



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**Dinámica de la Generación de Drenaje Ácido en los  
Materiales de Concentración del Proyecto Loma Larga**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de  
INGENIERA EN MINAS**

**Autora**

**ANA MICAELA JIMBO MOGROVEJO**

**Director**

**FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA**

**CUENCA, ECUADOR**

**2019**

## DEDICATORIA

A Juan José, que desde el momento que llego a mi vida se convirtió en mi razón de ser y al que quiero dedicarle este triunfo, ya que sin su apoyo y amor incondicional no hubiera podido lograr esta meta. Gracias por convertirte en el motor que me impulsa todos los días a ser una mejor persona y una buena madre.

A mis padres, Juan Pablo y Martha, que con su amor y paciencia supieron guiar mi camino a pesar de las adversidades, nunca dejaron de creer en mí y fueron parte fundamental para mi desarrollo profesional y como ser humano. A ellos, que nunca permitieron que me rindiera, que han estado junto a mí en cada decisión que he tomado, Gracias por su apoyo incondicional.

A mis hermanos, Juan y Mateo, por estar junto a mí en cada etapa de mi vida, por ser mi alegría y la razón por la que quiera superarme cada día, para poder ser un buen ejemplo de persona y ser testimonio que las cosas se pueden lograr con trabajo, perseverancia y sacrificio

A Imelda, el ejemplo más grande de amor he tenido en la vida, no me alcanzaran las palabras para agradecerte todo lo que hiciste por mí, y aunque no estés para verme cumplir este sueño, yo sé que donde quiera que te encuentres me sigues cuidando y te alegras por verme culminar esta etapa.

A mis abuelos, tíos, y primos, que siempre estuvieron pendientes de mí brindándome su apoyo y la motivación para seguir adelante a lo largo de todos estos años.

A Henry, por ser mi amigo, cómplice, confidente, por su inagotable apoyo a largo de toda mi carrera, gracias por no permitir que me diera por vencida en innumerables ocasiones, por todas las veces que me viste derrumbada y me ayudaste a levantarme, eres el más claro ejemplo de amistad y lealtad, y te agradezco por ser parte de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad del Azuay y a la Escuela de Ingeniería en Minas por abrirme las puertas en tan prestigiosa institución, y ser participe en mi formación académica y profesional a lo largo de estos años.

Mi mayor gratitud y admiración al Ing. Fernando Valencia Msc. Por su acertada y paciente guía durante todos mis años de educación universitaria donde tuve el honor de ser su alumna, y aún más por el apoyo brindado en la realización de este trabajo de titulación.

Al personal docente, por su paciencia, dedicación y entrega para día a día transmitir sus conocimientos en las aulas de clases. De manera muy especial agradezco al Dr. Juan Calderón, por su incansable ayuda a lo largo de la elaboración de este trabajo de investigación, por sus consejos y enorme paciencia.

A mis compañeros, con lo que compartí día tras día dentro y fuera del aula de clases tantas gratas experiencias que sin duda quedaran guardadas en mi corazón.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XII
RESUMEN .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
1.1. Drenajes Ácidos de Mina.....	3
1.1.1. Formación del Drenaje Ácido de Mina.....	6
1.1.1.1. Etapas de formación de aguas ácidas .....	10
1.1.1.2. Lixiviación bacteriana .....	13
1.1.2. Características de los drenajes ácidos de mina.....	16
1.2. Evaluación del Drenaje ácido minero DAM.....	18

1.2.1.	Test para evaluar el potencial de drenaje ácido minero .....	18
1.2.1.1.	Test estáticos.....	18
1.2.2.	Relación Ácido – Base.....	20
1.2.3.	Test cinéticos .....	24
1.2.4.	Columnas de lixiviación.....	27
 <b>CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL .....</b>		<b>29</b>
2.1.	Datos generales .....	29
2.1.1.	Ubicación de la zona de estudio .....	29
2.1.2.	Clima.....	31
2.1.3.	Temperatura.....	32
2.1.4.	Geología .....	33
2.1.4.1.	Geología regional.....	34
2.1.4.2.	Formación Quimsacocha.....	35
2.1.4.3.	Geomorfología .....	36
2.1.4.4.	Mineralización .....	37
 <b>CAPITULO 3: DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN.....</b>		<b>40</b>
3.1.	Preparación de la muestra .....	40

3.1.1.	Preparación mecánica .....	40
3.1.2.	Tamizaje .....	42
3.1.3.	Flotación.....	43
3.2.	Test Estáticos .....	46
3.2.1.	Potencial ácido.....	47
3.2.2.	Potencial de neutralización.....	48
3.3.	Test Dinámicos.....	52
3.3.1.	Construcción de la infraestructura de las columnas de lixiviación.....	53
3.3.1.1.	Diseño de la estructura .....	53
3.3.2.	Construcción de las columnas de lixiviación .....	54
3.3.3.	Dosificación de las columnas de lixiviación .....	55
3.4.	Medición del PH y conductividad .....	57
3.4.1.	pH.....	57
3.4.2.	Conductividad.....	59
3.4.3.	Eh.....	61

**CAPITULO 4: RESULTADOS..... 63**

4.1.	Test estáticos .....	63
4.1.1.	Potencial neutro (PN).....	63
4.1.2.	Potencial ácido (PA).....	70

4.1.3.	Potencial de Neutralización Neto .....	70
4.2.	Test dinámicos.....	71
4.2.1.	Interpretación de curvas de pH.....	75
4.2.2.	Interpretación de curvas de conductividad.....	79
4.2.3.	Interpretación de curvas de Eh .....	83
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		84
BIBLIOGRAFÍA .....		90
ANEXOS.....		93

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Etapas de la formación de aguas ácidas .....	12
Figura 1.2: Esquema de los distintos tipos de lixiviación de un sulfuro.....	14
Figura 1.3: Primer criterio para evaluar el potencial de generación de ácido .....	23
Figura 1.4: Relación de los potenciales de generar y consumir ácido .....	23
Figura 1.5: Columnas de lixiviación.....	28
Figura 2.1: Mapa de ubicación de proyecto minero Loma Larga.....	29
Figura 2.2: Ubicación de las concesiones del proyecto minero Loma Larga.....	30
Figura 2.3: Clima característico del proyecto minero "Loma Larga" .....	31
Figura 2.4: Clima del proyecto Loma Larga .....	32
Figura 2.5: Geología regional del proyecto minero Loma Larga .....	34
Figura 2.6: Mapa Geomorfológico e Hidrográfico .....	37
Figura 2.7: Sección transversal del depósito Loma Larga .....	39
Figura 2.8: Sección longitudinal del depósito Loma Larga .....	39
Figura 3.1: Trituradora de mandíbulas.....	41
Figura 3.2: Molino de bolas.....	41
Figura 3.3 Recuperación de cobre en fracciones de tamaños en diferentes plantas concentradoras .....	42
Figura 3.4: Agitadora Ro – Top.....	43
Figura 3.5: Celda de flotación DENVER.....	44
Figura 3.6: Productos de la flotación .....	44
Figura 3.7: Proceso de secado del producto de flotación .....	45
Figura 3.8: Homogenización del material .....	45
Figura 3.9: Potenciómetro utilizado para realizar los análisis de PA y PN.....	46
Figura 3.10: Titulación con HCl.....	49
Figura 3.11: Diseño de la columna de lixiviación .....	53
Figura 3.12: Construcción de las columnas de lixiviación.....	54
Figura 3.13: Columnas de lixiviación .....	55
Figura 3.14: Material grueso .....	56
Figura 3.15: Material fino.....	56



Figura 3.16: Llenado de las columnas de lixiviación.....	57
Figura 3.17: Medición del PH .....	59
Figura 3.18: Medición de la conductividad .....	61
Figura 4.1: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Alimento 1) .....	64
Figura 4.2: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Alimento 2) .....	65
Figura 4.3: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Concentrado 1) .....	66
Figura 4.4: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Concentrado 2) .....	67
Figura 4.5: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Relave 1) .....	68
Figura 4.6: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Relave 2) .....	69
Figura 4.7: Comportamiento del pH en un periodo de tiempo (Alimento).....	72
Figura 4.8: Comportamiento del pH en un periodo de tiempo (Relave).....	73
Figura 4.9: Comportamiento del pH en un periodo de tiempo (Concentrado).....	74
Figura 4.10: Comportamiento de la conductividad en un periodo de tiempo (Alimento) .....	76
Figura 4.11: Comportamiento de la conductividad en un periodo de tiempo (Relave) .....	77
Figura 4.12: Comportamiento de la conductividad en un periodo de tiempo (Concentrado) .....	78
Figura 4.13: Comportamiento del Eh en un periodo de tiempo (Alimento) .....	80
Figura 4.14: Comportamiento del Eh en un periodo de tiempo (Relave) .....	81
Figura 4.15: Comportamiento del Eh en un periodo de tiempo (Concentrado) .....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de drenajes de mina.....	4
Tabla 1.2: Clasificación de los microorganismos según la temperatura en la que se desarrollan .....	15
Tabla 1.3: Clasificación ácido/base de rocas mediante ensayos estáticos .....	24
Tabla 3.1: Potencial ácido .....	47
Tabla 3.2: Peso exacto de la muestra utilizada para la determinación de PN .....	48
Tabla 3.3: Consumo de HCl .....	49
Tabla 3.4: Rango de pH en que algunos minerales consumidores de ácido reaccionan estabilizando el pH.....	50
Tabla 3.5: kg de CaCO <sub>3</sub> / T de cada muestra para determinación del PN .....	51
Tabla 3.6: Valores finales de consumo de ácido expresados kg de CaCO <sub>3</sub> / T .....	52
Tabla 3.7: Datos pH .....	58
Tabla 3.8: Datos Conductividad .....	60
Tabla 3.9: Datos Eh.....	62
Tabla 4.1: Potencial Ácido. ....	70
Tabla 4.2: Potencial de Neutralización Neto .....	70

