturaleza; las plantas de energía las cuales usan carbón como combustible también son generadores de aluminio en el ambiente, pero en pequeñas concentraciones (ATSDR, 2008, p.25).

La ganadería y los procesos agropecuarios en los últimos años han crecido exponencialmente impulsando el crecimiento económico de las comunidades que se dedican a estas labores, no obstante, las actividades anteriormente mencionadas han ocasionado un impacto negativo en el medio ambiente ya que estas son los más importantes contaminadores de los recursos ambientales acuáticos y terrestres, como consecuencia del aumento de la actividad ganadera y agropecuaria se ha incrementado el uso de fertilizantes, pesticidas sintéticos y otros insumos (INTAGRI, 2013, p.26). Lo cual ha conllevado que los suelos tengan una gran disminución de micronutrientes y se ocasionen efectos tóxicos los cuales son generados por la aparición del aluminio intercambiable (FAO, 2018, p.4).

1.2.5.2. El aluminio como toxicante en el agua

Las concentraciones del aluminio en aguas suelen ser más elevadas en comparación con otros cationes como el magnesio, zinc o hierro; este elemento no es importante para los seres vivos y según fuentes bibliográficas se lo considera como un agente tóxico (Lewis, 1989, p.64; Bondy, 2010, p.39). Este agente tóxico no afecta a los organismos vivos de los ecosistemas, la principal razón por la que no afectan es que el aluminio puede reaccionar de una manera sencilla como el silicio, el cual es el elemento más abundante en el planeta Tierra, al reaccionar ambos elementos pueden formar a los aluminosilicatos y bauxita con el oxígeno, de esa manera el control geoquímico, determina la biodisponibilidad del aluminio dentro de los parámetros en los cuales no haga ningún daño, es decir dentro de parámetros inofensivos, sin embargo, las actividades antropogénicas están aumentando su biodisponibilidad y por ende se están generando más impactos (Torrellas, 2013, p.51).

1.2.5.3. El aluminio como toxicante en el suelo

El aluminio es poco soluble, por ende no suele alcanzar concentraciones tóxicas en los suelos, pero cuando ocurre una reducción del pH del suelo el aluminio incrementa su solubilidad, esto ocasiona la reducción de cationes intercambiables (K, Mg, Ca) que son nutrientes esenciales en los suelos, también ocasiona efectos tóxicos los cuales son causados por cationes como el hidrógeno, aluminio y el manganeso; por lo cual existen algunos parámetros para poder medir la posibilidad de toxicidad por el aluminio intercambiable, un ejemplo es la relación $(Ca+Mg+K)/Al$, en donde el aluminio intercambiable muestra ciertas condiciones de toxicidad para las plantas cuando el cociente sea menor o igual a uno (INTAGRI, 2013, p.28).

1.2.5.4. Efectos del aluminio en las plantas

La gran mayoría de las plantas son sensibles al efecto tóxico que produce el aluminio, aunque existen muchas especies las cuales han adoptado mecanismos de tolerancia ante este metal (Morales et al., 2015, p.39).

En el momento en que las plantas absorben aluminio por medio de las raíces, este elemento impide bruscamente el crecimiento y cambia las funciones metabólicas de las plantas, primordialmente en las raíces es en donde puede ver la afección del aluminio sobre la planta ya que este es el primer órgano el cual tiene contacto directo con el metal; además de impedir el crecimiento longitudinal de las raíces, el aluminio las deforma haciéndolas muy gruesas y pequeñas (Figura 5-1), lo que ocasiona que se reduzcan su capacidad de absorber agua y también los nutrientes (Morales et al., 2015, p.40).

El aluminio intercambiable se puede acumular en la zona de elongación, ápices y el tejido meristemático, la zona más distante de elongación radical es la zona la cual es más sensible a este elemento, lo que inhibe su desarrollo natural (Sivaguru y Horst, 1998, p.132).

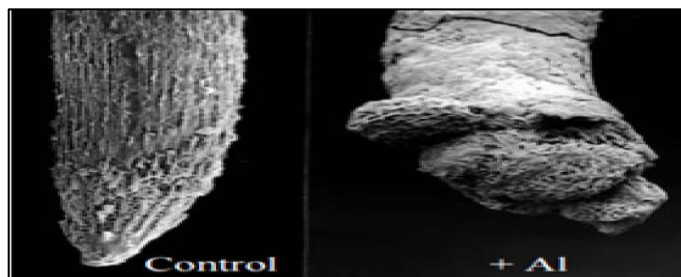


Figura 5-1. Deformación de las raíces causada por Al^{+3}

Fuente: (INTAGRI, 2013, p.29).

Según Demanet (2017, p.47), los principales efectos del aluminio sobre las plantas son:

- Impedimento de la elongación radical
- Efecto sobre el desarrollo de las raíces
- Reducción del consumo de nutrientes del subsuelo
- Reducción del crecimiento de las plantas
- Restringe la productividad y nutrición de las pasturas
- Aumento de la susceptibilidad de las plantas a la sequedad
- Incremento de la sensibilidad a los cambios ambientales, como, por ejemplo: sequía, inundaciones, frío, sobre pastoreo
- Reducción de la facultad de profundización de las raíces en el suelo

1.2.6. Biomarcadores como herramienta de toxicidad de elementos químicos

Las pruebas de toxicidad son herramientas necesarias en la determinación del efecto nocivo de distintos compuestos químicos en relación a la concentración, tiempo, dosis y respuesta para evaluar el impacto sobre el ambiente y sus recursos naturales como: suelo, aire y agua, donde por lo general, los compuestos tóxicos se complejizan mediante transformaciones biológicas (principalmente), físicas y químicas a compuestos más tóxicos en comparación a los iniciales, este proceso se da cuando dichos compuestos entran en contacto con el medio ambiente, lo que representa peligros ambientales y de salud para una población (Silbergeld et al., 1971, p.142).

En este contexto los biomarcadores son aquellos organismos o comunidades en los que su desarrollo, reacciones y funcionamiento, dependen del medio en el que se desenvuelven y cambian al modificarse las condiciones ambientales, por ende, un bioindicador puede ser un grupo de especies animales, vegetales o microorganismos, que presentan un rango estrecho de tolerancia a uno o varios factores ambientales que pueden tener origen biótico o abiótico (Silbergeld et al., 1971, p.143).

A partir de la definición de un bioindicador se genera el término de biomarcador, que corresponden a las respuestas de los organismos vivos que están expuestos a diferentes contaminantes presentes en el ambiente, dicha respuesta o cambio que se produce en el organismo vivo puede ser cuantificable en una de sus partes, como consecuencia de la exposición a diferentes agentes externos, como por ejemplo contaminantes químicos (González et al., 2014, p.45).

1.2.6.1. Plantas como bioindicadores

Las plantas presentan ciertas capacidades y limitaciones morfológicas, fisiológicas y reproductivas; las cuales permiten generar una respuesta a factores bióticos y abióticos de su ambiente, también son seres sésiles y por ende interactúan de manera directa e intensa con su entorno, por lo que dentro de los factores bióticos más importantes tenemos la simbiosis, polinización, dispersión y competencia; mientras que dentro de los factores abióticos que tienen repercusión sobre las plantas encontramos la temperatura, humedad, la disponibilidad de recursos y los tipos de disturbios (incendios, remoción de cobertura vegetal) (González et al., 2014, p.47; Tenjo y Cárdenas, 2015, p.39).

Las diferentes especies de plantas pueden indicar diferentes tipos de factores ambientales, por lo que pueden ser utilizadas como bioindicadores, de ellas las especies más útiles son aquellas que indican condiciones del suelo tales como la textura, pH, fertilidad; o de estrés: salinidad o tipo de manejo, algunas plantas también pueden utilizarse como indicadoras de clima; por lo anterior el aprovechamiento de las plantas como indicadoras se ha perfeccionado a lo largo del tiempo y en la actualidad son empleadas para determinar la toxicidad de distintos elementos presentes en la naturaleza (Rodríguez, 2011, p.71).

1.2.6.2. Criterios de selección de biomarcadores vegetales

Las poblaciones de especies vegetales que se usan como bioindicadores deben ser abundantes, muy sensibles a los cambios en el medio donde habitan, fáciles de identificar y bien estudiadas en su ecología y ciclo biológico, en cuanto más estrecho sea su límite de tolerancia, mayor será su utilidad como indicador ecológico o bioindicador (Tenjo y Cárdenas, 2015, p.40).

Según González (2014, p.49), dentro de las características biológicas que debe cumplir un taxón para ser considerado como bioindicador tenemos:

- Sensibles ante alteraciones del ambiente, pero no tanto como para indicarnos variaciones poco significativas.
- Los cambios que se producen deben darse en muy poco tiempo después de originarse la alteración.
- Abundante de tal manera que permite tomar muestras periódicamente sin comprometer la estabilidad de la población.
- Su baja movilidad facilita conocer el origen del disturbio.
- Resistentes para poder manipularlos, transportarlos, experimentar y analizar con ellos.
- Presentar una amplia distribución que permite realizar comparaciones entre distintas poblaciones.

1.2.6.3. Principales biomarcadores vegetales

En diversos estudios científicos se emplean semillas de especies vegetales sensibles a diferentes compuestos químicos que afectan al ambiente, permitiendo evaluar los efectos de estas sustancias en la germinación y el crecimiento del vegetal principalmente, entre los biomarcadores vegetales más utilizados tenemos: el berro, rábano, col china, la cebada, el guisante y la lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Leanne et al., 2021, p.63).

1.2.6.4. Uso de *Lactuca sativa* L. como biomarcador

El bioensayo de toxicidad con semillas de *Lactuca sativa* L. (lechuga), consiste en una prueba estática de toxicidad aguda que se desarrolla durante 120 horas, en el cual se evalúa en el desarrollo de las plántulas en conjunto con la germinación de las semillas durante los primeros días del proceso de crecimiento; estos efectos fitotóxicos se evalúan y materializan en la inhibición de la germinación, la elongación de la radícula y del hipocótilo (tallo) (Ramírez y Cantú, 2008, p.52).

En los primeros días de desarrollo de la plántula y sobre todo en el periodo que comprende la germinación se llevan a cabo diferentes procesos fisiológicos, los cuales pueden verse afectados directamente por la presencia de una sustancia tóxica; es decir que en esta etapa la planta presenta una gran sensibilidad hacia los factores externos y puede fácilmente alterarse su supervivencia y desarrollo normal (Ramírez y Cantú, 2008, p.53).

Indican que a diferencia de la prueba tradicional de germinación de semillas, la evaluación del efecto en la elongación de la radícula y del hipocótilo de las plántulas permite ponderar el efecto tóxico de compuestos solubles presentes en niveles de concentración tan bajos que no son suficientes para inhibir la germinación, pero que sin embargo pueden retardar o inhibir completamente los procesos de elongación de la radícula o del hipocótilo, dependiendo del modo y sitio de acción del compuesto (Ramírez y Cantú, 2008, p.55).

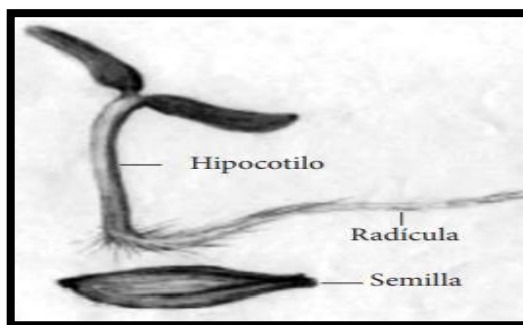


Figura 6-1. Morfología de la plántula y la semilla de lechuga *Lactuca sativa* L

Fuente: (Ramírez y Cantú, 2008, p.55).

La *Lactuca sativa* L. es una especie interesante de considerar por su importancia desde el punto de vista hortícola, además de que es de fácil y rápida germinación por lo que permite desarrollar la parte experimental en algunos días; este bioensayo de toxicidad utilizando estas semillas, ha sido recomendado y aplicado por diferentes organismos de protección ambiental para la evaluación ecotoxicológica de diferentes muestras ambientales (Ignacio et al., 2018, p.37; Ramírez y Cantú, 2008, p.57).

Por lo tanto, se utiliza esta especie debido a sus diferentes ventajas en comparación con otros vegetales, tales como su sensibilidad, costos reducidos, el tiempo de exposición de la prueba con semillas (5 días), y sobre todo que no se requiere un equipamiento sofisticado o específico para realizar este bioensayo (Ignacio et al., 2018, p.39).

1.2.7. Espectrofotometría de absorción atómica

1.2.7.1. Principio

En el año 1840 Kirchoff y Bunsen realizaban estudios del fenómeno de auto-absorción en el espectro de los metales alcalinos y alcalinos-térreos, a partir del estudio mencionado establecieron los primeros principios teóricos de la absorción atómica (Razmilic, 1994, p.83).

Kirchoff al enunciar su ley general: “Cualquier materia que pueda emitir luz a una cierta longitud de onda también absorberá luz a esa longitud de onda”, determinó la base de la espectroscopia de absorción atómica (EAA) (Razmilic, 1994, p.84). El principio de la espectrofotometría de absorción atómica consiste en que los átomos libres cuando se encuentran en estado fundamental son capaces de absorber la luz a una cierta longitud de onda, cada elemento expuesto absorbe longitudes de ondas únicas, por tal motivo la absorción es específica para cada elemento (Abril et al., 2017, p.39).

La EAA se caracteriza por ser una técnica analítica la cual es aplicable principalmente para realizar análisis de trazas de elementos metálicos en: aguas, alimentos, muestras metalúrgicas, minerales, medio ambiente, farmacéuticas y biológicas (Abril et al., 2017, p.42). Esta técnica además es capaz de determinar y detectar cuantitativamente las trazas de los metales, a partir del uso de la absorción de la luz para poder medir la longitud de onda propia de cada átomo (Pacheco y Torres, 2020, p.35).

1.2.7.2. Fundamento

Un átomo consta de electrones y un núcleo, los cuales llenan ciertos niveles cuánticos. Todas las especies tienen un estado de poca energía el cual se lo conoce como “estado fundamental” y también tiene un estado de alta energía el cual se lo denomina “estado excitado”, en el caso de

que un átomo se encuentre en estado fundamental necesita absorber energías externas para de esa manera poder pasar a un nivel más alto de energía; el estado mencionado es inestable por lo cual el átomo regresa a su estado inicial, produciendo una radiación de una determinada frecuencia (Pacheco y Torres, 2020, p.38; Razmilic, 1994, p.81).

La frecuencia de energía requerida para la transición de un estado fundamental al excitado puede ser proporcionada por un fotón de luz con una energía dada por la ecuación de Planck:

$$E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Ec.6-1})$$

Donde:

E1= Energía del estado excitado

E0= Energía del estado fundamental

h= Constante de Planck = $6,626069 \times 10^{-34}$ julios/segundo

v= Frecuencia, dada en (segundo⁻¹)

c = Velocidad de luz = $2,997925 \times 10^8$ metros x segundo

λ = Longitud de onda, dada en (metros)

De acuerdo con la teoría atómica, un átomo es capaz de llegar a diferentes (E1, E2, E3, E4...) y cada uno de los estados pueden llegar a producir una radiación ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4...$) única, de esta manera se obtiene un espectro atómico el cual se caracteriza por presentar un gran número de líneas discretas, es importante en la absorción atómica únicamente la longitud de onda la cual corresponde a transición entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado, a esto se lo denomina longitud de onda de resonancia (Razmilic, 1994, p.86).