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1: Reacción de oxidación de la pirita .....	7
Ecuación 1.2: Reacción de oxidación de iones ferrosos a iones férricos .....	7
Ecuación 1.3: Reacción de precipitación del ion férrico .....	7
Ecuación 1.4: Reacción de oxidación de cationes férricos hacia la pirita.....	7
Ecuación 1.5: Obtención del DAM como consecuencia de la oxidación de sulfuros minerales.....	8
Ecuación 1.6: Obtención del DAM como resultado de la reacción con ion férrico .....	8
Ecuación 1.7: Lixiviación indirecta .....	13
Ecuación 1.8: Lixiviación por contacto.....	14
Ecuación 1.9: Reacción de la pirita.....	20
Ecuación 1.10: Neutralización del ácido .....	20
Ecuación 1.11: Producción de Potencial ácido .....	21
Ecuación 1.12: Potencial ácido .....	21
Ecuación 1.13: Potencial de Neutralización .....	22
Ecuación 3.1: Ecuación Global.....	47
Ecuación 3.2: Determinación del potencial ácido.....	47
Ecuación 3.3: Conversión a kg CaCO <sub>3</sub> /t.....	51
Ecuación 3.4: Calculo del Eh.....	61

## ÍNDICE DE ANEXOS

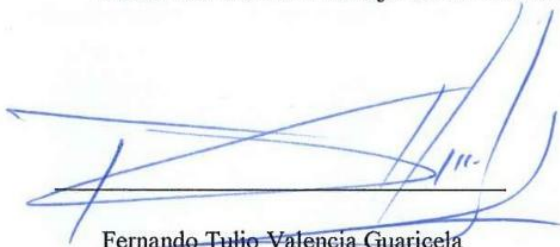
Anexo 1: Listado de abreviaturas .....	93
Anexo 2: Peso de la muestra.....	94
Anexo 3: Colocación de la muestra en el Erlenmeyer .....	94
Anexo 4: Colocación de agua destilada .....	94
Anexo 5: Solución de material solido más agua destilada .....	95
Anexo 6: Filtrado de la solución.....	96
Anexo 7: Balones de aforo con la solución filtrada .....	96
Anexo 8: Dosificación en tubos de agitación .....	97
Anexo 9: Centrifugación de la muestra.....	97
Anexo 10: Titulación potenciométrica .....	98
Anexo 11: Calentamiento de la muestra .....	98

## DINÁMICA DE LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN LOS MATERIALES DE CONCENTRACIÓN DEL PROYECTO LOMA LARGA

### RESUMEN

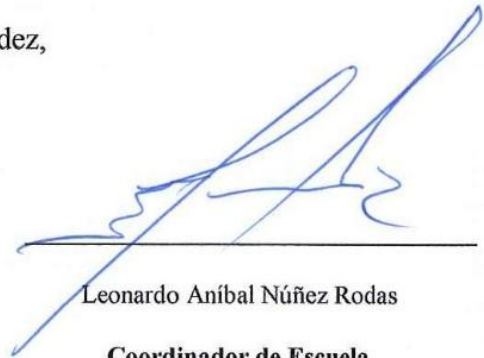
En esta investigación se realizaron test estáticos y dinámicos sobre materiales de mena, caja y relaves del proyecto minero Loma Larga ubicado en el cantón Cuenca, provincia del Azuay, que permitieron determinar el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM). La finalidad de este trabajo de investigación es determinar las condiciones con las cuales se empieza a generar la acidificación del agua, el tiempo y los factores que inciden en la velocidad de reacción de este proceso. La metodología utilizada para la realización del test estático fue la determinación del potencial ácido, potencial neutro y potencial neto de neutralización para evaluar si las muestras se pueden considerar generadoras de acidez, mientras que, para el test dinámico, se utilizaron columnas de lixiviación, bajo condiciones controladas, los ensayos analíticos se realizaron en los laboratorios de la Universidad del Azuay.

**Palabras clave:** Drenaje ácido minero, pH, acidez,



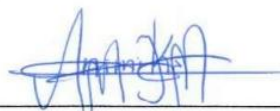
Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Director del Trabajo de Titulación**



Leonardo Anibal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



Ana Micaela Jimbo Mogrovejo

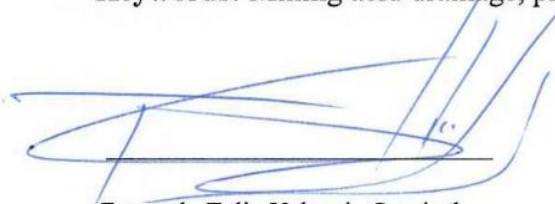
**Autor**

## DYNAMICS OF THE GENERATION OF ACID DRAINAGE IN THE CONCENTRATION MATERIALS OF THE LOMA LARGA PROJECT

### ABSTRACT

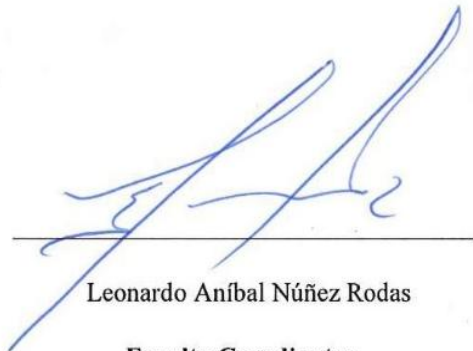
In this research, static and dynamic tests were carried out on ore, box and tailing materials from the Loma Larga mining project in Cuenca, province of Azuay. These allowed to determine the potential of generation of acid mine drainage (AMD). The purpose was to determine the conditions under which the acidification of water begins, the time and the factors that affect the speed of reaction of this process. The methodology used for the static test was the determination of the acid potential, neutral potential and net neutralization potential to evaluate if the samples could be considered as generators of acidity. Leaching columns were used under controlled conditions for the dynamic test, the analytical tests were carried out in the laboratories of the University of Azuay.

**Keywords:** Mining acid drainage, pH, acidity.



Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Thesis Director**




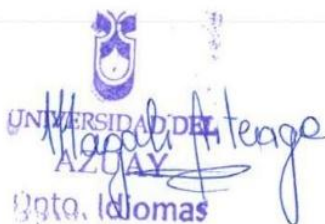
Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Faculty Coordinator**



Ana Micaela Jimbo Mogrovejo

**Author**



Translated by  
Ing. Paúl Arpi

Jimbo Mogrovejo Ana Micaela

Trabajo de titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela Msc.

Marzo 2019

## **DINÁMICA DE LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO EN LOS MATERIALES DE CONCENTRACIÓN DEL PROYECTO LOMA LARGA**

### **INTRODUCCIÓN**

La minería en el Ecuador se ha venido posicionando a lo largo de los años como una de las actividades productivas más importantes, ya que no solo ha contribuido al desempeño económico del país, sino que, ha impulsado la inversión extranjera y la generación de plazas de trabajo en todos los sectores donde se desarrolla.

Dentro de los proyectos estratégicos que se están desarrollando en el país, 2 de ellos se encuentran en la zona sur en la provincia del Azuay, y están considerados de gran importancia para el desarrollo económico y productivo no solo de la provincia donde están asentados si no a su vez de las zonas aledañas a los proyectos que de una u otra forma también se ven beneficiados.

La ubicación del proyecto minero Loma Larga, que se encuentra en fase de exploración avanzada, del cual se obtuvieron las muestras que son analizadas en el presente trabajo, se encuentra en una zona de páramo, por lo que es importante que toda la actividad que vaya a realizarse, dentro del proyecto sea con los más altos estándares de calidad ambiental, para que no se comprometa el medio ambiente.

Uno de los principales problemas relacionados con la actividad minera es la generación de drenaje ácido debido a la mayor exposición de las rocas del depósito minero a los factores del entorno que facilitan los procesos de acidificación del agua por lixiviación de minerales. Al ponerse en contacto el oxígeno, agua y bacterias con minerales especialmente sulfuros, se producen drenajes ácidos de minas DAM o drenajes ácidos de rocas DAR. Así las aguas mineras pueden estar caracterizadas por un pH bajo a neutro, elevadas concentraciones de sulfato y elevadas concentraciones de metales pesados disueltos.

Los materiales correspondientes a mena, caja o estéril y de relaves sufren una variación en sus condiciones físicas y de concentración mineralógica, por lo que su dinámica en función de generar condiciones de lixiviación de metales pesados varía diferenciadamente, finalmente el cambio en las condiciones de acidez del agua y suelo altera las condiciones de equilibrio existente en el entorno.

Por las consideraciones expuestas el presente trabajo se centra principalmente en poder establecer el potencial de generación del drenaje ácido de forma de que tanto las empresas involucradas como las autoridades puedan disponer de información clara que permita la aplicación de medidas de prevención y control de posibles impactos.



## CAPITULO 1

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1. Drenajes Ácidos de Mina

La actividad minera, genera material de desecho o material estéril, que contiene sulfuros principalmente metálicos, como, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), que al atravesar una serie de procesos químicos y biológicos estos sulfuros son oxidados y generan lixiviados con altas concentraciones de metales pesados disueltos a los que se les conoce como Drenaje Ácido de Mina. (Skoog, 2004)

Se dice que es un drenaje ácido cuando los minerales ácidos exceden a los alcalinos, pueden contener elevadas concentraciones  $\text{SO}_4^-$ , Fe, Mn, Al y otros iones, el drenaje ácido puede o no tener un pH bajo, pero la presencia de Fe, Al y Mn disueltos pueden generar iones  $\text{H}^+$  por hidrólisis y esto producir una baja en el pH. (Aduvire, 2006)

En los drenajes ácidos el anión principal es el  $\text{SO}_4^-$ , y los cationes más significativos son Fe, Mn y Al. A diferencia de los drenajes de mina neutros o alcalinos en los que la alcalinidad es igual o mayor que la acidez que, aunque también pueden tener elevadas concentraciones de  $\text{SO}_4^-$ , Fe, Mn y otros solutos, pero la disolución de los minerales carbonatados neutraliza la acidez y remueven Fe, Al y otros iones metálicos; y, sin embargo no afecta significativamente a la concentración de  $\text{SO}_4^-$ , en los drenajes alcalinos o neutros el  $\text{HCO}_3^-$ , es más significativo que el  $\text{SO}_4^-$ , y los cationes más significativos son Ca, Mg, Na. (Aduvire, 2006)

Las principales fuentes de los drenajes ácidos de mina son:

- 1) Rocas de desecho y relaves,
- 2) Minas subterráneas y de cielo abierto y

- 3) Aglomerados de mineral.

Por otro lado, los principales requerimientos para la generación de los DAM son:

- 1) Sulfuros metálicos
- 2) Agua o atmósfera húmeda
- 3) Presencia de un oxidante (generalmente oxígeno en fase gaseosa o en fase acuosa)
- 4)  $\text{pH} < 7$
- 5) Actividad química de iones férricos
- 6) Área superficial expuesta de los sulfuros metálicos
- 7) Sobrepasar la energía de activación química requerida para iniciar la generación ácida
- 8) Actividad biológica (bacterias oxidantes de hierro y sulfuro) (Hedin, 1994)

El proceso de generación de los drenajes ácidos de mina es producido por la influencia de bacterias que catalizan la oxidación de estos sulfuros; existen varias especies de bacterias que son responsable de la generación de ácido a través de la oxidación de sulfuros metálicos, entre ellas podemos encontrar especies como acidithiobacillus ferrooxidans que se encargan de oxidar hierro y sulfuro, leptospirillum ferrooxidans encargado de oxidar hierro, acidithiobacillus thiooxidans oxida sulfuro excepto pirita y thiobacillus thioparus son las que se encargan de oxidar sulfuros. (Icgen, 2007)

En la tabla 1.1 se detalla los tipos de drenaje ácido de mina que se pueden encontrar de acuerdo al rango del pH en el que se encuentran, así como también la descripción de los principales metales que contienen.

Tabla 1.1 Tipos de drenajes de mina

<b>TIPO</b>	<b>pH</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
I	< 4,5	✓ Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, y otros metales.

		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alto contenido de oxígeno.</li> <li>✓ Muy ácido (llamado Drenaje Ácido de Mina)</li> </ul>
II	< 6,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alta cantidad de sólidos disueltos.</li> <li>✓ Alta concentración de ion ferroso (Fe<sup>2+</sup>) y Mn.</li> <li>✓ Bajo contenido de oxígeno.</li> <li>✓ Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en Tipo I.</li> </ul>
III	< 6,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos.</li> <li>✓ Bajo a moderado contenido de ion ferroso (Fe<sup>2+</sup>) y Mn.</li> <li>✓ Bajo contenido de oxígeno.</li> <li>✓ Alta alcalinidad (llamado Drenaje Alcalino de Mina).</li> <li>✓ Por oxidación de metales la acidez generada es neutralizada por la alcalinidad presente en el agua.</li> </ul>
IV	< 6,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alta cantidad de partículas disueltas.</li> <li>✓ Drenaje neutralizado, pero todavía no se han fijado los hidróxidos en el agua.</li> <li>✓ A mayor tiempo de residencia en las balsas mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al de Tipo V</li> </ul>
V	< 6,0	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Agua del drenaje es neutralizado.</li> <li>✓ Alta cantidad de sólidos disueltos.</li> <li>✓ Gran cantidad de hidróxidos precipitados y fijados en las balsas.</li> <li>✓ Cationes restantes son disueltos por Ca y Mn. Oxi-aniones solubles como bicarbonato y sulfato quedan en la solución.</li> </ul>

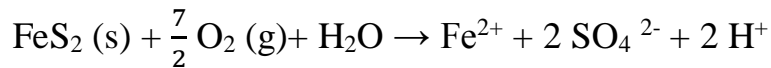
En general, los drenajes ácidos tienen muy bajo pH, contienen una gran cantidad de sólidos disueltos, una elevada acidez total y un alto contenido en elementos traza y compuestos inorgánicos. Los drenajes ácidos están asociados a las labores mineras principalmente, sin embargo, no solo se restringe a esta actividad pues ocurre a su vez, cuando se expongan materiales y rocas con un contenido significativo de sulfuros a condiciones de intemperismo como es el caso de obras civiles que se encuentren dentro de terrenos sulfurosos. La presencia de drenajes ácidos no está directamente asociado a la actividad minera en producción si no también se los puede ver presenten en explotaciones mineras abandonadas tanto a cielo abierto como en subterráneo.

### **1.1.1. Formación del Drenaje Ácido de Mina**

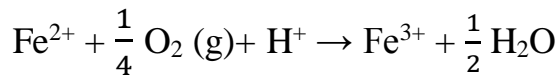
Según el autor López Pamo, en su artículo “Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro”, nos dice que:

La formación de los Drenajes Ácidos de Mina inicia cuando los minerales sulfurados se exponen a condiciones de intemperismo (agua, aire, bacterias), generando una reacción que desencadena el proceso de oxidación de la pirita, el proceso de oxidación de la pirita es el principal responsable de la formación de aguas ácidas las reacciones geoquímicas se aceleran en áreas mineras debido a que el aire entra en contacto con mayor facilidad con los sulfuros a través de las labores de acceso y la porosidad creada en las pilas de estériles y residuos, unido a ello el cambio de composición química y el incremento de la superficie de contacto de las partículas. Los procesos físicos, químicos y biológicos tienen gran influencia en la generación, movilidad y atenuación de la contaminación ácida de las aguas, y los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución de la pirita. (Pamo, 2002)

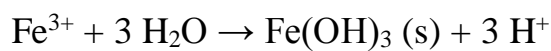
La representación de las reacciones que intervienen en el proceso de oxidación de la pirita se puede representar por las cuatro ecuaciones a continuación.



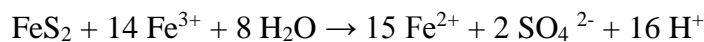
Ecuación 1.1: Reacción de oxidación de la pirita



Ecuación 1.2: Reacción de oxidación de iones ferrosos a iones férricos



Ecuación 1.3: Reacción de precipitación del ion férrico



Ecuación 1.4: Reacción de oxidación de cationes férricos hacia la pirita

Según (Pamo, 2002), en la (Ecuación 1) se produce  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$ , como resultado de la oxidación de la pirita. Al producirse esta reacción se da un incremento en el total de sólidos disueltos y un aumento de la acidez (disminución del pH).

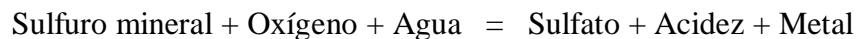
Si el ambiente en el que se produce la reacción es suficientemente oxidante, los iones ferrosos se oxidarán a iones férricos (Ecuación 2).

El ion férrico que se formó como producto de la reacción anterior es precipitado mediante hidrólisis como hidróxido (Ecuación 3), esto provoca que se disminuya el  $\text{Fe}^{3+}$  en solución, y el pH que principalmente se encuentra alrededor de 3 comienza a bajar simultáneamente.

Finalmente, los cationes férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) que se encuentran aún en solución, siguen oxidando adicionalmente a la pirita y formar  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{H}^+$  (Ecuación 4).

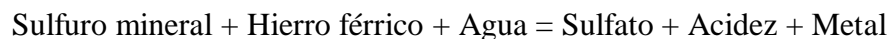
Cinéticamente, la oxidación de la pirita (Ecuación 1) en un principio es un proceso lento, que acaba con el hierro liberado precipitado como hidróxido (Ecuación 3) al ser todavía relativamente alto el pH. Progresivamente la capacidad neutralizadora del medio va disminuyendo, y al alcanzar el pH el valor de 3,5 ya deja de formarse el hidróxido y la actividad del  $\text{Fe}^{3+}$  en solución se incrementa. A este pH, además, las bacterias catalizan y aceleran la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  (Ecuación 2) en varios órdenes de magnitud. Es entonces cuando la reacción (Ecuación 4) de oxidación de la pirita por el  $\text{Fe}^{3+}$  empieza a tener lugar, siendo la causa de la rápida oxidación de la pirita a pH ácido.