De acuerdo con la ecuación de Planck, se afirma que un átomo puede absorber solo radiación de una longitud de onda específica (frecuencia específica), por ello, la absorción atómica estudia la medición de la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar por una población de átomos libres la cual se encuentran en estado fundamental, es decir que estos pueden absorber parte de la radiación, proporcionalmente a su concentración atómica (Razmilic, 1994, p.87).

La trayectoria de la radiación es constante y el coeficiente de absorción depende de cada elemento, por lo cual se afirma que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la especie absorbente, y por ende la relación entre absorción y concentración está definida por la Ley de Lambert-Beer (Razmilic, 1994, p.87).

1.2.7.3. Ecuación de Lambert-Beer

La absorción que acontece en un sistema de la absorción atómica corresponde a la siguiente ley de Beer- Lambert:

$$A = a.b.c \quad (\text{Ec.7-1})$$

Donde:

A= Absorbancia

a =Constante de proporcionalidad llamada absortividad

b = Espesor de la celda o camino óptimo

c = Concentración de la especie absorbente g/L

En el caso de que la concentración se quiera expresar en moles por litro, a la absortividad se la llama “absortividad molar” y se representa con el símbolo ϵ .

Cuando se expresa la concentración en moles por litro la absortividad se denomina absortividad molar y se representa con el símbolo ϵ (Skoog et al., 2008, p.774).

$$A = \epsilon b \quad (\text{Ec.8-1})$$

Donde:

ϵ : Coeficiente de absortividad molar

1.2.7.4. Instrumentación

A continuación, se muestra un diagrama que permite apreciar cada una de las partes que integran a un equipo de absorción atómica.



Figura 7-1. Diagrama de un equipo de absorción atómica

Fuente: (Skoog et al., 2008, p.775).

❖ Fuente de radiación

Las fuentes de radiación que son empleadas en el espectrofotómetro de absorción atómica originan una banda estrecha, de estabilidad idónea e intensidad apta, a lo largo de periodos de

tiempo extendidos; para realizar mediciones de absorción atómica la fuente más radiante es la lámpara de cátodo hueco que consta de un ánodo construido con un hilo de wolframio de 1mm de diámetro fabricado con un material igual al elemento que se va a analizar, todo se encuentra alojado en un cilindro de vidrio con una ventana de cuarzo por donde sale la radiación; este cilindro está lleno de argón o neón a una presión de 1 a 5 torr (Skoog et al., 2008, p.782).

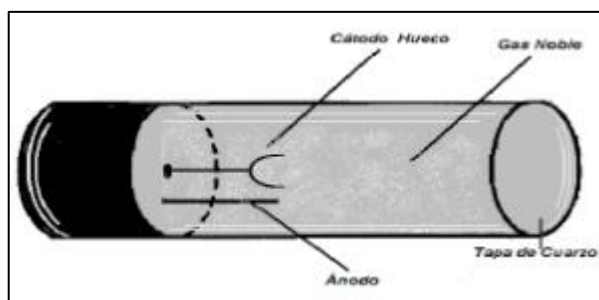


Figura 8-1. Lámpara de cátodo hueco

Fuente: (Skoog et al., 2008, p.782).

❖ Atomizador

Este componente del espectrofotómetro de absorción dota de átomos en estado fundamental. Hay que tener en cuenta que sólo los átomos que se encuentren en estado fundamental absorben la radiación, por esta razón es fundamental proporcionar a las muestras energía, en una proporción la cual sea apta para disociar la molécula, este proceso debe ser de la manera más rápida (Chukiwanka, 2018, p.72).

En los atomizadores con llama la disolución de la muestra es a través de un flujo de gas oxidante el cual es mezclado con el gas combustible y se modifica en una llama en donde se lleva a cabo la atomización; donde la desolvatación es el primer paso en el cual se evapora el disolvente hasta crear un aerosol molecular en fase sólida que está finamente dividido, posteriormente ocurre la disociación de la mayor parte de las moléculas creando un gas atómico (Chukiwanka, 2018, p.73).

Tabla 6-1: Tipos de llamas

Combustible	Oxidante	Temperatura	Vel. De Combustión
Gas LP	Aire	1700-1900	39-43
Gas LP	Oxígeno	2700-2800	370-390
Hidrógeno	Aire	2000-2100	300-440
Hidrógeno	Oxígeno	2550-2700	900-1400
Acetileno	Aire	2100-2400	158-266
Acetileno	Oxígeno	3050-3150	1100-2480
Acetileno	Óxido nitroso	2600-2800	285

Fuente: (Chukiwanka, 2018, p.74).

❖ Monocromador

Este componente es un selector de las longitudes de onda, en el cual se dispersan las longitudes de onda de luz y tan sólo la línea analítica es enfocada en el detector, principalmente tiene la función de controlar la pureza de la radiación que es emitida, esta tiene que conseguir el menor ancho de banda de longitud de onda posible; está compuesto por espejos, conjunto de lentes, ranuras para dispersar, enfocar, restringir y separar la radiación que no es deseada (Skoog et al., 2008, p.785).

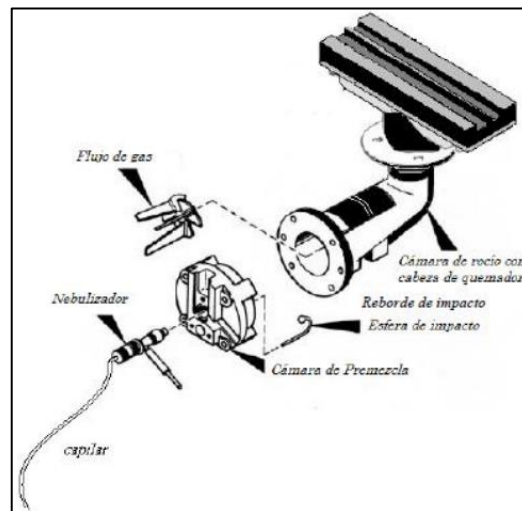


Figura 9-1. Componentes de un atomizador de llama

Fuente: (Skoog et al., 2008, p.785).

❖ Detector

El detector suele estar diseñado por fotoceldas, fotodiodos, fototubos o fotomultiplicadores, en este caso el comúnmente utilizado es el fotomultiplicador el cual produce una corriente eléctrica, esta es directamente proporcional a la intensidad de la línea que es aislada por el monocromador (Razmilic, 1994, p.90).

Este dispositivo se encarga de atraer la señal óptica la cual proviene del monocromador y se encarga de transfórmalo en una señal electrónica la cual es capaz de ser convertida en un valor (Skoog et al., 2008, p.786).

❖ Amplificador

El amplificador se encarga de amplificar la señal pasando después a un dispositivo de lectura el cual puede ser un registrador, un voltímetro digital u otros (Razmilic, 1994, p.90).

❖ **Sistema de presentación**

Es una pantalla en la cual se muestra la lectura una vez se haya procesado la muestra por el instrumento electrónico (Razmilic, 1994, p.91).

1.3. Bases conceptuales

1.3.1.Sistemas Lacustres

Hace referencia a espacios, elementos o fenómenos los cuales están relacionados con los lagos de agua que pueden tener olas muy pequeñas, además tiene que ver con la forma, geográfica, acuática, biológica y geológica de los lagos (Barona et al., 2012, p.52). Estos son formaciones que se encuentran en la superficie de la tierra, las cuales se pueden producir por catástrofes como: inundaciones, erupciones volcánicas, avalanchas, deslizamientos, inundaciones, intervenciones humanas e impactos meteóricos (Reynolds, 2005, p.341).

1.3.2.Sistemas Fluviales

Es un sistema que está asociado a los procesos de formación del relieve continental por acción de, principalmente, los ríos y arroyos; empleando el agua como agente de erosión y transporte (Santi et al., 2018, p.124).

1.3.3.Páramo

Es un ecosistema de montañas altas del trópico húmedo, este es dominado por vegetación abierta y comúnmente se encuentra ubicado entre el límite del bosque cerrado y las nieves, su definición exacta varía mucho, esto hace difícil saber exactamente lo que se considera como páramo en un lugar específico (Hofstede et al., 2014, p.83).

1.3.4.La infiltración

Es un proceso en el cual el agua lluvia o de riego penetra desde la superficie terrestre hacia las capas inferiores del suelo, ocurre de forma vertical y horizontal; también se le puede denominar a la velocidad o tasa de infiltración, normalmente se mide en mm/hora (Alvarado y Barahona, 2017, p.77).

1.3.5.Humedales

Son zonas que se encuentran húmedas permanentemente, en esos el agua es el factor principal de la vida y medio animal y vegetal; estos se suelen formar en lugares donde los terrenos están cubiertos por aguas o en donde la capa freática se encuentra en la superficie de la tierra (López et al., 2010, p.86).

1.3.6.Eutrofización

Es un proceso que generalmente se da de manera natural o también antropogénica donde el agua superficial sufre un enriquecimiento excesivo con nutrientes disponibles para las plantas (García y Miranda, 2018, p.68).

1.3.7.Microcuenca

Es un área de aguas subterráneas y superficiales con caudales continuos o intermitentes vertidos a una red natural que presentan uno o varios causes, desembocando en un río principal o a su vez en un cause mayor (Minambiente, 2015, p.3).

1.3.8.Hidrólisis

Es una reacción que disocia el agua en H^+ y OH^- por la acción de sustancias que se combinan con una especie u otra; también se refiere a la reacción de los iones H^+ y OH^- del agua con los iones provenientes de ácidos y bases débiles en un proceso de equilibrio (Mendoza et al., 2017, p.52).

1.3.9. Pedometría

Es el estudio de la génesis y distribución del suelo utilizando métodos cuantitativos (Odeh y McBratney, 2005, p.33).

1.3.10. Funciones de edafotransferencia

Uso de datos generales del suelo en información útil y específica, empleando métodos matemáticos y correlaciones; dichas funciones pueden predecir diferentes propiedades complejas o costosas del suelo, utilizando como base otras propiedades que son sencillas de medir y económicamente accesibles (Odeh y McBratney, 2005, p.33).

1.3.11. Aluminio Intercambiable

El aluminio intercambiable (Al^{+3}) es considerado como uno de los factores primordiales para el aumento de la acidez en las soluciones del suelo; los iones del aluminio intercambiable son trasladados desde los suelos arcillosos por otros cationes, mediante la hidrólisis, esto para formar complejos hidroxialumínicos (Bernier y Alfaro, 2006, p.14).

1.3.12. Índice de Geo-acumulación

Es el estudio de metales pesados en suelos, utilizando diversas técnicas de normalización geoquímica, con la ayuda de estas técnicas se puede comprender tanto los factores de enriquecimiento como el índice de geo-acumulación, es decir permite conocer cuan contaminado está el suelo por la acumulación de metales (Águila et al., 2005, p.50).

1.3.13. Biomarcador

Son aquellos organismos o comunidades en los que su desarrollo, reacciones y funcionamiento dependen del medio en el que se desenvuelven y cambian al modificarse las condiciones ambientales, por ende, un biomarcador puede ser un grupo de especies animales, vegetales o microorganismos, que presentan un rango estrecho de tolerancia a uno o varios factores ambientales que pueden tener origen biótico o abiótico (Silbergeld et al., 1971, p.143).

1.3.14. Lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Especie vegetal sensible a diferentes compuestos químicos que afectan al ambiente, permitiendo evaluar los efectos de estas sustancias en la germinación y el crecimiento del vegetal principalmente, entre los biomarcadores vegetales más utilizados tenemos: el berro, rábano, col china, la cebada, el guisante y la lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Leanne et al., 2021, p.63).

1.3.15. Índice de Germinación

Corresponde al producto de la germinación relativa de las semillas, denotado por el crecimiento relativo de su radícula; los resultados obtenidos expresan el porcentaje del crecimiento de las raíces y el porcentaje de germinación de las semillas (Rodríguez et al., 2014, p.10).

1.3.16. Dosis letal media (DL50)

Define el grado de toxicidad de una sustancia, este parámetro se determina mediante análisis de regresión entre las dosis establecidas y el poder germinativo, la elongación de la radicular e hipocótilo (Ángeles et al., 2013, p.92).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación que se va a desarrollar en la presente tesis es de tipo experimental. Es experimental ya que la información que se obtiene es ejecutada por el investigador, este tiene alcances explicativos y correlacionales, ya que en este se manipula una o diversas variables con el fin de detallar la causa por la cual se ocasiona un suceso en particular (Hernández et al., 2010, p.46).

2.2. Identificación de variables e hipótesis

A continuación, se realiza la descripción de cada una de las variables que se van a analizar en función de los objetivos propuestos de la presente investigación:

Tabla 1-2: Descripción e identificación de las variables de estudio

Objetivos	Variables	Preguntas de Investigación
Objetivo general: Evaluar el comportamiento del aluminio en suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche.	VI: Suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares. VD: Concentración de Al ³⁺ .	<i>H0</i> : El comportamiento de la concentración Al ³⁺ no varía en función de los suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche. <i>Hi</i> : El comportamiento de la concentración Al ³⁺ varía en función de los suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche.
Objetivo específico 1: Determinar la toxicidad del suelo debido a la concentración de aluminio en función del biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L.	VI: Toxicidad del Al ³⁺ . VD: Biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L.	<i>H0</i> : El biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L. no se ve afectado por las diferentes concentraciones de aluminio empleadas. <i>Hi</i> : El biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L. se ve afectado por las diferentes concentraciones de aluminio empleadas.
Objetivo específico 2: Valorar el índice de geo-acumulación y el factor de enriquecimiento del aluminio intercambiable en la zona de estudio.	VI: Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento. VD: Concentración de Al ³⁺ .	<i>H0</i> : La concentración de Al ³⁺ de la zona no permite valorar el índice de geo-acumulación y el factor de enriquecimiento. <i>Hi</i> : La concentración de Al ³⁺ de la zona permite valorar el índice de geo-acumulación y el factor de enriquecimiento.

<p>Objetivo específico 3: Establecer los principales factores fisicoquímicos que ocasionan la acidez del suelo a partir de la concentración de aluminio intercambiable.</p>	<p>VI: Factores fisicoquímicos-químicos (humedad, pH, MO, CE y CIC). VD: Acidez del suelo.</p>	<p><i>H0</i>: La acidez del suelo no se ve influenciada por los factores fisicoquímicos de la zona de estudio. <i>Hi</i>: La acidez del suelo se ve influenciada por los factores fisicoquímicos de la zona de estudio.</p>
---	--	---

MO=Materia orgánica; CE=Conductividad eléctrica; CIC=Capacidad de intercambio catiónico.