Como se demostró anteriormente el drenaje ácido de mina se obtiene como consecuencia de la oxidación de algunos sulfuros minerales (pirita, pirrotina, marcasita, etc.) cuando se exponen al oxígeno del aire y agua: (Aduvire, 2006)



Ecuación 1.5: Obtención del DAM como consecuencia de la oxidación de sulfuros minerales

También otros oxidantes como hierro férrico puede reemplazar al oxígeno del aire en la reacción y en algunos casos al oxígeno del agua:



Ecuación 1.6: Obtención del DAM como resultado de la reacción con ion férrico

Un factor altamente influyente al momento de generarse las aguas ácidas es, la velocidad de reacción, pues si el proceso de formación es relativamente lento su incidencia sobre el medio es irrelevante, sin embargo, si el proceso de formación es rápido el problema se ve agravado lo que conlleva a la contaminación del medio en el que está generando. (Aduvire, 2006)

Aunque la velocidad de reacción depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias. Ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras; por ejemplo, la marcasita, que tiene la misma fórmula química que la pirita, es muy inestable y puede generar rápidamente aguas ácidas. Los sulfuros de otros metales (plomo, cinc o cobre) son generalmente menos reactivos que los de hierro. En parte, debido a la mayor estabilidad de su estructura cristalina y también porque forman minerales menos solubles que recubren la superficie de los propios sulfuros impidiendo que progrese su oxidación. (Aduvire, 2006)

Los factores que inciden en la velocidad de reacción depende de numerosos factores como:

- Temperatura
- Cantidad de sulfuros
- Granulometría
- Presencia de agua
- Presencia de aire
- Presencia de bacterias

Según el autor (Aduvire, 2006), existen ciertas especies mineralógicas en las que la velocidad es mayor que en las de otras por lo tanto se dice que son más reactivas. A su vez los sulfuros tales como el plomo, zinc o cobre, son menos reactivos que los hierro, esto se debe a que su estructura cristalina es más estable y forman minerales menos solubles que recubren la superficie de los propios sulfuros lo que impide que su oxidación se lleve a cabo

Otro factor altamente influyente en la velocidad de reacción es la cantidad y el tamaño de los granos del mineral. Las texturas finas con variedades mal cristalizadas se oxidan más rápidamente que los granos cristalinos gruesos. Por ejemplo, una forma de pirita desarrollada en condiciones de baja temperatura puede producir mucho más rápidamente acidez que una gran masa de sulfuros formada a alta temperatura, debido a la menor relación de superficie/volumen.

La producción de nuevos compuestos por la reacción de los sulfuros puede cambiar la velocidad del proceso de generación de aguas ácidas. En el caso del sulfuro de hierro meteorizado, los productos pueden reaccionar posteriormente con la pirita, acelerando el mecanismo de oxidación. Por otro lado, los productos de la reacción pueden recubrir los sulfuros, previniendo su alteración. Las propiedades químicas de las aguas determinarán si los nuevos compuestos formados precipitarán o se mantendrán en disolución. (Aduvire, 2006)

Ciertas bacterias actúan como catalizadoras de las reacciones. Su importancia depende de las condiciones de pH y temperatura, así como de la existencia de concentraciones críticas de elementos como el molibdeno que puede ser tóxico para las bacterias.

Muchas rocas contienen minerales que consumen de forma natural los ácidos producidos en la oxidación de los sulfuros. Este proceso de neutralización natural es intenso cuando existe carbonato cálcico (principal constituyente de las calizas), pero también son neutralizantes los carbonatos de hierro y magnesio, y los hidróxidos de hierro y aluminio, que pueden ayudar a elevar el pH hasta niveles aceptables. (Morin, 2001)

La cantidad relativa de esas rocas, respecto a la cantidad de sulfuros, determina la acidificación de las aguas. Si existe bastante caliza y dolomita, los productos de reacción como el yeso o las sales de hierro podrán revestir las partículas de sulfuros y disminuir la velocidad de reacción. Si, por el contrario, la cantidad de sulfuros es grande, una vez consumidos los materiales neutralizantes los drenajes volverán a ser ácidos. (Aduvire, 2006)

#### **1.1.1.1. Etapas de formación de aguas ácidas**

Según Aduvire, 2006, el proceso de formación de aguas ácidas se establece en 3 etapas.

##### **1. Primera etapa**

La oxidación de minerales sulfurosos libera hierro ferroso que bajo condiciones neutras se oxida químicamente y se transforma a hierro férrico



que precipita como hidróxido y aporta acidez al medio. En esta etapa del proceso la velocidad de oxidación es baja en los dos mecanismos de generación ácida (directa e indirecta) y la formación de aguas ácidas por oxidación debida al aire y a las bacterias (fundamentalmente *Thiobacillus ferrooxidans*) se producen a un ritmo semejante. Por lo general, la alcalinidad disponible en el medio es suficiente para neutralizar parcialmente la acidez que se ha producido lentamente. (Aduvire, 2006)

## **2. Segunda etapa**

La acidez acumulada supera la capacidad de neutralización del medio y el pH desciende y predomina la oxidación de la pirita por la acción bacteriana. En la reacción se produce el sulfato ferroso que al ser oxidado nuevamente se transforma en sulfato férrico, y éste a su vez en contacto con el agua da lugar al ácido sulfúrico y al hidróxido férrico, que es insoluble y es el que provoca la coloración amarilla de las aguas. En esta etapa disminuye la eficacia del mecanismo directo (oxidación por el aire) y aumenta mucho la del indirecto. (Aduvire, 2006)

## **3. Tercera Etapa**

Cuando el pH desciende por debajo de 3 en la proximidad de los granos de pirita (aproximadamente 4,5 en el agua), el ion férrico se ve afectada por las reacciones de oxidación-reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa varía la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación de hidróxido férrico. (Morin, 2001)

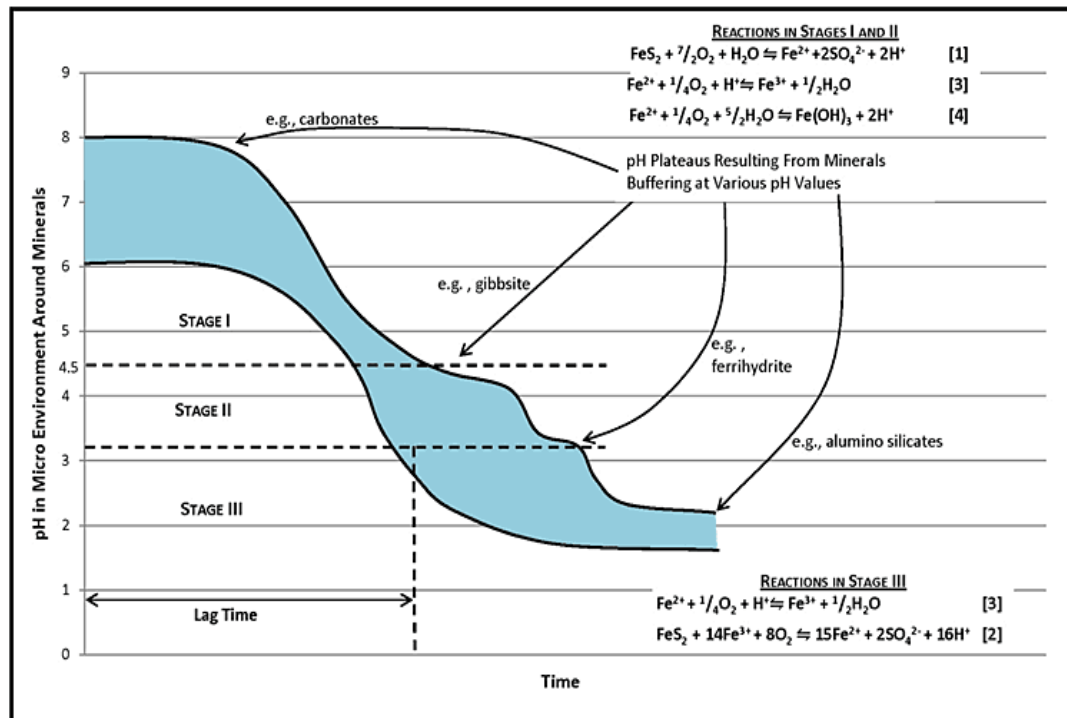


Figura 1.1: Etapas de la formación de aguas ácidas

Fuente: (Aduvire, 2006)

El *Thiobacillus ferrooxidans* oxida el ion ferroso a férrico que a su vez oxida a los sulfuros (pirita) produciendo más ácido. En este momento se producen grandes cantidades de ácido y se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

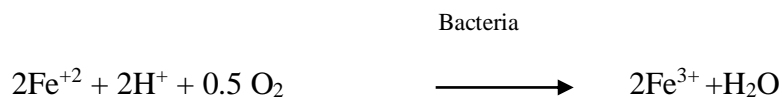
- El mecanismo más importante es el indirecto, ya que es el que se autocataliza (si se inhibe la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la producción de ácido se reduce al menos en un 75%).
- Si el pH del agua sube por encima de 5, igualmente se inhibe la oxidación.
- Si el pH del agua desciende por debajo de 4,5 debe esperarse que todo el sulfuro de hierro termine oxidándose.
- Si el pH desciende por debajo de 2,5 se establece un equilibrio en el que la actividad bacteriana se estabiliza, ya que habrá alcanzado su óptimo de desarrollo (la velocidad de reacción se habrá incrementado entre 105 y 106 veces respecto al mecanismo directo). (Morin, 2001)

### 1.1.1.2. Lixiviación bacteriana

Los microorganismos que se encuentran presentes en los procesos de lixiviación bacteriana se comportan como agentes catalizadores en la oxidación del ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) que durante el proceso de biolixiviación son convertidos a ion férrico ( $\text{Fe}^{+3}$ ) al igual que el azufre elemental que luego se convierte en ion sulfato. Los iones férricos son los agentes químicos oxidantes que se encargaran de disolver el sulfuro metálico. A lo largo de los años el proceso de biolixiviación bacteriana ha sido ampliamente estudiado, por lo que se han propuesto 2 mecanismos para estos procesos. (A. Ballester, 2001)

#### a) Lixiviación indirecta

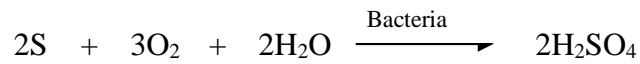
La oxidación del sulfuro metálico se realiza a través de los iones férricos sin mediar contacto entre los microorganismos y la superficie o alguna reacción enzimática, combinada con la oxidación biológica de los iones ferrosos en solución. (Watling, 2006)



Ecuación 1.7: Lixiviación indirecta

#### b) Lixiviación por contacto

La mayoría de las células se adhieren a la superficie de los minerales sulfurados mediante exo-poli-sacáridos (EPS), lo que se traduce en la disolución del mineral producto de los procesos electroquímicos que tienen lugar en la interfaz entre la pared del microorganismo y la superficie del sulfuro. (Watling, 2006)



Ecuación 1.8: Lixiviación por contacto

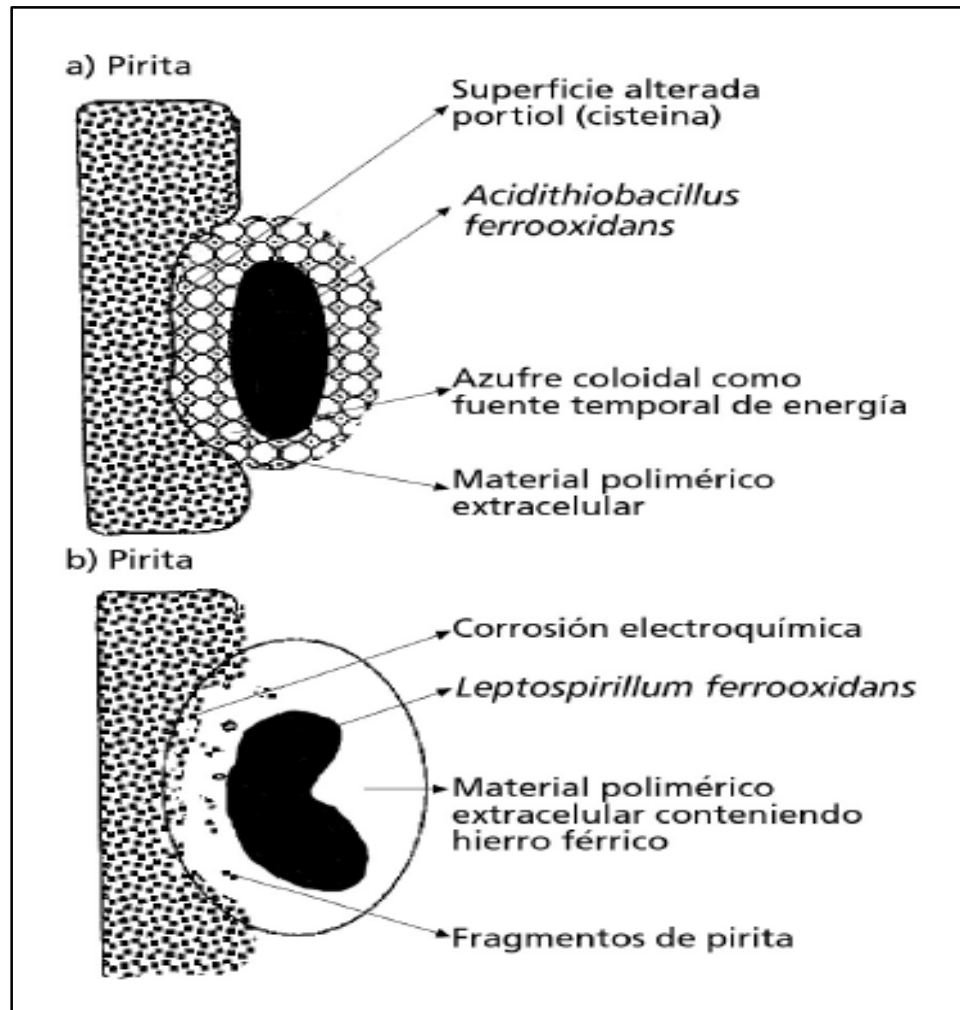


Figura 1.2: Esquema de los distintos tipos de lixiviación de un sulfuro

Fuente: (A. Ballester, 2001)

En los procesos de biolixiviación existe una infinita cantidad de microorganismos, estos se caracterizan por crecer quimiolitotróficamente en ambientes ácidos con pH menor a 3, con una elevada concentración de iones metálicos, a su vez estos microorganismos son capaces de utilizar el ion

ferroso o los compuestos de azufre reducido como fuente de energía, (Rawling, 1998)

Los microorganismos que están asociados a estos procesos de biolixiviación se pueden clasificar según la temperatura en la que desarrollan de mejor manera:

Tabla 1.2: Clasificación de los microorganismos según la temperatura en la que se desarrollan

<b>MICROORGANISMOS</b>	<b>TEMPERATURA</b>
Mesófilos	< 40 °C
Termófilos	40 °C – 55 °C
Hipertermófilos	55 °C – 85 °C

Fuente: (Brierley, 2000)

*At. ferrooxidans* es una bacteria del género *Acidithiobacilli*, mesófilas y se desarrollan en un rango de pH entre 1,8 y 2,0. Tiene habilidad para oxidar iones ferrosos en soluciones de ácido sulfúrico obteniendo la energía necesaria para crecimiento y fijación de CO<sup>2</sup>. Este microorganismo es útil principalmente para aplicaciones en la lixiviación de minerales debido a que puede oxidar sulfuros metálicos a sulfatos solubles en soluciones ácidas. La oxidación de materiales sulfurados es mediada por ion férrico el cual en la reacción es reducido químicamente a Fe<sup>2+</sup> y re oxidado por *At. ferrooxidans*. De esta forma durante el proceso de biolixiviación, *At. ferrooxidans* mantiene favorable la razón Fe<sup>3+</sup> / Fe<sup>2+</sup> el cuál se refleja en el relativamente alto potencial redox en la solución de lixiviación. Dentro del grupo de las bacterias mesófilas se encuentran también *At. thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilium*. En el rango de las termófilas moderadas aparece el *At. caldus*, *Leptospirillum thermoferrooxidans* y las

del género de *Sulfobacillus*. Finalmente, los principales microorganismos termófilos son las arqueas del género *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera* y *Sulfisphaera*, entre otras. (Rohwerder, 2003)

### 1.1.2. Características de los drenajes ácidos de mina

Se debe tener en cuenta que los drenajes de mina no siempre son ácidos, es por esto que independientemente de la fuente de donde se originen estos drenajes, se los puede dividir en 2 grandes grupos:

- Drenajes alcalinos o aguas residuales con bajo potencial de solubilización.
- Drenajes ácidos o aguas residuales con alto potencial de solubilización.

Teniendo en cuenta el pH del drenaje y los contenidos de metales o especies minerales presentes en el mismo, este puede agruparse en cuatro tipos: (Morin, 2001)

Tabla 1.2.: Clasificación de drenajes en función del pH y el potencial de acidez/alcalinidad

CLASE	pH	DESCRIPCIÓN
<b>Ácido</b>	< 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acidez generada por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros</li> <li>• Nivel de metales disueltos es mayor que en drenajes casi neutros</li> <li>• Asociados a minas metálicas, carbón y piritas</li> </ul>
<b>Alcalino</b>	>9 o 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos particularmente óxidos, hidróxidos y algunos silicatos</li> <li>• Niveles de algunos metales como el Al son mayores que en los drenajes casi neutros</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asociado con minería de diamantes, molienda de bauxita cenizas de combustión de carbón</li> </ul>
<b>Casi neutro</b>	6 – 9 o 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependiendo de la abundancia de los minerales, en determinados períodos pueden ser ácidos o alcalinos.</li> <li>• Concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos.</li> </ul>
<b>Otros</b>	Irrelevante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede afectar la concentración de metales.</li> <li>• Asociado a minería no metálica como: potasa, sales, boratos, bentonitas, gravas, arcillas, etc.</li> </ul>

Fuente (Morin, 2001)

El drenaje ácido de minas se caracteriza por:

- Valores de pH que oscilan de 1.5 a 7
- Niveles de alcalinidad decreciente y de acidez creciente
- Concentraciones elevadas de sulfatos
- Concentraciones elevadas de metales, especialmente Fe, Al y Mn
- Concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales: Alta conductividad eléctrica

Los drenajes de minas en operación o abandono generan problemas de contaminación y degradación de los ecosistemas, pudiendo llegar a extinguir la vida acuática. También imposibilita el uso de estas aguas para consumo humano, debido a su acidez y elevada concentración de metales disueltos como hierro, manganeso, aluminio, arsénico, selenio, cinc, níquel, y otros. Por otro lado, genera daños a las estructuras metálicas y de hormigón, así como la destrucción o desaparición de la vegetación y la fauna de los cauces naturales. (Morin, 2001)

## **1.2. Evaluación del Drenaje ácido minero DAM**

### **1.2.1. Test para evaluar el potencial de drenaje ácido minero**

El principal objetivo de la predicción ácida es determinar, en primer lugar, si un determinado volumen de material o residuo minero es potencialmente generador de acidez, esto se logra mediante la aplicación de una serie de ensayos, en segundo lugar, determinar la calidad de los drenajes teniendo en cuenta las condiciones medioambientales del lugar donde están depositadas las escombreras.