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

2.3. Ubicación del área de estudio

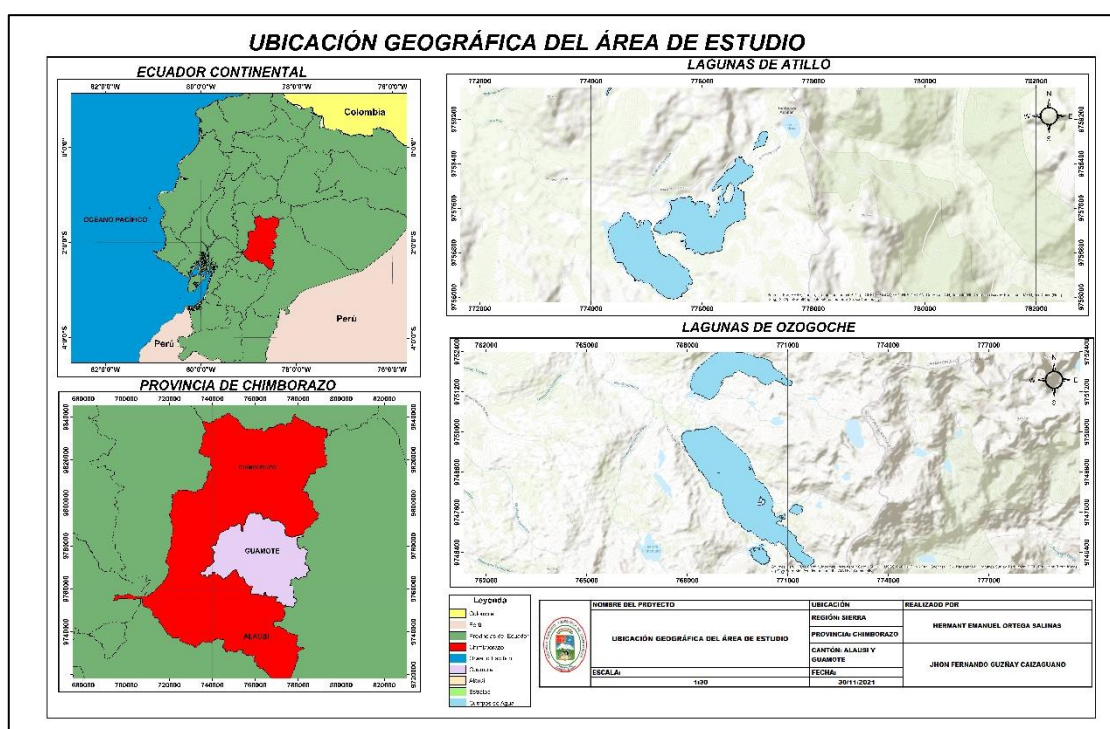


Gráfico 1-2. Mapa temático del área de estudio

Realizado por: (Guzñay J.y Ortega H., 2021).

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en los cantones de Guamote y Alausí, donde se encuentran ubicados las parroquias rurales de Cebadas y Achupallas, a las cuales pertenecen los sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogоче respectivamente (GAD municipal del cantón Guamote, 2019, p.12; Gobierno autónomo descentralizado del cantón Alausí, 2014, p.10).

La parroquia Cebadas, ubicada en el cantón Guamote, a 35 Km del cantón Riobamba; conforma un territorio de 570.78 Km² lo que la hace la segunda parroquia más grande de la provincia de Chimborazo. La altitud en la cual se encuentra esta zona está entre los 2.600 a 4.640 m.s.n.m., dispone de una temperatura media anual de 13.7 °C, presenta dos tipos de climas: invierno

húmedo frío en los meses de octubre a mayo y verano seco, ventoso, cálido en los meses de junio a septiembre; además presenta una precipitación de 681 mm, una humedad relativa del 96.8% y una nubosidad de 3.1 horas/día, según los datos ofrecidos por INAMHI 2014 (Gobierno Autónomo Descentralizado de Cebadas, 2015, p.17).

Esta parroquia rural tiene una topografía irregular gracias a la influencia de las cordilleras Occidental y Central de los Andes, en la parroquia la mayoría de los territorios presentan pronunciadas pendientes, las cuales pueden exceder los 50 grados de pendiente, los territorios los cuales son habitados tienen una inclinación mayor a los 15 grados; la precipitación y las pendientes pronunciadas son la principal causa de erosión de los suelos (Gobierno Autónomo Descentralizado de Cebadas, 2015, p.19).

La comunidad de Atillo se encuentra ubicada a más de 3600 msnm, lo que la define como una zona de alto paramo y además forma parte de la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Sangay; al norte limita con la intersección de los Ozogoches y Atillo; hacia el sur con el pueblo Ucsa Urco y la Laguna Negra; hacia el este con las comunidades Shililí y Topanacún, y finalmente al oeste con el afluente Ozogoches (Bastidas, 2002, p.45).

La parroquia de Achupallas se encuentra ubicada al centro del Ecuador, limitando al norte con Guamote; al sur con Chunchi; al este con la provincia de Morona Santiago y al sur con Guasuntos y Pumallacta, presenta una elevación de 1031 msnm en su parte inferior correspondiente a Guangra, mientras que, en su parte superior, perteneciente a Ozogoches, se registran una elevación de 4670 msnm (GAD Parroquial Rural de Achupallas, 2019, p.14).

Dentro de esta parroquia rural se encuentran las comunidades de Ozogoches alto y bajo, que presentan un clima frío en la parte sur y este, hasta llegar a templado en la zona central; de manera general la temperatura no varía significativamente y oscila en un rango promedio de 9°C y 16°C, por lo que es posible identificar una gran biodiversidad que se ve favorecido por las corrientes de la cordillera Andina; esta zona presenta una precipitación anual de 500 a 3000 mm, la cual llega acompañada de una humedad promedio entre el 10 y el 20 % (GAD Parroquial Rural de Achupallas, 2019, p.16).

2.3.1. Ubicación Geográfica

La ubicación geográfica detallada a continuación corresponde a las coordenadas UTM, Zona 17S y Datum WGS 84. Cabe recalcar que para determinar dichas coordenadas se utilizó el software ArcMap 10.3.

❖ Atillo

Tabla 2-2: Ubicación Geográfica y elevación de Atillo

Distancia Angular	Coordenada	Altura
Latitud (X)	770905,807	3495 msnm
Longitud (Y)	9759448,231	3495 msnm

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

❖ Ozogoche

Tabla 3-2: Ubicación Geográfica y elevación de Ozogoche

Distancia Angular	Coordenada	Altura
Latitud (X)	767667,250	3774 msnm
Longitud (Y)	9751511,225	3774 msnm

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

2.3.2. Preparación y sistematización de las muestras en el laboratorio

En esta etapa se realizó el proceso de secado y tamizado de cada una de las muestras, así como también, su clasificación en función de cada microcuenca, punto y profundidad. Todo esto previo al análisis correspondiente.

2.4. Etapas de la investigación

2.4.1. Determinación de la concentración de aluminio

2.4.1.1. Obtención del extracto de suelo

❖ Materiales y equipos:

- Piseta
- Agua doblemente destilada
- Frascos de muestras
- Balones aforados de 25 y 50 mL
- Matraz Erlenmeyer de 100 y 1000 mL
- Papel filtro de 5.5 cm de diámetro
- Embudo Büchner de 6 cm de diámetro
- Kitasato

- Micropipeta de 1 mL
- Espectrofotómetro de absorción atómica
- Estufa
- Balanza analítica
- Motor eléctrico

❖ **Reactivos:**

Cloruro de potasio (KCl) 1M: La preparación se realiza disolviendo 74,56 g de KCl a 500 mL de agua doblemente destilada, en un Erlenmeyer de 1L, a continuación, se afora el volumen a 1000 mL (McKean, 1993, p.51; Salinas y García Ramiro, 1979, p.62).

Yoduro de potasio (KI). Disolver 10 gramos en 100 mL de agua ultra pura en un Erlenmeyer (McKean, 1993, p.51; Salinas y García Ramiro, 1979, p.62).

❖ **Procedimiento**

1. Pesar 5 gramos de la muestra de suelo.
2. Agregar el suelo previamente pesado a un frasco de muestras con su respectiva tapa.
3. En un balón aforado de 25 mL aforar la solución de KCl 1 M.
4. Añadir los 25 mL de KCl al frasco de muestras.
5. Tapar el frasco y agitar durante 10 minutos.
6. Introducir el papel filtro en el embudo Büchner y con la ayuda de una bomba filtrar al vacío en un Kitasato.
7. Al momento de filtrar realizar un lavado del suelo para incrementar la eficiencia de la extracción.
8. Colocar el extracto de suelo obtenido en un recipiente debidamente etiquetado y agregar 1 mL de la solución de KI.

El extracto obtenido permitirá determinar la concentración de aluminio intercambiable (Al^{3+}) en cada una de las muestras de suelo (Carrillo y Gómez, 1976, p.84).

2.4.1.2. Determinación

La determinación se realizó por Espectroscopia de Absorción Atómica (E. A. A.) empleando el equipo Thermo Fisher Scientific, con lámpara de cátodo hueco de aluminio (Al) y el análisis se hizo con llama de óxido nitroso-acetileno en condiciones óptimas, y los estándares que se prepararon fueron de 5, 10, 20, 30 y 50 ppm, con los cuales se armó la curva de calibración; cabe

recaltar que los estándares de Al deben tener el mismo tratamiento que los extractos de suelo que se van a analizar (Carrillo y Gómez, 1976, p.87).

2.4.1.3. Evaluación del comportamiento del aluminio

Se empleó un análisis intercuartiles para evaluar el comportamiento del aluminio intercambiable, además se aplicó un diagrama de cajas para identificar la variabilidad de los datos obtenidos y si existían o no datos anómalos. Este proceso se llevó a cabo con la ayuda del software RStudio. Como complemento se utilizó los sistemas de información geográfica (SIG) para generar los mapas de la distribución de los diferentes cuartiles, tanto en Atillo como en Ozogoche. Este proceso se llevó a cabo en el software ArcMap 10.3.

*2.4.2. Ensayo toxicológico del Aluminio en el biomarcador *Lactuca sativa* L.*

En el siguiente ensayo toxicológico se determinó el índice de Germinación y la Dosis letal media (DL50, evaluando la toxicidad del aluminio en el biomarcador seleccionado, tal y como se detalla a continuación:

Según Demanet (2017, p.3) la concentración de aluminio en las plantas debe ser menor a 200 mg/L (ppm), esto para que su desarrollo natural no se vea afectado; por lo que se tomó en cuenta dos concentraciones hacia arriba y dos hacia abajo de este valor. Por lo tanto, se aplicaron 5 dosis de 40, 100, 200, 300 y 400 ppm (mg/L), las cuales serán distribuidas a las semillas de nuestro biomarcador.

2.4.2.1. Materiales, equipos y organismos de prueba.

❖ **Materiales**

- Cajas Petri de 100 mm de diámetro
- Matraces aforados de 50 mL
- Pipetas volumétricas de 1, 2, 5 y 10 mL
- Pie de rey
- Pinzas
- Toallas de papel
- Bolsas plásticas
- Papel aluminio

❖ **Equipo**

- Incubadora a temperatura controlada (22 ± 2 °C).

❖ **Organismos de prueba**

En este ensayo se usan semillas de lechuga de las especies *Lactuca sativa* L, de la variedad “Mac”.

❖ **Obtención, control y conservación de las semillas**

La obtención de las semillas de lechuga se realizó en semilleras locales de la ciudad de Riobamba, procurando que sean semillas sin fungicidas o plaguicidas, con buen poder germinativo y baja variabilidad en la elongación del hipocotilo y la radícula. Además, antes de ser sometidas al bioensayo fueron desinfectadas.

2.4.2.2. *Preparación de las concentraciones de aluminio*

Se prepararon 5 concentraciones diferentes de aluminio las cuales se distribuyeron a 20 semillas respectivamente, además de un blanco que será utilizado como testigo. El cálculo empleado para realizar las distintas concentraciones es la fórmula correspondiente a las diluciones utilizado por el libro Química Analítica de Skoog et al., (2000).

Fórmula de Dilución:

$$C1.V1 = C2.V2 \quad \text{(Ec.1-2)}$$

Donde:

- **C1:** Es la concentración conocida. En nuestro caso 1000 ppm
- **V1:** Es el volumen que necesitamos extraer para llegar a la concentración deseada
- **C2:** Es la concentración a la que queremos llegar: 40, 100, 200, 300 y 400 ppm
- **V2:** Es el volumen conocido al que vamos a aforar: 50 mL

De la fórmula despejamos el V1 y tenemos:

$$V1 = (C2.V2) / C1 \quad \text{(Ec.2-2)}$$

Esta última será utilizada para los cálculos correspondientes.

2.4.2.3. Esquema del bioensayo

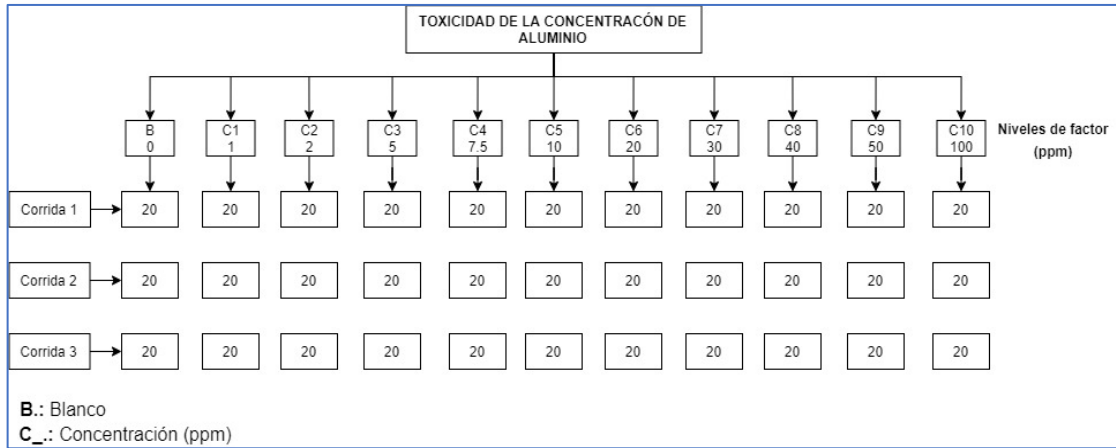


Figura 1-2. Bioensayo de toxicidad de la concentración de aluminio

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

2.4.2.4. Procedimiento de la prueba toxicológica

Se colocan 20 semillas de *Lactuca sativa* L. de la variedad "Mac", en cajas Petri de 100 mm de diámetro sobre papel filtro de 90 mm de diámetro, en cada caja Petri debidamente rotulada con la fecha, hora y la concentración; se aplicó 5 mL de una disolución del estándar de aluminio en función de las concentraciones establecidas, todos los bioensayos se realizaron por triplicado; las cajas se sellaron con papel aluminio para evitar la pérdida de humedad y se mantuvieron en oscuridad durante 120 h a 22 °C. Las semillas germinadas en las cajas de Petri con 5 mL de agua destilada se consideran como testigo (Ramírez y Cantú, 2008, p.7). Transcurrido el tiempo de exposición se contabilizó el número de semillas germinadas, para realizar las comparaciones adecuadas, donde los resultados obtenidos se expresaron como el porcentaje de la germinación relativa de semillas (GRS), el crecimiento relativo de la radícula (CRR), el índice de germinación (IG) y Dosis letal media (DL₅₀) (Ramírez y Cantú, 2008, p.7).

2.4.2.5. Índice de germinación

La evaluación del crecimiento de las plántulas de *Lactuca sativa* L., bajo el efecto de cada una de las concentraciones aplicadas se efectuó mediante la medición de la longitud de la radícula de las plántulas, donde finalmente, para realizar las comparaciones necesarias, los resultados obtenidos se expresaron como el porcentaje de la germinación relativa de semillas (GRS), el crecimiento

relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG) de acuerdo con Rodríguez et al.(2014, p.9), mediante las siguientes expresiones:

$$GRS(\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas con la muestra problema}}{\text{Número de semillas germinadas en el agua destilada}} * 100 \quad (\text{Ec.3-2})$$

$$CRR(\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula con la muestra problema}}{\text{Longitud promedio de la radícula en agua destilada (testigo)}} * 100 \quad (\text{Ec.4-2})$$

$$IG(\%) = \frac{GRS * CRR}{100} \quad (\text{Ec.5-2})$$

Debemos tener en cuenta que el IG corresponde al producto de la germinación relativa de las semillas, denotado por el crecimiento relativo de su radícula; los resultados obtenidos expresan el porcentaje del crecimiento de las raíces y el porcentaje de germinación de las semillas, que se alcanza durante el desarrollo de este bioensayo (Rodríguez et al., 2014, p.10).

2.4.2.6. Dosis letal media DL_{50}

Un parámetro toxicológico de suma importancia para definir el grado de toxicidad de una sustancia lo constituye la denominada dosis letal media (DL_{50}), este parámetro se determinó mediante análisis de regresión entre las dosis establecidas y el poder germinativo, la elongación de la radicular e hipocotilo; en este caso la variable independiente (x) son las cinco concentraciones del estándar de aluminio que se van a aplicar, y las variables dependientes corresponden al porcentaje de mortalidad obtenida a partir de la germinación de las semillas (Ángeles et al., 2013, p.92).

Para ello se empleó la herramienta Excel donde se realizó una tabla detallada de la concentración y el porcentaje de mortalidad. A continuación, se exportó la tabla al Software RStudio donde se desarrolló la parte estadística utilizando el método de curva Probit.

2.4.2.7. Curva Probit

La curva Probit es un método para calcular la DL_{50} , en este caso se realizará mediante el software RStudio; este tipo de pruebas son las más comunes para identificar la toxicidad aguda de un contaminante y según Corpus (2018, p.67), es necesario identificar los siguientes componentes:

$$p = \left(\frac{r}{n}\right) x 100 \quad (\text{Ec.6-2})$$

Donde:

p: Porcentaje de efecto

n: Número de individuos

r: Número de organismos muertos o afectados

2.4.3. Incidencia de variables fisicoquímicos y químicos en la concentración de Al^{+3}

Para la identificación de la incidencia de las variables fisicoquímicas y químicas más importantes en el aluminio intercambiable se utilizó los resultados de humedad, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico de las muestras de suelo recolectadas y procesadas por el GIDAC, de las zonas lacustres y valles periglaciares de Atillo y Ozogoché entre el año 2020 y 2021; dentro de la parte estadística se aplicó un análisis del coeficiente de correlación entre estos factores y la concentración de Aluminio Intercambiable, en el software RStudio.

2.4.4. Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento

En este apartado se aplicaron las fórmulas correspondientes al índice de geo-acumulación y al grado de enriquecimiento donde el elemento de referencia utilizado para los cálculos fue el Hierro (Fe), debido a su gran abundancia en la corteza terrestre (Aguila et al., 2005, p52).

2.4.4.1. Índice de geo-acumulación

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right) \quad (\text{Ec.7-2})$$

Donde:

C_n: Concentración de aluminio intercambiable

B_n: Concentración geoquímica del Al = 30 ppm

1,5: Factor de corrección de efectos litogénicos

2.4.4.2. Factor de enriquecimiento

$$FE = \frac{\left(\frac{X}{Y}\right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{X}{Y}\right)_{\text{fondo}}} \quad (\text{Ec.8-2})$$

Donde:

$X_{muestra}$: Concentración de Al^{+3} en las muestras

$Y_{muestra}$: Concentración de Fe en las muestras

X_{fondo} : Concentración de Al^{+3} en la corteza terrestre

Y_{fondo} : Concentración de Fe en la corteza terrestre

Cabe recalcar que estas fórmulas fueron aplicadas a los resultados obtenidos de las 100 muestras analizadas.

2.5. Selección de Test estadísticos

Los análisis estadísticos aplicados fueron seleccionaron a partir de los objetivos propuestos y sus respectivas hipótesis, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-2: Análisis estadísticos aplicados en función de las variables e hipótesis

Objetivos	Variables	Hipótesis	Estadístico
Objetivo general	VI: Suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares. VD: Concentración de Al^{3+} .	<i>H0</i> : El comportamiento de la concentración Al^{3+} no varía en función de los suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche. <i>Hi</i> : El comportamiento de la concentración Al^{3+} varía en función de los suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche.	Análisis Intercuartiles
Objetivo específico 1	VI: Toxicidad del Al^{3+} . VD: Biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L.	<i>H0</i> : El biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L. no se ve afectado por las diferentes concentraciones de aluminio empleadas. <i>Hi</i> : El biomarcador <i>Lactuca sativa</i> L. se ve afectado por las diferentes concentraciones de aluminio empleadas.	DL50 mediante curva Probit.
Objetivo específico 2	VI: Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento. VD: Concentración de Al^{+3} .	<i>H0</i> : La concentración de Al^{+3} de la zona no permite valorar el índice de geo-acumulación y el factor de enriquecimiento. <i>Hi</i> : La concentración de Al^{+3} de la zona permite valorar el índice de geo-	Fórmula del índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento.

		acumulación y el factor de enriquecimiento.	
Objetivo específico 3	VI: Factores fisicoquímicos-químicos (humedad, pH, MO, CE y CIC). VD: Acidez del suelo.	<i>H0</i> : La acidez del suelo no se ve influenciada por los factores fisicoquímicos de la zona de estudio. <i>Hi</i> : La acidez del suelo se ve influenciada por los factores fisicoquímicos de la zona de estudio.	Análisis del coeficiente de correlación.

MO=Materia orgánica; **CE**=Conductividad eléctrica; **CIC**=Capacidad de intercambio catiónico.

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Análisis intercuartiles del comportamiento del aluminio

El comportamiento del aluminio intercambiable en los suelos lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche se describe en el siguiente diagrama de análisis intercuartiles (diagrama de cajas):

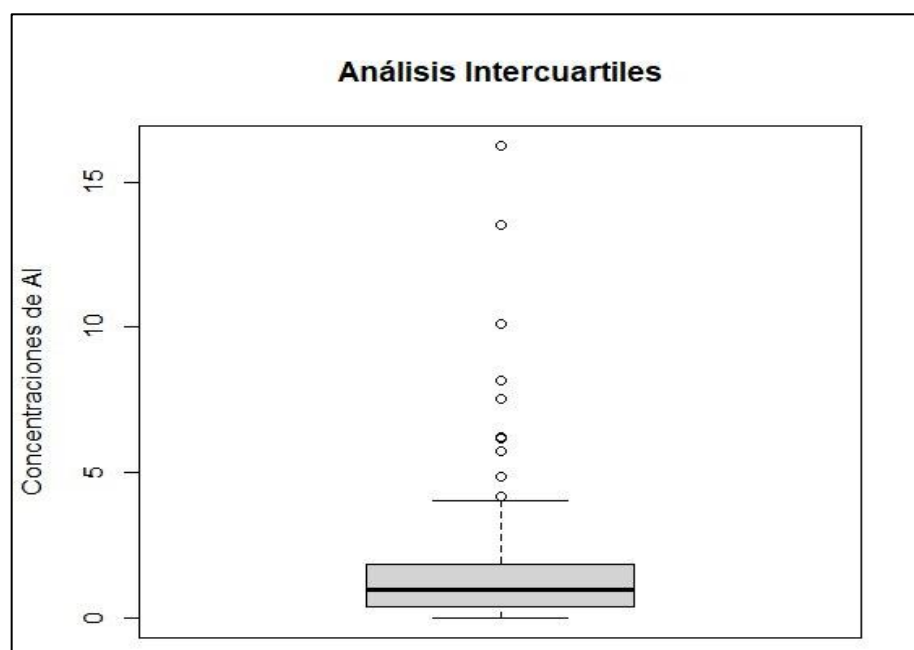


Gráfico 1-3. Análisis intercuartiles del comportamiento del aluminio intercambiable

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

Tabla 1-3: Valores mínimos y máximos de la concentración de Al^{3+}

Concentración Min [ppm]	Mediana [ppm]	Media [ppm]	Concentración Max [ppm]	Desviación Estándar
0.007	1.000	1.742	16.264	2.643

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

La concentración de aluminio en la zona de estudio presenta un valor mínimo y máximo de 0,007 ppm y 16.264 ppm, respectivamente. Este conjunto de datos presenta una mediana de 1 ppm, con una media de 1.74 ppm y que presenta una dispersión en los datos de 2.64, que se ve reflejado en su desviación estándar.

La gráfica 1-3 divide al comportamiento del aluminio en cuatro secciones mediante tres cuartiles denominados: Q1, Q2 y Q3; los cuales subdividen la concentración de aluminio en diferentes rangos como se indica en la tabla 2-3. La línea en negrillas que divide al rectángulo corresponde a la mediana de la concentración de aluminio intercambiable, que en este caso es 1 ppm. El conjunto de datos de la concentración presenta una distribución asimétrica positiva, ya que la mediana corta la caja en dos partes desiguales y la parte más larga del rectángulo es la parte superior. En este caso, los datos se concentran en la parte inferior de la distribución y por ende la media es mayor que la mediana. El límite del cuartil superior está por debajo de la concentración establecida por Castellanos (2014, p.60), quien indica que concentraciones superiores a 5 ppm son tóxicos para cultivos tolerantes.

Tabla 2-3: Cuartiles y rangos de la concentración de Al^{3+} en la zona de estudio

Cuartiles	Valor	Rangos	Apreciación
Primer Cuartil (Q1)	0,39	0 - 0,39	Muy baja
		0,39 - 1	Baja
Segundo Cuartil (Q2)	1	1 - 1,84	Media
Tercer Cuartil (Q3)	1,84	1,84 - 4,02	Alta

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

En el gráfico 1-3 también podemos observar las concentraciones de Al^{3+} anómalas, que corresponden a valores superiores de 4.02 ppm, el cual es el límite superior del cuarto rango de clasificación intercuartiles. Estos datos si están por encima del límite establecido por Castellanos (2014, p.60), por ende, estos puntos si presentan toxicidad por aluminio intercambiable. En este análisis los valores anómalos son once y se los detalla a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 3-3: Valores anómalos en el comportamiento de la concentración de Al^{3+}

CÓDIGO	Al (ppm)	CUENCA	ALTITUD	LITOLOGIA	PROF
P6-3-30	13,5447	ATILLO	3430	Herbazal Inundable	0-30
P6-3-60	8,1668	ATILLO	3430	Herbazal Inundable	0-60
P8-2-30	4,1896	ATILLO	3485	Herbazal de Páramo	0-30
P10-4B-30	10,096	ATILLO	3496	Herbazal de Páramo	0-30
P13-2-60	6,2496	ATILLO	3444	Herbazal de Páramo	0-60
Z2-1-30	16,2637	OZOGOICHE	3775	Herbazal de Páramo	0-30
Z2-1-60	4,8737	OZOGOICHE	3775	Herbazal de Páramo	0-60
Z3-5-30	5,7234	OZOGOICHE	3767	Herbazal de Páramo	0-30
Z3-6-30	7,5594	OZOGOICHE	3774	Herbazal de Páramo	0-30
Z3-6-60	6,1855	OZOGOICHE	3774	Herbazal de Páramo	0-60
Z7-7-30	4,0546	OZOGOICHE	3725	Herbazal de Páramo	0-30

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H. 2021).

Mapa temático de la distribución de los cuatro intervalos identificados en la concentración de aluminio intercambiable correspondientes a los sistemas lacustres y valles periglaciales de la microcuenca de Atillo.

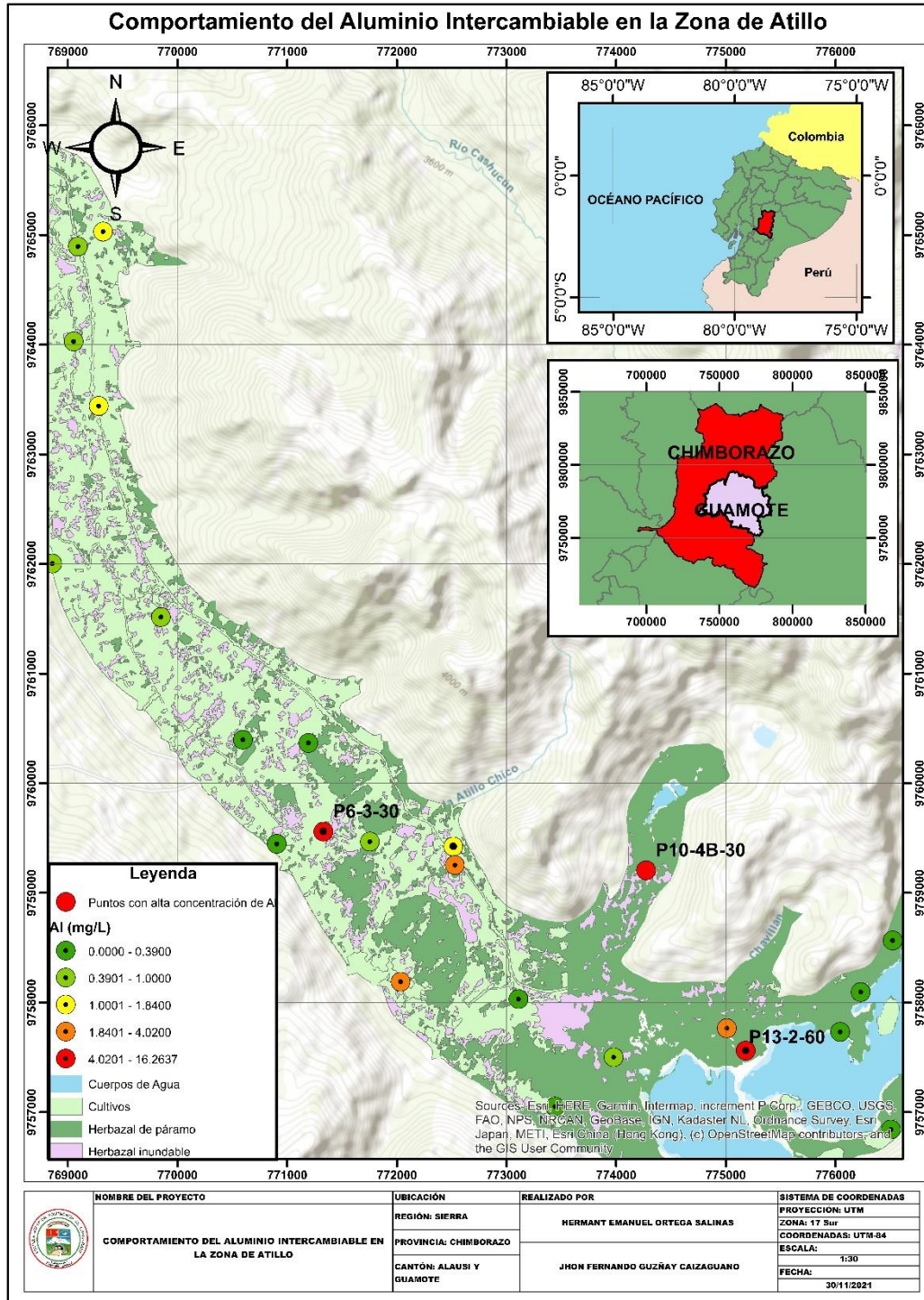


Gráfico 2-3. Distribución del comportamiento del aluminio intercambiable en la microcuenca de Atillo

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

Mapa temático de la distribución de los cuatro intervalos identificados en la concentración de aluminio intercambiable correspondientes a los sistemas lacustres y valles periglaciales de la microcuenca de Ozogoche.