Se pueden realizar test estáticos y dinámicos para predecir la tasa de generación de drenaje ácido de residuos mineros y la calidad de lixiviados generados. A partir de esta información, es posible entonces definir los procedimientos para su adecuado manejo ambiental o evaluar el efecto del impacto ambiental que generan. (Zamora, 2003)

#### **1.2.1.1. Test estáticos**

Según (Zamora, 2003), los ensayos estáticos, se basan en la evaluación del balance entre el potencial de generación ácida (oxidación de minerales sulfurosos) y la capacidad de neutralización ácida (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). Son utilizados para el manejo ambiental de material estéril, deben incluir caracterización litología y caracterización mineral.

El objetivo de la prueba estática es caracterizar el potencial de generación de ácido de una muestra. Es el primer paso en todo programa de pruebas para determinar el potencial DAR. Estas pruebas se conducen de manera simple, rápida y con costos relativamente bajos. Muchas de estas pruebas pueden utilizarse para caracterizar el material y, a partir de ello, para seleccionar muestras que servirán para pruebas (cinéticas) posteriores.



Los minerales que producen ácido son, por lo general, minerales sulfurosos reactivos. Los minerales que consumen ácido son principalmente carbonatos, si bien los hidróxidos, silicatos y arcillas también pueden proporcionar potencial de neutralización. En teoría, una muestra será generadora neta de ácido sólo si su potencial para la generación de ácido excede a su potencial de neutralización. Las técnicas estáticas de predicción son útiles sólo para predicciones cualitativas del potencial DAR; no pueden utilizarse para predecir la calidad del agua de drenaje. Como su nombre lo implica, estas pruebas no están diseñadas para tratar las características geoquímicas que dependen del tiempo, las cuales controlan la calidad del agua de drenaje. Se requiere de las pruebas cinéticas para determinar la velocidad y magnitud de la oxidación y la generación de ácido, así como para la predicción de la calidad de agua. (Zamora, 2003)

Los principales pasos en las pruebas estáticas son:

- Análisis del contenido metálico de la muestra sólida
- Medición del pH en pasta.
- Determinación del contenido total de azufre y de las especies sulfurosas
- Titulación para la determinación del potencial de neutralización.

En esta etapa, con frecuencia, también se efectúan análisis geoquímicos de rocas enteras o análisis elementales en muestras seleccionadas, en combinación con los análisis mineralógicos. Sobre la base de la comprensión teórica y de pruebas en muestras similares, puede ser posible estimar, a partir de estas pruebas, el potencial relativo de liberación de metales; por ejemplo, si hay presencia de productos secundarios de intemperismo, los cuales se sabe que son solubles en ambientes ligeramente alcalinos o ácidos, la muestra podría generar potencialmente drenaje contaminado. (Zamora, 2003)

Inicialmente, se mide el pH en pasta de la muestra, para determinar si antes del análisis ha ocurrido generación de ácido, Por lo general, si el valor del pH es mayor que 8, la muestra probablemente contenga carbonatos reactivos; si

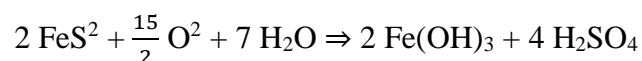
es menor que 5, probablemente haya habido generación de ácido en la muestra, o en el material circundante.

En una muestra, se mide el contenido total de azufre y las especies sulfurosas; luego, se calcula la acidez potencial máxima en la forma de ácido sulfúrico. Por lo común, el total de azufre se analiza utilizando un horno para determinar azufre tipo Leco. Las especies de azufre se precisan usando diferentes procedimientos de digestión y precipitación (Zamora, 2003)

### 1.2.2. Relación Ácido – Base

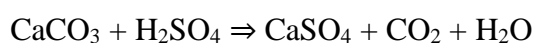
Una de las técnicas más utilizadas de análisis estático se encuentra la relación Ácido/Base, es un procedimiento sencillo utilizado para evaluar la generación o no generación de ácido, en rocas, materiales de mina, escombreras, etc.

Según (Aduvire, 2006), la producción ácida de un material se mide, por lo general, en función a la presencia de azufre en el mineral o muestra, que en el caso de la pirita tiene la siguiente reacción:



Ecuación 1.9: Reacción de la pirita

En la reacción anterior se asume la equivalencia de que se producen 2 moles de ácido ( $2\text{H}^+$ ) por cada mol de azufre (S), y estos  $2\text{H}^+$  pueden ser neutralizadas por compuestos básicos según la siguiente reacción:



Ecuación 1.10: Neutralización del ácido

Por lo tanto, una mol de azufre puede ser neutralizado por una mol de  $\text{CaCO}_3$ .

Como los valores de la producción ácida potencial (AP) de la muestra tradicionalmente se expresan en kg de  $\text{CaCO}_3$  por tonelada de material (t), se puede expresar de la siguiente forma:

$$AP = \frac{x}{1000} \times 1000\text{kg} \times \left[ \frac{\text{Peso molecular CaCO}_3}{\text{Peso atómico S}} \right]$$

Ecuación 1.11: Producción de Potencial ácido

La acidez potencial (AP) se determina mediante la multiplicación del contenido de azufre total (en porcentaje) o azufre en el sulfuro (dependiendo del ensayo y asumiendo una oxidación completa del azufre) de la muestra por un factor de conversión. Este factor se obtiene al considerar que  $X/100$  es el porcentaje de azufre (peso molecular del  $\text{CaCO}_3$  es 100 y el peso atómico del azufre es 32), reemplazando en la ecuación anterior tenemos:

$$AP = S\% \times 31,25 \text{ kg} \frac{\text{CaCO}_3}{\text{t}}$$

Ecuación 1.12: Potencial ácido

La neutralización potencial (NP) es una medida del carbonato disponible para neutralizar la acidez (carbonatos primarios, silicatos minerales y en menor grado algunos cationes intercambiables), su valor es determinado entre otros por el ácido añadido a la muestra y la cantidad de ácido consumido.

En drenajes de mina los ensayos estáticos solo predicen cualitativamente la capacidad de generar acidez, mediante la comparación entre la máxima

producción ácida o acidez potencial (AP) con la máxima neutralización potencial (NP).

Los ensayos estáticos solo predicen cualitativamente la capacidad de generar acidez por los drenajes de mina, mediante la comparación entre el máximo potencial de producción ácida o potencial de acidez (AP) con la máxima neutralización potencial o potencial de neutralización (NP). El AP es controlado principalmente por el tipo y contenido de sulfuros, sulfatos y metales que pueden hidrolizarse como Fe, Al y Mn. Mientras que el NP se considera los carbonatos y silicatos. (Benzaazoua, 2013)

Las unidades de NP, AP y NNP se suelen expresar en kilogramos, toneladas de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) por 100 toneladas de material (partes por mil). El potencial de neutralización neta (NNP) mide la acidez o basicidad de una muestra y se obtiene por diferencia entre el potencial de neutralización (NP) o alcalinidad total y potencial de acidez (AP) o acidez total.

$$\text{NNP} = \text{NP} - \text{AP}$$

Ecuación 1.13: Potencial de Neutralización

Las unidades de NP, AP y NNP se suelen expresar en toneladas de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) por 1000 toneladas de material.