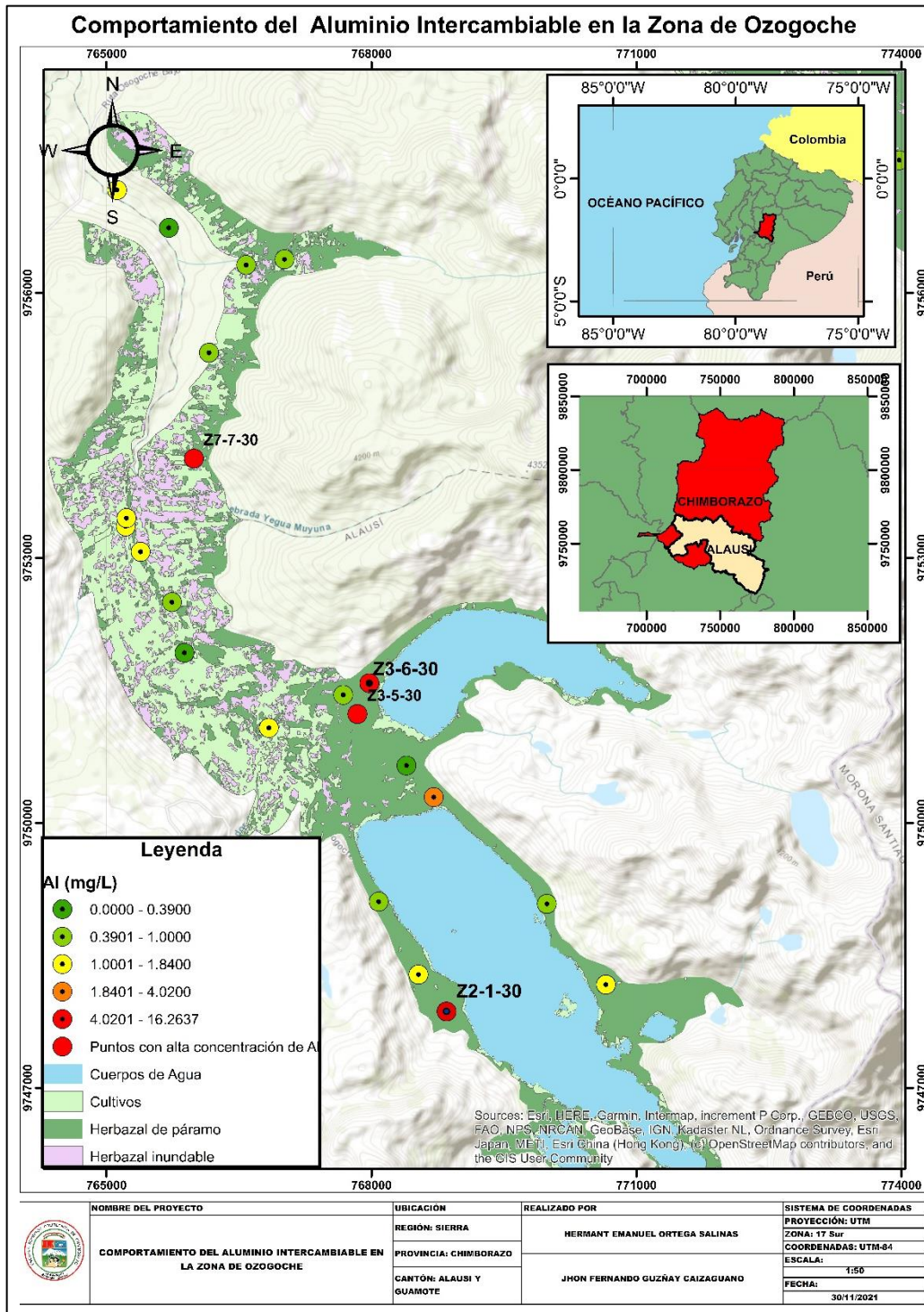


Gráfico 3-3. Distribución del comportamiento del aluminio intercambiable en la microcuenca de Ozogoche

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

En la zona de estudio se clasificó la concentración de Al^{3+} en cuatro categorías: muy baja, baja, media y alta, y a su vez se comparó con la litología de la zona de estudio.

Tabla 4-3: Clasificación de las concentraciones de Al^{3+} en función de la litología

Concentración de Al^{3+}	Rango [ppm]	Atillo	Ozogoche
Muy baja	0 a 0.39	Cultivos Herbazal de páramo	Herbazal de páramo Herbazal inundable
Baja	0.39 a 1	Cultivos Herbazal de páramo	Herbazal de páramo Herbazal inundable Cultivos
Media	1 a 1,84	Herbazal inundable Herbazal de páramo	Herbazal de páramo Herbazal inundable
Alta	1,84 a 4.02	Herbazal inundable	Herbazal de páramo
Anómalos	> 4.02	Herbazal inundable Herbazal de páramo	Herbazal de páramo

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

3.1.1. Atillo

En la microcuenca de Atillo se identifican concentraciones muy bajas de Al^{3+} en un rango de 0 a 0.39 ppm, principalmente en las zonas de cultivos y en menor proporción en la formación vegetal de herbazal de páramo. Dentro de las concentraciones bajas tenemos los usos de suelo correspondientes a cultivos, en menor proporción, y tomando más protagonismo el herbazal de páramo; se registra un rango de 0.39 a 1 ppm. La concentración media denota un intervalo de 1 a 1.84 ppm, destacando las formaciones de herbazal de páramo e inundable. Finalmente se registra una concentración alta de aluminio en el herbazal de páramo, donde se registra una concentración que va desde 1.84 a 4 ppm.

En este caso las concentraciones denominadas como anómalas están dentro de la formación vegetal herbazal inundable.

3.1.2. Ozogoche

Por otra parte, en la microcuenca de Ozogoche podemos observar concentraciones muy bajas en las zonas de herbazal de páramo e inundable, donde se percibe un rango de 0 a 0,39 ppm. Los herbazales de páramo e inundables junto con las zonas de cultivos son responsables de una concentración baja de Al^{3+} , donde se identifica el rango de 0,39 a 1 ppm. Una concentración media se puede reconocer en las formaciones vegetales de herbazal de páramo e inundable donde se

registra un rango de 1 a 1.84 ppm. Por último, tenemos una concentración alta, con un registro de 1.84 a 4 ppm, en la zona correspondiente al herbazal de páramo.

Las concentraciones anómalas de esta zona están distribuidas en la formación vegetal de herbazal de páramo.

3.1.3. Diagrama de cajas

Para verificar los resultados detallados anteriormente se realizó un análisis de diagrama de cajas como se muestra en el siguiente gráfico:

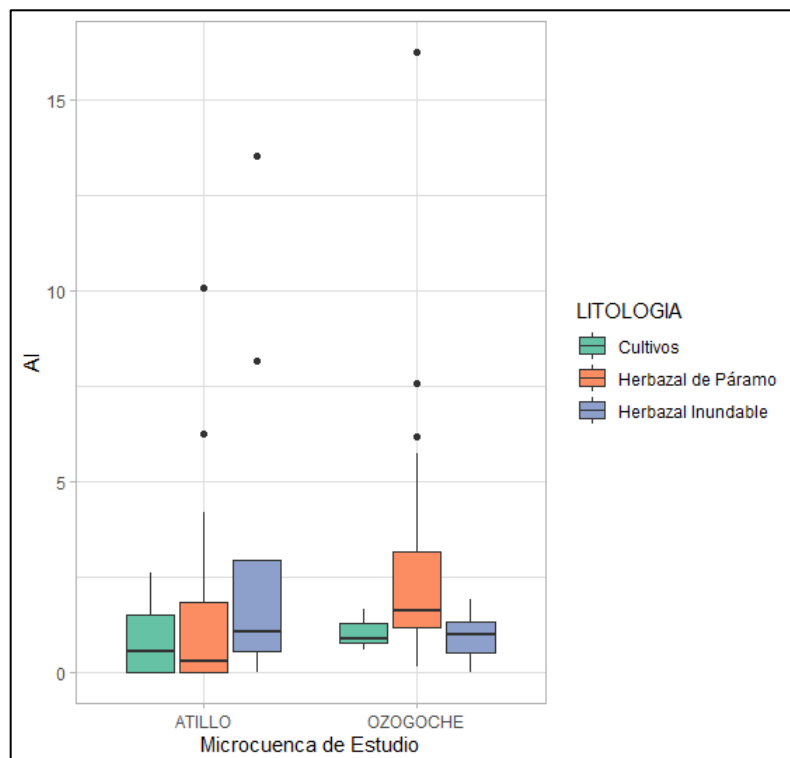


Gráfico 4-3. Diagrama de cajas de la concentración de Al³⁺ en función de la litología o uso de suelo

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

Como podemos observar, en la microcuenca de Attillo la concentración de Al³⁺ es mayor en el herbazal inundable, mientras que en Ozogoché esta situación se da en el herbazal de páramo. La menor concentración de aluminio intercambiable en las dos microcuencas se da en la litología de cultivos. Además, podemos observar los valores anómalos de concentración tanto en Attillo como en Ozogoché. Este gráfico coincide con los resultados obtenidos en el análisis del mapa temático de la litología y los diferentes rangos de concentración.

3.2. Bioensayo toxicológico

3.2.1. Preparación de las concentraciones

A continuación, se resume la preparación de las diferentes concentraciones de aluminio para la prueba de toxicidad. Cabe recalcar que el volumen de Al requerido para la preparación de las diferentes concentraciones se obtuvo a partir de las diluciones descritas en la metodología de este documento.

Tabla 5-3: Volumen de agua y estándar de aluminio utilizados para la preparación de las diferentes concentraciones

Bioensayo	Concentración [ppm]	Volumen de Al [mL]	Volumen de H2O [mL]
Blanco	0	0,000	50,000
I	1	0,050	49,950
II	2	0,100	49,900
III	5	0,250	49,750
IV	7.5	0,375	49,625
V	10	0,500	49,500
VI	20	1,000	49,000
VII	30	1,500	48,500
VIII	40	2,000	48,000
IX	50	2,500	47,500
X	100	5,000	45,000

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

Las concentraciones iniciales de 200, 300 y 400 ppm planteadas al inicio de la prueba no fueron tomadas en cuenta ya que en ninguno de los tres casos se dio la germinación de las semillas de *Latuca sativa* L. En el caso de los 100 ppm la germinación fue mínima por lo que si se tomó en cuenta para el análisis. Esto es importante ya que en cierto modo concuerda con lo expuesto por Demanet (2017, p.76), quien indica que concentraciones superiores a 200 ppm son perjudiciales para el correcto desarrollo de las plantas. Sin embargo, con una concentración de 100 ppm la germinación fue mínima, lo que indica que esta concentración ya es significativa y es capaz de interferir y detener la germinación de las semillas. Por esta razón se utilizaron concentraciones inferiores a 100 ppm, como se muestra en la tabla 5-3, con la finalidad de evaluar el presente bioensayo.

A continuación, se detallan las concentraciones utilizadas y los resultados obtenidos del bioensayo:

Tabla 6-3: GRS, CRR e IG obtenidos a partir del bioensayo

Concentración [ppm]	Semillas germinadas	Longitud promedio	GRS (%)	CRR (%)	IG (%)
Blanco	18,67	61,40	-	-	-
1	17,67	57,44	94,64	93,55	88,54
2	17,00	52,02	91,07	84,72	77,15
5	16,33	45,46	87,50	74,04	64,79
7,5	15,67	36,98	83,93	60,22	50,54
10	14,67	32,23	78,57	52,50	41,25
20	12,67	5,96	67,86	9,71	6,59
30	8,67	1,79	46,43	2,92	1,35
40	3,67	2,00	19,64	3,26	0,64
50	2,33	1,61	12,50	2,62	0,33
100	1,33	1,17	7,14	1,90	0,14

GRS= Porcentaje de germinación relativa de semillas; CRR= Crecimiento relativo de la radícula; IG= Índice de germinación

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

Con los datos resultantes se obtuvo el siguiente gráfico de comparación:

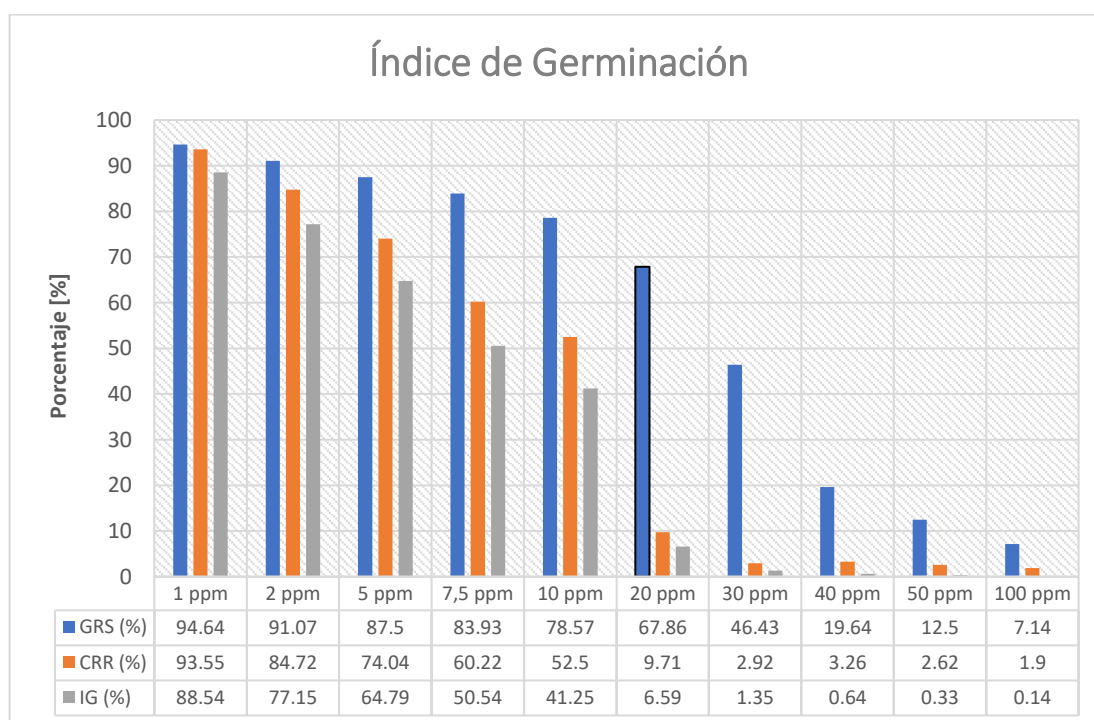


Gráfico 5-3. Comparación del GRS, CRR e IG con cada una de las concentraciones empleadas

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

3.2.2. Porcentaje de germinación relativa de semillas (GRS)

Para la GRS tenemos el mayor valor (94,64 %) en la concentración más baja de aluminio que corresponde a 1 ppm, mientras el valor más bajo (7,14 %) pertenece a la concentración de 100 ppm. Estos resultados indican que mientras mayor sea la concentración de aluminio, menor será la germinación relativa de las semillas.

3.2.3. *Crecimiento relativo de la radícula (CRR)*

El CRR presenta su valor máximo (93,55%) en la concentración de 1 ppm, lo que indica que una baja concentración de Al no afecta significativamente el crecimiento radicular; por otra parte, el valor mínimo (1,90%) corresponde a la concentración de 100 ppm; esto permite evidenciar que una alta concentración de Al afecta significativamente el desarrollo de las raíces, al igual que en la GRS.

3.2.4. *Índice de germinación (IG)*

Para este análisis se considerará cuatro concentraciones que describen el comportamiento de este índice. En primer lugar, tenemos la concentración mínima de 1 ppm que tiene un IG del 88,54 %, ya que un promedio de 18 semillas germinó, con una longitud media de la raíz de 57,44 mm. A continuación, tenemos la concentración máxima que corresponde a 100 ppm, que presenta un IG del 0,14 %, donde las semillas germinadas fue una y la elongación radicular promedio es de 1,17 mm. En tercer lugar, tenemos las concentraciones de 7,5 y 10 ppm donde se evidencia la transición del 50,54% al 41,25 % respectivamente, en este índice. Al igual que los valores de GRS y CRR el índice de germinación disminuye cuando aumenta la presencia de la concentración de aluminio, tal y como sucede en el estudio realizado por Rodríguez et al. (2014, p.4).