Para evaluar si un residuo minero es generador de drenaje ácido se debe tomar en cuenta 2 criterios: (Benzaazoua, 2013)

### **Primer criterio**

Un residuo minero es considerado como generador de drenaje ácido si el valor del Potencial de neutralización es menor a  $20\text{kg CaCO}_3 / \text{t}$ . Con valores mayores

a 20 Kg CaCO<sub>3</sub>/t se puede decir que el residuo no es generador de drenaje ácido (Benzaazoua, 2013)

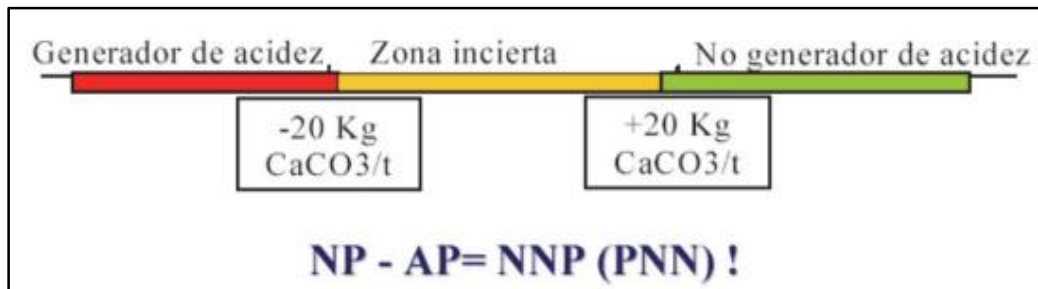


Figura 1.3: Primer criterio para evaluar el potencial de generación de ácido

Fuente (Carpio, 2015)

### Segundo criterio

Si la relación de Potencial Neutro/ Potencial Ácido es menor a la unidad, entonces el residuo puede ser considerado como generador de drenaje ácido, si dicha reacción es mayor a 3, entonces el residuo no es generador de drenaje ácido (Benzaazoua, 2013).

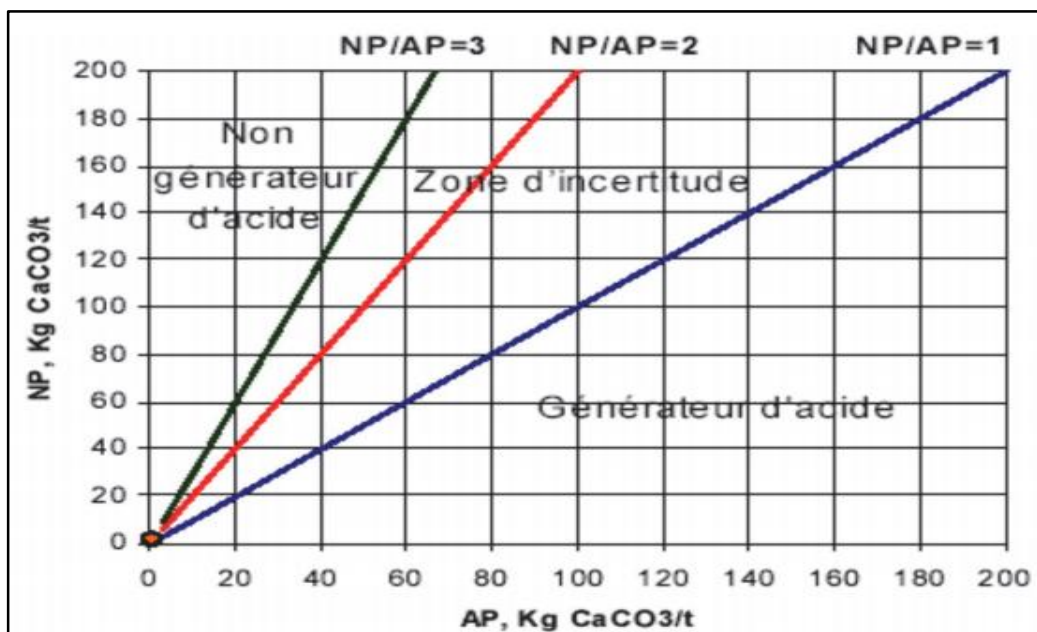


Figura 1.4: Relación de los potenciales de generar y consumir ácido

Fuente: (Carpio, 2015)

Se puede realizar una clasificación, en la que se indique en potencial ácido de las rocas que van a ser depositadas en las escombreras, se debe tomar en cuenta el contenido de azufre total expresado en porcentaje y la relación entre la máxima acidez potencial (MPA) y a su vez la capacidad de neutralización ácida (ANC). (Carpio, 2015)

Tabla 1.3: Clasificación ácido/base de rocas mediante ensayos estáticos

<b>TIPO ROCA</b>	<b>DE CLASIFICACIÓN</b>	<b>CONTENIDO TOTAL, DE AZUFRE (% S)</b>	<b>RATIO ÁCIDO/BASE (MPA:ANC)</b>
<b>I</b>	Potencial formador de acidez (Posible)	> 0.25%	1:1 o menos
<b>II</b>	Indeterminado (Incierto)	>0.25%	1:1 a 1:3
<b>III</b>	No forma acidez (Improbable)	<0.25%	1:3 o mas

Fuente: (Australia, 1997)

### 1.2.3. Test cinéticos

Las pruebas dinámicas o cinéticas, son un complemento de la información obtenida en las pruebas geoquímicas estáticas, predicen la tasa de producción de ácido y el desarrollo de la cantidad de drenaje en función del tiempo. (Benzaazoua, 2013)

Los test cinéticos, permiten modelar como se comportaría un mineral capaz de generar acidez en el tiempo, a través de estos, se puede conocer en cuanto tiempo se acidificaría un drenaje, a que valores de pH lograría llegar, si los microorganismos son capaces de proliferar en el material de estudio, y que metales

presentes en la roca podrían lixiviar; entre los test estáticos más comunes se encuentran las celdas húmedas, las columnas de lixiviación, y el test de British Columbia para determinación de crecimiento bacteriano (Chaparro, 2015)

Adicionalmente, se han venido implementado test a escala de campo para la predicción de los materiales generadores de acidez, ya que estos arrojan resultados más reales porque tienen en cuenta el régimen climático (periodos de verano e invierno), el tamaño del mineral es el proveniente de la mina, con lo cual se minimizan errores por disminución de tamaño en la trituración necesaria para los test de laboratorio en donde se aumenta la superficie de contacto entre la muestra y el agua, la temperatura es la del sitio donde se desarrolla la mina, ya que se ha visto que a temperaturas controladas de laboratorio (22°C), que generalmente son mayores a las insitu, se incrementa la velocidad de oxidación de los sulfuros. (Plante, 2003)

- Miden tasas de oxidación y lavado de metales
- Sirve para predecir química del agua
- Validar los resultados de las pruebas estáticas
- Determinar el comportamiento de lixiviación
- Simular las condiciones del sitio
- Evaluar el grado de oxidación
- 7Evaluar los productos almacenados
- Predecir calidad del agua
- Producir datos para el modelado
- Seleccionar medidas de control

El paso inicial en una prueba cinética es la definición de las características adicionales del material, a aquellas evaluadas en las pruebas estáticas. Estas características son importantes para la interpretación de los resultados de las pruebas cinéticas y para la predicción de la calidad del agua de drenaje.

Antes de iniciar una prueba cinética, se recopilará la siguiente información clave:

- Tipo de roca.
- Mineralogía
- Distribución del tamaño de partícula

Durante la prueba, deberá observarse tanto en el lixiviado, como en la roca, lo siguiente:

- Química del lixiviado
- Color del lixiviado
- Precipitados en la celda o en el lixiviado

Los resultados de los análisis semanales del agua de lavado del lixiviado indicarán los cambios en la solución y en la química del sólido, ocurridos a partir de la recolección anterior. Las velocidades y secuencia de oxidación relativas serán indicadas por los cambios en el pH y conductividad, así como por los cálculos de velocidades de producción de sulfatos, acidez, alcalinidad y metales disueltos, calculados en términos de peso y/o área superficial de la muestra.

Entre la información que deberá tabularse por cada ciclo, se encuentra la siguiente:

- Descripción de la muestra, número de ciclo, duración y volumen de lixiviado
- Lecturas o concentraciones de todos los parámetros medidos
- Acidez y alcalinidad calculadas, producción de sulfato.
- Producción acumulada de acidez, alcalinidad y metales
- Producción acumulada de sulfato



Por lo general, esta información también se presenta gráficamente como una función de tiempo o número de ciclo, para indicar las tendencias y velocidades de producción.

#### **1.2.4. Columnas de lixiviación**

El objetivo de este método de prueba es proporcionar un método de laboratorio que prediga con mayor precisión la calidad del agua de drenaje (no sólo el potencial de generación de ácido) de roca, incluyendo botaderos de minas subterráneas y de minas de tajo abierto, pilas de lixiviación y paredes de cantera. La prueba simula con mayor exactitud las condiciones que controlan el drenaje ácido de mina en el campo, entre otras: (Robertson, 1989)

- La distribución representativa del tamaño de partícula del material en evaluación, que puede ser escalada para una distribución (de la partícula con diámetro -10 cm) en el botadero de desmonte.
- La variabilidad de mineralización de sulfuro y carbonato, la exposición del área superficial y la distribución física presentes en el botadero
- La geoquímica de zonas localizadas de roca y su variabilidad en la escala representada por partículas de roca más grandes (en una escala de pocos centímetros o más)
- Las pruebas representativas de la naturaleza física y geoquímica del botadero propuesto (por ejemplo, la exposición de área superficial por tamaño de partícula, la exposición mineralógica del área superficial), presente a lo largo de las rutas de flujo discretas, sujetas a variaciones en el flujo de filtración y que son características de lo que ocurriría en el campo
- La predicción de la calidad del agua de drenaje de un botadero de desmonte, considerando:
  - Las zonas individuales y los tipos de roca en el botadero
  - Las reacciones a lo largo de la ruta del flujo de drenaje, incluyendo la concentración o carencia de productos dar,
  - La calidad de drenaje resultante de la filtración a través de una combinación de zonas individuales en el botadero,

- El rango estacional de las concentraciones que resultan de las velocidades de flujo variadas, períodos húmedos y secos y almacenamiento de productos de oxidación en el botadero
- El diseño de pruebas para establecer la naturaleza de consumo/generación de ácido del material y el suministro de datos para la predicción de la calidad del drenaje en un periodo razonable de tiempo. (Robertson, 1989)

Las pruebas de columna se conducen utilizando una variedad de materiales, como plástico PVC, que se llenan con las muestras hasta un cierto nivel o con un cierto peso, en base a los objetivos específicos del programa. En general, se coloca una cantidad conocida del material en la columna y se hace correr agua destilada o solución acuosa, a través de la muestra, o se empoza en la parte superior de ésta y se permite que drene con el tiempo. Periódicamente, se recolectan muestras de agua, del agua de lavado o de la porción sobrenadante, las cuales se analizan químicamente. También, se pueden instalar ventanas de muestreo a intervalos, a lo largo de la columna, para muestreo intermedio. (Robertson, 1989)



Figura 1.5: Columnas de lixiviación

Fuente: (Salas, 2014)

## CAPITULO 2

### 2.1 MARCO REFERENCIAL

#### 2.1. Datos generales

##### 2.1.1. Ubicación de la zona de estudio

El proyecto Loma Larga se encuentra ubicado en el sur de Ecuador en la Cordillera Occidental de los Andes, en la provincia de Azuay, a unos 480 km al sur de la capital de Quito y a unos 30 km al suroeste de la ciudad de Cuenca.