3.2.5. *Porcentaje de mortalidad*

A partir de los datos registrados en el índice de germinación se procedió a realizar el cálculo del porcentaje de mortalidad de cada una de las concentraciones utilizadas, tal y como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 7-3: Descripción del porcentaje de mortalidad de las semillas de *Lactuca sativa* L

Concentraciones [ppm]	Mortalidad [%]	Mortalidad [%]	Mortalidad [%]	Promedio M [%]
Placas	1	2	3	
Blanco	10	5	5	6,67
1	10	15	10	11,67
2	15	10	20	15,00
5	20	15	20	18,33
7,5	25	20	20	21,67
10	30	20	20	23,33
20	35	40	35	36,67
30	55	65	50	56,67
40	80	85	80	81,67
50	90	90	85	88,33
100	95	90	95	93,33

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

3.2.6. DL50

Partiendo de la tabla de mortalidad es posible obtener la siguiente gráfica que enfrenta el porcentaje de mortalidad y la concentración de aluminio intercambiable. Para este punto es necesario tener en cuenta que el bioensayo se realizó por triplicado y por ende tenemos 33 concentraciones y porcentajes de mortalidad, respectivamente.

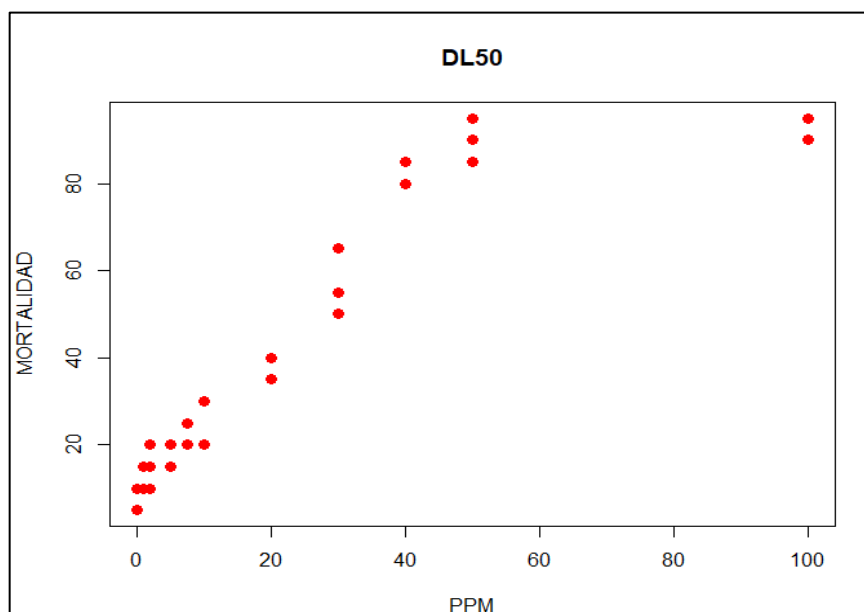


Gráfico 6-3. Grafica Mortalidad (%) vs Concentración de aluminio (ppm)

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

Mediante el modelo ajustado Log-Logistic es posible transformar los valores de la gráfica anterior a términos logarítmicos para de esta manera armar la curva Probit correspondiente a la DL50 del biomarcador *Latuca sativa* L.

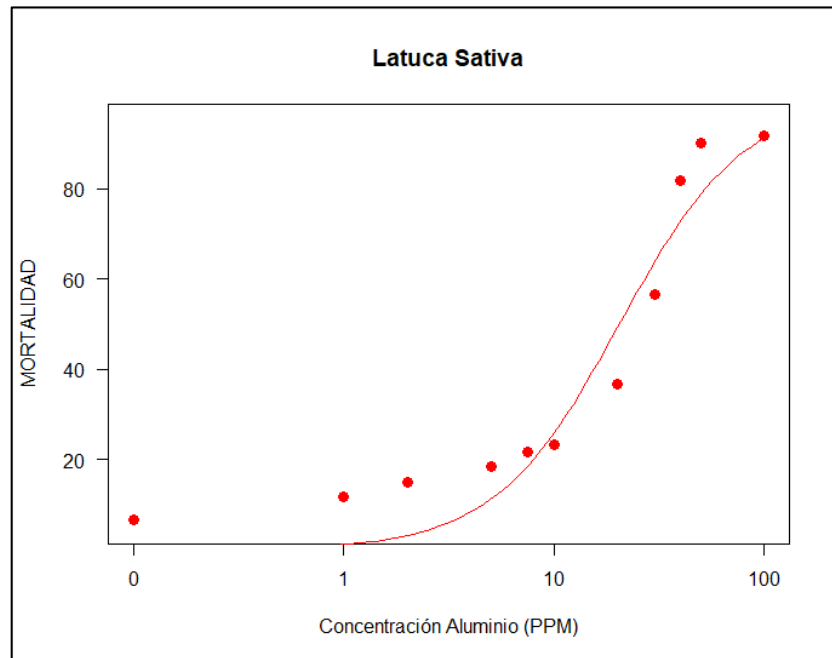


Gráfico 7-3. Curva Probit del biomarcador *Lactuca sativa* L.

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

La dosis letal media (DL50) correspondiente al porcentaje de mortalidad en el biomarcador *Lactuca sativa* L. sometido a diferentes concentraciones de aluminio es de 20,42 ppm, con un error de 1,52; siendo esta concentración la responsable de la inhibición en la germinación del 50 % de la población del bioensayo. El gráfico 7-3, indica que a medida que se va incrementando la concentración de aluminio, el porcentaje de mortalidad aumenta, es decir que estos factores tienen una relación directamente proporcional.

Al final se calcula los límites de confianza del modelo, tanto superior como inferior:

- Límite de confianza inferior: 17,31 ppm
- Límite de confianza superior: 23,54 ppm

La DL50 tiene un 95 % de probabilidad de que se encuentre en este intervalo.

3.3. Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento

Cabe recalcar que estas fórmulas fueron aplicadas a los resultados obtenidos de las 100 muestras analizadas.

Tabla 8-3: Índice de geo-acumulación y factor de enriquecimiento

	Índice de geo-acumulación [ppm]	Factor de enriquecimiento [ppm]
Media	-1,029	0,116

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

El índice de geo-acumulación presente en la zona de Atillo y Ozogoché tiene una media de -1,029, este valor es menor a 0 y según Águila et al. (2005, p.12) indican que el grado de contaminación corresponde a no contaminado; es decir que no existe una contaminación antrópica elevada en la zona. Con respecto al factor de enriquecimiento tenemos un valor medio de 0,116, que según la escala establecida por Águila et al. (2005, p.12) tiene un origen en su gran mayoría de la roca madre.

3.4. Análisis de correlación entre las variables fisicoquímicas y la concentración de Al

En la tabla 9-3 podemos observar las medias, la desviación estándar, los coeficientes de correlación y los intervalos de confianza de la comparación de la concentración de aluminio intercambiable y los diferentes factores fisicoquímicos de humedad, materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Donde se destaca la alta correlación que existe entre la concentración de Al^{+3} y la humedad (0,20); una media relación con la MO y CO (0.11), y una baja con la CE y CIC (-0,11 y -0,21). Además, se hace necesario mencionar la elevada correlación que tiene el CO con la MO (1.00), así como la humedad con la MO y CO (0.57).

Tabla 9-3: Análisis de correlación de la humedad, MO, CO, CE y CIC

Variable	M	SD	1	2	3	4	5
1. AL	1.74	2.64					
2. HUMEDAD	51.94	15.29	.20				
			[-.00, .38]				
3. MO	21.68	10.29	.11	.57**			
			[-.09, .30]	[.42, .69]			
4. CO	12.57	5.97	.11	.57**	1.00**		
			[-.09, .30]	[.42, .69]	[1.00, 1.00]		
5. CE	49.82	59.61	-.11	-.10	.04	.04	

			[-.30, .09]	[-.29, .10]	[-.16, .23]	[-.16, .23]	
6. CIC	10.32	7.00	-.21*	.13	.22*	.22*	.37**
			[-.39, -.01]	[-.07, .32]	[.02, .40]	[.02, .40]	[.19, .53]

MO=Materia orgánica; CO=Carbono Orgánico; CE=Conductividad eléctrica; CIC=Capacidad de intercambio catiónico.

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

M y SD representan la desviación estándar y media, respectivamente. Los valores entre corchetes indican el intervalo de confianza del 95% para cada correlación.

3.4.1. Coeficiente de correlación entre el pH y la concentración de Al^{3+}

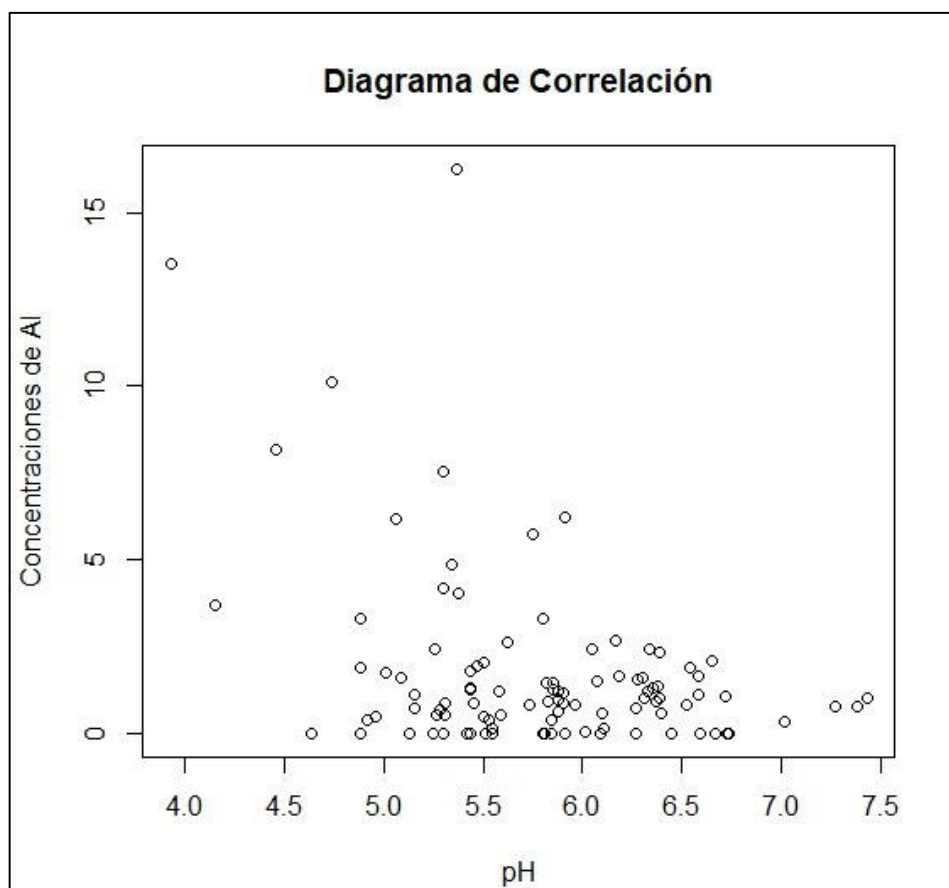


Gráfico 8-3. Distribución de la concentración de Al^{3+} y su correlación con el pH de Atillo y Ozogoche

Realizado por: (Guzñay J., Ortega H., 2021).

El coeficiente de correlación entre el pH de las 100 muestras analizadas y la concentración de aluminio Al^{3+} es de -0.378, su signo negativo indica que estos factores presentan una relación inversamente proporcional, es decir que, si aumenta la concentración de aluminio intercambiable,

disminuye el pH y viceversa. Por otra parte, el valor de este coeficiente es muy pequeño y poco significativo. Como se puede apreciar en el gráfico 9-3 los datos de la concentración de aluminio son inestables a un pH bajo, mientras que a medida que este parámetro químico aumenta dichos valores se van estabilizando.

El valor del coeficiente de correlación es similar al obtenido por Oliva (2009, p.6), donde determina la acidez intercambiable y cuyo resultado es de -0.566, en este caso el análisis es similar ya que el comportamiento del aluminio en los suelos volcánicos de la cuenca del pacífico del Salvador, Honduras y Nicaragua puede ser parecidos a los suelos de los sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoche.

Debido a que el coeficiente de correlación entre los factores de pH y la concentración de aluminio Al^{3+} es muy pequeño y poco significativo, no es posible realizar el factor de edafotransferencia planteado.

CONCLUSIONES

- La aplicación del bioensayo toxicológico en condiciones controladas de laboratorio, permitió identificar que las concentraciones de aluminio intercambiable en los suelos de Atillo y Ozogoché están muy por debajo de la dosis letal media (DL50) cuyo valor es de 20.42 ppm, siendo 4.02 ppm la concentración más alta registrada en el comportamiento natural de estas microcuencas, es decir que este elemento no tiene una repercusión significativa en estos andosoles; por otra parte los datos anómalos presentan una concentración promedio de 9 ppm que corresponde a la mortalidad del 25 % de los organismos de prueba, donde es necesario aplicar enmiendas calcáreas para neutralizar la acidez presente en estos suelos. En consecuencia, si un sistema edáfico es sometido a concentraciones significativas de Al^{+3} su eficiencia de germinación va a disminuir, interfiriendo en su desarrollo normal y afectando a la calidad del producto.
- A partir de la valorización del índice de geo-acumulación y el factor de enriquecimiento del aluminio intercambiable se identifica que los suelos de sistemas lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoché no presentan contaminación antrópica de aluminio intercambiable y que el origen de la mayoría de este elemento puede ser natural correspondiente a la roca madre, que coincide con suelos típicos de andosoles donde las concentraciones de este elemento no son altas.
- Los principales factores asociados a la acidez del suelo son la humedad, materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC); de los cuales la humedad presenta una mayor correlación con la acidez del suelo a partir de la concentración de Al^{3+} , mientras que los demás factores no tienen una incidencia significativa, debido a que su coeficiente de correlación es pequeño. Por lo tanto, las litologías de herbazal: inundable y de páramo, al presentar un elevado porcentaje de humedad, contiene una considerable concentración de aluminio intercambiable. Por otra parte, a pesar de que el pH bibliográficamente tenga una relación inversamente proporcional con la concentración de Al^{+3} , no es posible realizar una correlación adecuada ya que dicho coeficiente es poco significativo.
- El comportamiento del aluminio intercambiable en los suelos lacustres y valles periglaciares de las microcuencas de Atillo y Ozogoché está definido por cuatro rangos de concentración: muy baja (0.00 a 0.39 ppm), baja (0.39 a 1.00 ppm), media (1.00 a 1.84 ppm) y alta (1.84 a 4.02 ppm); los cuales permiten identificar la distribución de este elemento. La concentración de Al^{+3} en esta zona es baja, con un grado de variabilidad elevado, debido a las características propias del sector (tipo de suelo y mesurada actividad antrópica); sin embargo, también

encontramos zonas que presentan elevadas concentraciones donde se registra un comportamiento atípico de este elemento.

RECOMENDACIONES

Concluimos el presente estudio emitiendo las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio en las zonas donde se encontraron concentraciones de aluminio intercambiable anómalas, para identificar los factores que ocasionan este comportamiento.
- Se recomienda para futuras investigaciones analizar otros posibles parámetros como la excesiva precipitación, que alteren la concentración de aluminio en los suelos de las microcuencas de Atillo y Ozogoche.
- Replicar el bioensayo toxicológico aplicado en esta investigación con una variedad de lechuga que sea autóctona de nuestro país, para identificar si reacciona de la misma manera ante los diferentes contaminantes.
- Analizar la concentración de manganeso y hierro para identificar la relación que presentan con el aluminio intercambiable.
- Se recomienda utilizar el software RStudio para realizar los análisis estadísticos ya que tiene un lenguaje de programación abierto, libre y gratis que proporciona una variedad de técnicas estadísticas y gráficas.

BIBLIOGRAFÍA

ABRIL, N., BÁRCENA, A., FERNÁNDEZ, E., GALVÁN, A., JORRÍN, J., PEINADO, J., MELÉNDEZ, F. and TÚNEZ, I., 2017. Espectrofometría: *Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. [en línea]. [Consulta: 19 June 2021]. Recuperado de: https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf.

AGUILA, P., LUGO, J. and VACA, R., 2005. Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *Ciencia Ergo sum* [en línea], vol. 12, no. 2. [Consulta: 15 April 2021]. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/104/10412207.pdf>.

ALVARADO, C. and BARAHONA, M., 2017. Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *Scielo* [en línea], vol. 9, no. 1. [Consulta: 23 June 2021]. ISSN 1659-4266. Recuperado de: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cinn/v9n1/1659-4266-cinn-9-01-00023.pdf>.

ÁNGELES, A., VALENCIA, A.J., VIRGEN, G., RAMÍREZ, C., PAREDES, L. and HURTADO, S., 2013. Determinación de la dosis letal (DL 50) con Co 60 en vitroplántulas de *Agave tequilana* var. Azul. *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 36, no. 4.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DEL ALUMINIO, 2008. Aluminio y Salud. *European Aluminium Association* [en línea], vol. 51, no. 8. [Consulta: 27 July 2021]. Recuperado de: <https://www.asoc-aluminio.es/support/pdf/aluminio-medioambiente.pdf>.

ATSDR, 2008. Resumen de Salud Pública: Aluminio. *Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades* [en línea], vol. 5. [Consulta: 27 July 2021]. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs22.pdf.

BARONA, N., FERNÁNDEZ, B. and SALINAS, P., 2012. *Sedimentología y Estratigrafía (Trabajo de titulación) (Pregrado)* [en línea]. Ciudad de México-México: s.n. [Consulta: 20 April 2021]. Recuperado de: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/A4-Lacustre.pdf>.

BASTIDAS, C., 2002. *La comunidad de Atillo y la conservación de sus páramos: experiencias del plan de manejo*. En: ABYA-YALA (ed.) [en línea], 1. Recuperado de: <https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsre>

dir=1&article=1195&context=abya_yala#:~:text=La comunidad de Atillo está, manejo colectivo en el pasado.

BERNIER, R., and ALFARO, M., 2006. *Acidez de los Suelos y Efectos del Encalado*. [en línea]. [Consulta: 10 January 2022]. Recuperado de: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/7075/NR33824.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

BONDY, S., 2010. The neurotoxicity of environmental aluminum is still an issue. *Neurotoxicology* [en línea], vol. 31, no. 5. [Consulta: 27 July 2021]. ISSN 1872-9711. DOI 10.1016/J.NEURO.2010.05.009. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20553758/>.

CARRILLO, I. and GÓMEZ, A., 1976. Métodos de Yuan y espectrofotometría de absorción atómica. *Cenicafé* [en línea]. [Consulta: 16 November 2021]. Recuperado de: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/995/1/arc027%2801%2926-33.pdf>.

CASIERRA, F. and AGUILAR, O., 2018. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* [en línea], vol. 1, no. 2. [Consulta: 24 March 2021]. ISSN 2011-2173. DOI 10.17584/rcch.2007v1i2.8701. Recuperado de: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/8701.

CASTELLANOS, J., 2014. Manejo y Corrección de la Acidez de los Suelos. *Intagri* [en línea]. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/manejo-y-correccion-de-acidez-de-suelo>.

CHUKIWANKA, L., 2018. *Validación de un Método Analítico por Espectroscopía de Absorción Atómica para la Determinación de cobre, molibdeno y hierro en Muestras Geológicas (Trabajo de titulación) (Pregrado)* [en línea]. Arequipa-Perú: s.n. [Consulta: 20 June 2021]. Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5348/QUchqula.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CORPUS, A.M., 2018. *Determinación de la concentración letal media (CL 50-96) del aluminio mediante pruebas toxicológicas utilizando alevinos de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arco iris) (Trabajo de titulación) (Pregrado)* [en línea]. S.I. Recuperado de:

https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1510&context=ing_ambiental_sanitaria.

DEMANET, R., 2017. Aluminio Intercambiable. *Whatts* [en línea]. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: <https://consorciolechero.cl/industria-lactea/wp-content/uploads/2017/10/aluminio1.pdf>.

DOMÍNGUEZ, J., ROMÁN, A., PRIETO, F. and ACEVEDO, O., 2011. Evaluación de color en suelos del Cerro de Denganthza, *Municipio de Francisco I. Madero, Hidalgo*. [en línea], vol. 21, no. 4. [Consulta: 5 May 2021]. ISSN 0188-6266. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/416/41620852012.pdf>.

DUCHE, V. and LLUGSA, M., 2020. *Estimación de Carbono Orgánico Total en el Suelo y Biomasa del Páramo Andino de Yasipan y Atillo (Trabajo de titulación) (Pregrado)* [en línea]. Riobamba-Ecuador. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13956/1/156T0010.pdf>.

ESPINOSA, J. and MOLINA, E., 1999. *Acidez y Encalado de los Suelos* [en línea]. San José-Costa Rica: s.n. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez_y_encalado_de_suelos_libro_por_J_Espinosa_y_E_Molina.pdf.

FAO, 2009. *Guía para la descripción de suelos* [en línea]. 4. Roma-Italia: s.n. [Consulta: 4 May 2021]. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a0541s/A0541S.pdf>.

FAO, 2018. Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* [en línea]. [Consulta: 8 December 2021]. Recuperado de: <https://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/>.

GAD MUNICIPAL DEL CANTÓN GUAMOTE, 2019. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Guamote*. [en línea]. Riobamba-Ecuador: Recuperado de: <https://www.gadguamote.gob.ec/gadmc-g/plan-de-desarrollo1/pdot-guamote-2019-2023/3305-pdot-guamote-2019-2023/file.html>.

GAD PARROQUIAL RURAL DE ACHUPALLAS, 2019. *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Achupallas*. [en línea]. Riobamba-Ecuador: Recuperado de:

[http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660827410001_PLAN DE DESARROLLO Y ORDINAMIENTO TERRITORIAL PD Y OT DE LA PARROQUIA RURAL DE ACHUPALLAS_30-10-2015_11-10-59.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660827410001_PLAN_DE_DESARROLLO_Y_ORDINAMIENTO_TERRITORIAL_PD_Y_OT_DE_LA_PARROQUIA_RURAL_DE_ACHUPALLAS_30-10-2015_11-10-59.pdf).

GARCÍA, F. and MIRANDA, V., 2018. Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. *Universidad Autónoma de México* [en línea], vol. 2, no. 1. [Consulta: 26 April 2021]. Recuperado de: http://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177-García-Miranda.pdf.

GARCÍA, Y., RAMÍREZ, W. and SÁNCHEZ, S., 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso Soil quality indicators: A new way to evaluate this resource. *Pastos y Forrajes* [en línea], vol. 35, no. 2. [Consulta: 5 May 2021]. ISSN 0864-0394. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071001.pdf>.

GISBERT, J., IBÁÑEZ, S. and MORENO, S., 2015. *La Textura de un Suelo*. [en línea]. Valencia-España: [Consulta: 5 May 2021]. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7775/Textura.pdf>.

GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO DE CEBADAS, 2015. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial* [en línea]. Cebadas-Ecuador: s.n. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660818930001_PDyOT Consolidado_final_29-10-2015_22-51-49.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660818930001_PDyOT_Consolidado_final_29-10-2015_22-51-49.pdf).

GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO DEL CANTÓN ALAUSÍ, 2014. *Actualización Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Alausí*. [en línea]. Alausí-Ecuador: Recuperado de: https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/39127%0Ahttps://cris.brighton.ac.uk/ws/portalfiles/portal/4755978/Julius+Ojebode%27s+Thesis.pdf%0Ausir.salford.ac.uk/29369/1/Angela_Darvill_thesis_esubmission.pdf%0Ahttps://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/ha.

GONZÁLEZ, C., VALLARINO, A., PÉREZ, J.C. and LOW, A., 2014. Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental [en línea]. 1. Chiapas-México: *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. [Consulta: 8 December 2021]. ISBN 978-607-8429-05-9. Recuperado de: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Bioindicadores-Guardianes-de-nuestro-futuro-ambiental.pdf>.

GUZMÁN, R., CRUZ, O. and VALDÉS, R., 2019. Efectos de la contaminación por metales pesados en un suelo con uso agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* [en línea], vol. 28, no. 1. [Consulta: 15 April 2021]. ISSN 2071-0054. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v28n1/2071-0054-rcta-28-01-e04.pdf>.

HACH COMPANY, 2017. *¿Qué es la conductividad?* [en línea]. [Consulta: 23 June 2021]. Recuperado de: https://latam.hach.com/cms-portals/hach_mx/cms/documents/Que-s-la-conductividad-Final.pdf.

HEPP, C., 2019. Recuperación de Suelos Ácidos en la Patagonia. *INIA* [en línea], vol. 32. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/337047955_Recuperacion_de_suelos_acidos_en_la_Patagonia.

HOFSTEDE, R., CALLES, J., LOPEZ, V., POLANCO, R., TORRES, F., ULLOA, J., VÁZQUEZ, A. and CERRA, M., 2014. *Los Páramos Andinos ¿Qué Sabemos?* [en línea]. Quito-Ecuador: s.n. [Consulta: 24 June 2021]. ISBN 978-9978-9932-9-3. Recuperado de: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2014-025.pdf>.

IGNACIO, J., SAUCEDO, C., RICO, L., MÁEQUEZ, L. and SÁNCHEZ, M., 2018. *Biorrecuperación de suelo contaminado por 75,000 ppm de aceite residual automotriz y evaluado con *Lactuca sativa* como bioindicador.* , vol. 14, no. 1. Recuperado de: DOI doi.org/10.33154/rlrn.2018.01.002.

INTAGRI, 2013. El Aluminio y el Desarrollo Radical de los Cultivos. *Intagri* [en línea], vol. 2, no.2. [Consulta: 27 July 2021]. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/el-aluminio-y-el-desarrollo-radical-de-los-cultivos>.

INTAGRI, 2015. La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo. *Intagri* [en línea], vol. 1, no. 2. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo>.

INTAGRI, 2018. Disponibilidad de Nutrientes y el pH del Suelo. *Intagri* [en línea], vol. 113, . [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientes-y-el-ph-del-suelo>.

ISO, 2014. Identificación y Clasificación de Suelos. *Norma Técnica Ecuatoriana* [en línea]. 1. Quito-Ecuador: s.n.. [Consulta: 5 May 2021]. Recuperado de: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/n-te_inen_iso_14688_1.pdf.

LEANNE, U., MONTES, K. and DÍAZ, M., 2021. Evaluación de la fitotoxicidad de abonos orgánicos comerciales usando semillas *Evaluation of the phytotoxicity of commercial organic fertilizers using seeds of lettuce (Lactuca sativa L.) and cucumber (Cucumis sativus)*. , vol. 1, no. 2.

LEWIS, T.E., 1989. *Environmental chemistry and toxicology of aluminium* [en línea]. Michigan-Estados Unidos: Lewis Publishers. [Consulta: 27 July 2021]. Recuperado de: <https://ur.booksc.org/ireader/1474683>.

LÓPEZ, J., VÁSQUEZ, V., GÓMEZ, L. and PRIEGO, Á., 2010. Humedales. *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz* [en línea]. Ciudad de México-México: s.n.. [Consulta: 20 April 2021]. ISBN 9786079513160. Recuperado de: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/9655/09HUMEDALESB.pdf;jsessionid=BD47F2B8E4B6F9796955E27C8E5EB0?sequence=1>.

MARTÍNEZ, E., FUENTES, J. and ACEVEDO, E., 2008. Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. *Scielo* [en línea], vol. 8, no. 1. [Consulta: 5 May 2021]. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf>.

MCKEAN, S.J., 1993. *Manual de Análisis de Suelos y Tejido Vegetal* [en línea]. Cali-Colombia: CIAT. [Consulta: 26 July 2021]. Recuperado de: http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/S593.M2_Manual_de_análisis_de_suelos_y_tejido_vegetal_Una_guía_teórica_y_práctica_de_metodología.pdf.

MENDOZA, C., AGUILAR, A. and CAMPOS, D., 2017. Hidrólisis química y enzimática de extracto de yacón para la producción de fructosa. *Sociedad Química del Perú* [en línea], vol. 83, no. 2. [Consulta: 26 April 2021]. ISSN 1810-634X. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3719/371952416007.pdf>.

MINAMBIENTE, 2015. *Microcuenca*. [en línea]. [Consulta: 26 April 2021]. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/planificacion-de-cuencas-hidrograficas/microcuenca>.

MINASNY, B., MALONE, B., STOCKMANN, U., ODGERS, N. and MCBRATNEY, A.B., 2014. *Pedometrics. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* [en línea]. Sydney-Australia: Elsevier. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489091636>.

MOLINA, E., 2014. Acidez de Suelos y Uso de Enmiendas. *CIA* [en línea], vol. 1. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: [http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Nota_tecnica_1-2014_Acidez de suelos y uso de enmiendas.pdf](http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Nota_tecnica_1-2014_Acidez_de_suelos_y_uso_de_enmiendas.pdf).

MORALES, J., RODRÍGUEZ, V. and CRUZ, R., 2015. Both aluminum and ABA induce the expression of an ABC-like transporter gene (FeALS3) in the Al-tolerant species *Fagopyrum esculentum*. *Environmental and Experimental Botany* [en línea], vol. 111. [Consulta: 27 July 2021]. DOI 10.1016/J.ENVEXPBOT.2014.11.005. Recuperado de: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/articulos/aluminio-en-el-suelo>.

ODEH, I.O.A. and MCBRATNEY, A.B., 2005. *Pedometrics. Encyclopedia of Soils in the Environment* [en línea], vol. 4. [Consulta: 21 April 2021]. DOI 10.1016/B0-12-348530-4/00020-5. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123485304000205?via%3Dihub>.

OLIVA, D., 2009. *Determinación de la acidez intercambiable (Al, H) a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua*. [en línea]. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/386/1/T2804.pdf>.

ORTÍZ, E., ZAPATA, H., SADEGHIAN, KH and FRANCO, A., 2004. *Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad*. *Cenicafé* [en línea], vol. 55, no. 2. [Consulta: 10 January 2022]. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc055%2802%29101-110.pdf>

PACHECO, E. and TORRES, M., 2020. *Validación de un Método Analítico para la Determinación de hierro (fe) total y manganeso (mn) en agua potable, natural y residual por*

Espectroscopía de Absorción Atómica (Trabajo de titulación) (Pregrado) [en línea]. Montería-Colombia: s.n. [Consulta: 19 June 2021]. Recuperado de: [https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/2999/-Pacheco Villegas Edilberto José - Torres Julio Miriam Beatriz.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/2999/-Pacheco_Villegas_Edilberto_José_-_Torres_Julio_Miriam_Beatriz.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

PALMER, R.G. and TROEH, F.R., 1995. Medida del pH y capacidad de intercambio catiónico de un suelo o sedimento. *Introductory soil science. Laboratory manual* [en línea]. 3. New York-Estados Unidos: s.n. [Consulta: 24 July 2021]. Recuperado de: https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/12/12485/MEDIDA_DEL_pH_Y_CAPACIDAD_DE_INTERCAMBIO_CATIONICO_DE_UN_S.pdf.

PÉREZ, A., GALVIS, A., BUGARÍN, R., HERNÁNDEZ, T., VÁZQUEZ, A. and RODRÍGUEZ, A., 2017. Capacidad de intercambio catiónico: descripción del método de la tiourea. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* [en línea], vol. 8, no. 1. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v8n1/2007-0934-remexca-8-01-171.pdf>.

QUEVEDO, J., 2013. *Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi (Trabajo de titulación) (Pregrado)* [en línea]. Quito-Ecuador: s.n. [Consulta: 15 April 2021]. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/7115/4.7.000340.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.

RAMÍREZ, P. and CANTÚ, A., 2008. *Ensayos toxicológicos para la evaluación de sustancias químicas en agua y suelo* [en línea]. 1. Ciudad de México-México: s.n. ISBN 9789688178829. Recuperado de: <https://crisnacortinas.org/sustentabilidad/download/ensayos-toxicologicos-para-la-evaluacion-de-sustancias-quimicas-en-agua-y-suelo-la-experiencia-de-mexico/>.

RAMÓN, H., BLANQUER, J. and IBÁÑEZ, S., 2015. *El Color del Suelo*. [en línea]. Valencia-España: [Consulta: 5 May 2021]. Recuperado de: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8008/Color del suelo.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8008/Color%20del%20suelo.pdf).

RAMÓN, H., BLANQUER, J. and IBÁÑEZ, S., 2016. *La Estructura de un Suelo*. [en línea]. [Consulta: 5 May 2021]. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8010/estructura.pdf>.

RAZMILIC, B., 1994. *Control de Calidad de Insumos y Dietas Agrícolas* [en línea]. FAO. Santiago de Chile-Chile: s.n. [Consulta: 19 June 2021]. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/ab482s/AB482S00.htm#TOC>.

REYNOLDS, C., 2005. *The Lakes Handbook* [en línea]. 1. Malden-Estados Unidos: Wiley-Blackwell. [Consulta: 20 April 2021]. ISBN 9780632047970. Recuperado de: <https://book.lat/book/1170435/0449a6?id=1170435&secret=0449a6>.

RIVERA, Y., MORENO, L., HERRERA, M. and ROMERO, H., 2016. La toxicidad por aluminio como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas* [en línea], vol. 37, no. 1. [Consulta: 24 March 2021]. ISSN 0121-2923. Recuperado de: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11696>.

RODRÍGUEZ, A., 2011. *Viabilidad técnica del uso de bioindicadores para el diagnóstico de la fertilidad*. [en línea]. S.l.: [Consulta: 20 May 2020]. Recuperado de: <https://www.icia.es/icia/download/Publicaciones/Informe%20final%20PTQ%20-09-02-01334.pdf>.

RODRÍGUEZ, A.J., ROBLES, C.A., RUÍZ, R.A., LÓPEZ, E., SEDEÑO, J.E. and DORANTES, A., 2014. Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río Chalma. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea], vol. 30, no. 3, pp. 307–316. [Consulta: 4 May 2021]. ISSN 01884999. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000300007.

ROJAS, J. and SÁENZ, E., 2012. *Densidad Aparente*. [en línea]. Chaco-Argentina: [Consulta: 5 May 2021]. Recuperado de: https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-_densidad_aparente.pdf.

SADEGHIAN, S., 2016. La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Cenicafé* [en línea]. Caldas-Colombia, 2016. [Consulta: 24 March 2021]. Recuperado de: <https://www.cenicafe.org/es/publications/AVT0466.pdf>.

SALINAS, J. and GARCÍA RAMIRO, 1979. *Métodos analíticos para suelos ácidos y plantas* [en línea]. CIAT. Cali-Colombia: s.n. [Consulta: 16 November 2021]. Recuperado de: <http://ciat->

library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/Digital/S593.5S371979C.1_Métodos_analíticos_para_suelos_ácidos_y_plantas.pdf.

SANCHA, A.M., CASTILLO, G., ESPINOZA, C., PÍA, M., CORNEJO, J., RIVAS, H., MOLINA, M. and VALENZUELA, J., 2005. *Criterios de Calidad de Suelos y de Aguas o Efluentes Tratados para uso en Riego* [en línea]. Santiago de Chile-Chile: s.n. [Consulta: 27 July 2021]. Recuperado de: http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/informe_final.pdf.

SÁNCHEZ, J., 2012. Acidez de los Suelos y su Manejo. *AUGURA* [en línea], vol. 3, no. 1. [Consulta: 24 March 2021]. DOI 10.13140/RG.2.2.18581.32486. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/315669020_ACIDEZ_DE_LOS_SUELOS_Y_SU_MANEJO.

SANTI, P., COLOMBI, C., RODRÍGUEZ, N., ROTHIS, L. and LIMARINO, C., 2018. Caracterización sedimentológica de un Sistema Fluvial Distributivo de clima árido: arroyo Papagayos, en el piedemonte oriental de las Sierras La Huerta-Imanas, San Juan, Argentina. *Anden Geology* [en línea]. San Juan-Argentina, 2018. [Consulta: 26 April 2021]. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/248072101.pdf>.

SERRA, A., CUADRADO, D. and BOTTE, S., 2014. Índice de geoacumulación (Igeo) y factor de enriquecimiento (FE) en sedimentos del estuario de Bahía Blanca. *CONICET* [en línea]. [Consulta: 15 April 2021]. DOI 10.13140/RG.2.1.4715.7364. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/303820580_Indice_de_geoacumulacion_Igeo_y_factor_de_enriquecimiento_FE_en_sedimentos_del_estuario_de_Bahia_Blanca.

SHAGÑAY, G., 2014. *Levantamiento de Línea Base de los Humedales de la Comunidad de Ozogoché, Parroquia Achupallas, Provincia de Chimborazo (Trabajo de titulación) (Pregrado)* [en línea]. Riobamba-Ecuador: s.n. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3401/1/236T0095.pdf>.

SILBERGELD, E., HOLMBERG, B. and HÖGBERG, J., 1971. *Toxicología Herramientas y Enfoques: Definiciones y conceptos* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 6 June 2021]. Recuperado de: <https://www.insst.es/documents/94886/161958/Cap%C3%ADtulo+33.+Toxicolog%C3%ADa>.

SIVAGURU, M. and HORST, W.J., 1998. The Distal Part of the Transition Zone Is the Most Aluminum-Sensitive Apical Root Zone of Maize. *Plant Physiology* [en línea], vol. 116, no. 1. [Consulta: 27 July 2021]. ISSN 0032-0889. DOI 10.1104/PP.116.1.155. Recuperado de: <https://academic.oup.com/plphys/article/116/1/155/6097281>.

SKOOG, D., HOLLER, F.J. and CROUCH, S., 2008. *Principios de análisis instrumental* [en línea]. 6. Ciudad de Mexico-México: CENGAGE Learning. [Consulta: 19 June 2021]. ISBN 0-495-01201-7. Recuperado de: https://www.academia.edu/37326567/Principios_de_análisis_instrumental_6ta_Edición_Douglas_A_Skoog_LIBROSVIRTUAL.

SMART FERTILIZER, 2020. *La Capacidad de Intercambio Catiónico*. [en línea]. [Consulta: 24 July 2021]. Recuperado de: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/cation-exchange-capacity/>.

SORACCO, C.G., FOURNIER, L.L., LOZANO, L.A., SARLI, G.O. and FILGUEIRA, R.R., 2010. Funciones de transferencia edafológica Funciones de transferencia edafológica adaptadas a suelos de La Plata, Argentina Pedotransfer functions adapted for soils from La Plata, Argentina. *Facultad de Ciencias Agrarias* [en línea], vol. 2, no. 42. [Consulta: 21 April 2021]. Recuperado de: https://videla-rivero.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/6477/t42-2-nb-02-soracco.pdf.

TENJO, A. and CÁRDENAS, E., 2015. Importancia y utilidad de los bioindicadores acuáticos. *Biodiversidad Colombia* [en línea], vol. 1, no. 5. [Consulta: 8 December 2021]. ISSN 2389-878X. Recuperado de: <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=bi>.

TILOOM, 2016. *Conductividad Eléctrica*. [en línea]. [Consulta: 13 December 2021]. Recuperado de: <https://www.tiloom.com/conductividad-electrica/>.

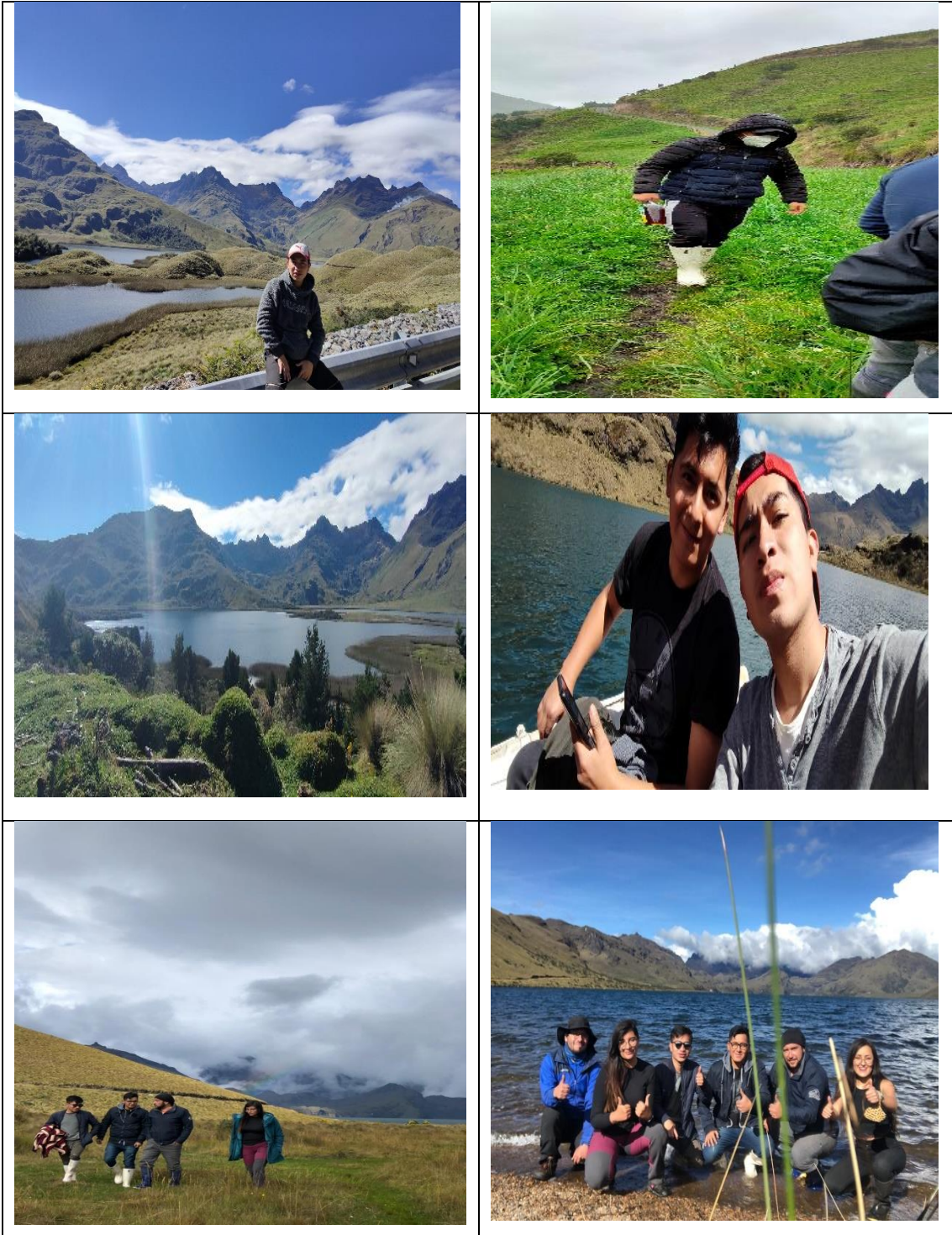
TOLEDO, M., 2016. *Manejo de Suelos Ácidos de las Zonas Altas de Honduras* [en línea]. 1. Tegucigalpa-Honduras: IICA. [Consulta: 21 April 2021]. ISBN 978-99979-55-01-2. Recuperado de: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=8636C4F0181DC9800267A119D45E1FBC?sequence=1>.

TORRELLAS, R., 2013. La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud. *Udistrital* [en línea], vol. 1, no. 1. [Consulta: 27 July 2021]. Recuperado de: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/5646/7188>.

TRUJILLO, J. and TORRES, M., 2015. Niveles de contaminación en tres sectores de Villavicencio, a través del índice de geo-acumulación(I-geo). *Scielo* [en línea], vol. 19, no. 1. [Consulta: 15 April 2021]. Recuperado de en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v19n1/v19n1a10.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: VISITA A LAS ZONAS DE ESTUDIO



ANEXO B: TRITURACIÓN Y SECADO DE LAS MUESTRAS




ANEXO C: TAMIZADO DE LAS MUESTRAS SECAS



ANEXO D: ETIQUETADO Y ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS



ANEXO E: ANÁLISIS DE LOS EXTRACTOS DE SUELO EN EL ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN

	
<p>Pesaje del cloruro de potasio para la preparación del extractante.</p>	<p>Etiquetado de los frascos para su previa colocación de las muestras.</p>
	
<p>Pesaje de 5g de la muestra del suelo y colocación en los respectivos frascos.</p>	<p>Filtrado al vacío de los respectivos frascos.</p>
	
<p>Preparación de las muestras para analizar.</p>	<p>Análisis de las muestras en el espectrofotómetro de absorción atómica.</p>

ANEXO F: DETERMINACIÓN DE LA DL50



Preparación de los estándares de aluminio.



Etiquetado y colocación del papel filtro en las cajas Petri.



Distribución de 5mL de los estándares de aluminio en las cajas Petri.



Sellado de las cajas Petri.



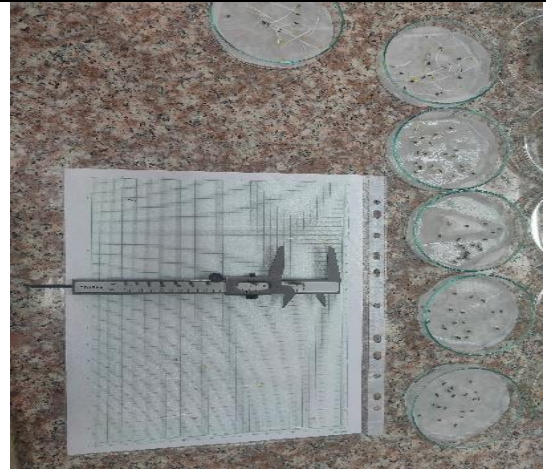
Cubrimiento de las cajas Petri con papel aluminio.



Conservación de las cajas Petri en la estufa a $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$



Conteo de las semillas germinadas.



Medición de la longitud de las raíces.



Registro datos.



Socialización de resultados.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

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: 04 / 02 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Jhon Fernando Guzñay Caizaguano</i> <i>Hermant Emanuel Ortega Salinas</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Ambiental</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Ambiental</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**

Firmado digitalmente
por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.02.04
10:10:58 -05'00'



0204-DBRA-UTP-2022