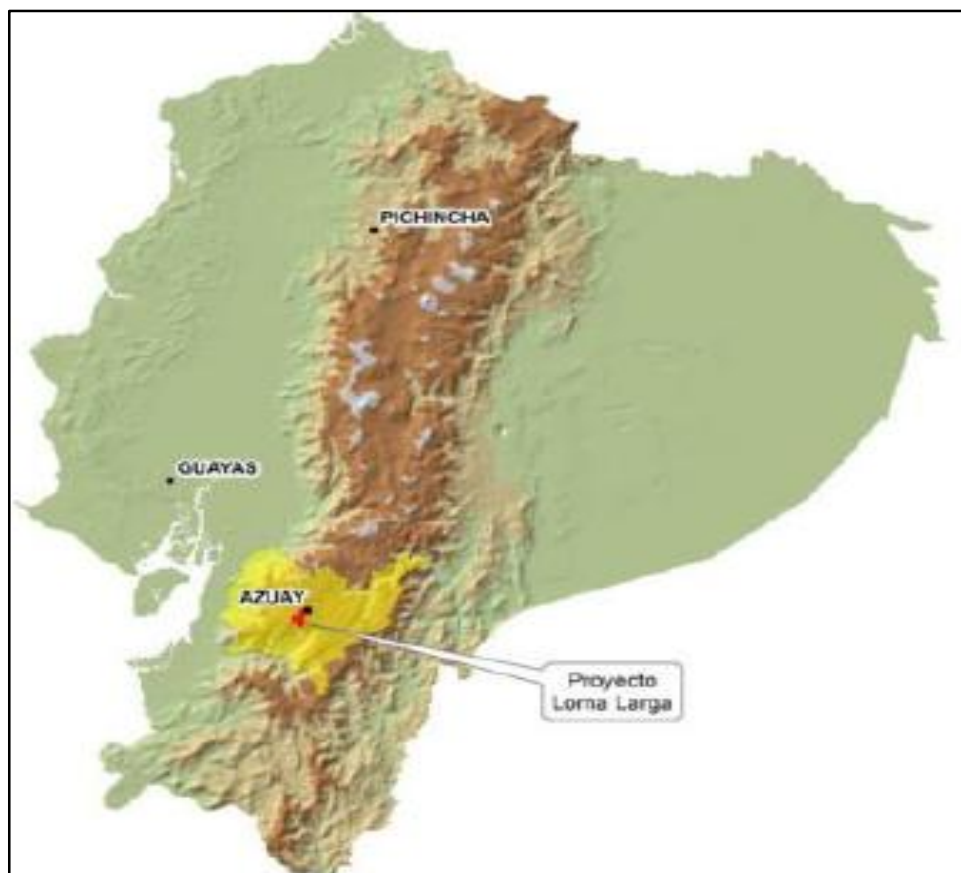


Figura 2.1: Mapa de ubicación de proyecto minero Loma Larga

Fuente (Robson, 2016)

El proyecto minero consta de tres concesiones mineras (Cerro Casco, Río Falso y Cristal) con un área de 8,000 hectáreas. El acceso se realiza a través 40 km de camino pavimentado desde Cuenca hasta la ciudad de San Gerardo y 18 km de camino de ripio. Loma Larga se encuentra a una altura de 3,500 a 3,900 m sobre el nivel del mar. (INV, 2015)

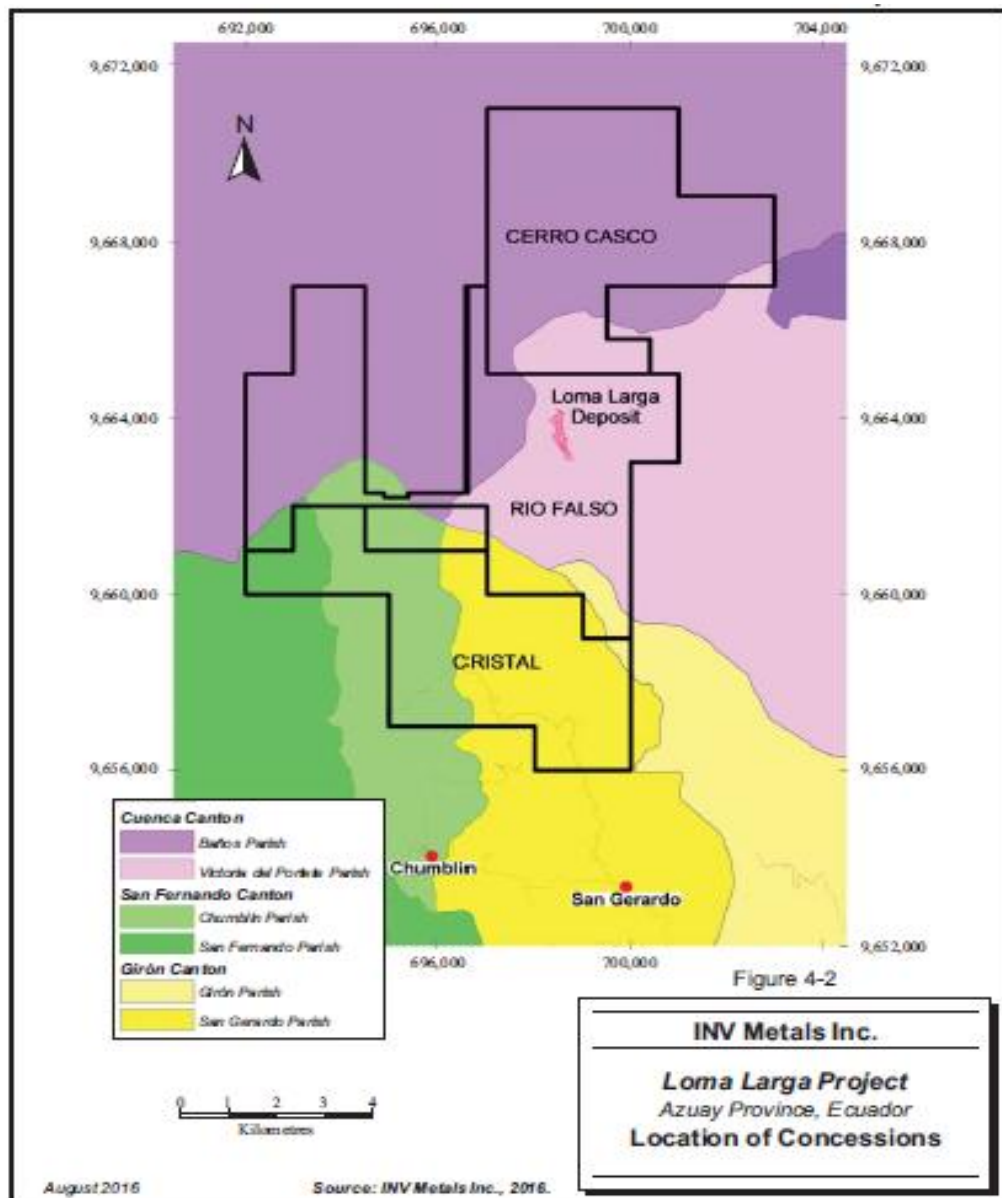


Figura 2.2: Ubicación de las concesiones del proyecto minero Loma Larga

Fuente: (Robson, 2016)

### 2.1.2. Clima

Según (Robson, 2016), teniendo en cuenta que el proyecto minero Loma Larga se ubica en una zona de páramo su clima es característico de estas zonas, las precipitaciones son uniformes y promedian entre 1,060 mm y 1,600 mm por año, las precipitaciones más intensas se producen en los meses de noviembre y marzo. Para realizar la caracterización de la velocidad de viento dentro del proyecto Loma Larga se recopilieron los datos de una estación meteorológica que se encuentra dentro del proyecto, en el periodo de julio a septiembre se pueden presenciar altas velocidades de viento, la velocidad media máxima fue registrada en julio del 2009 siendo esta de 7 m/s. las velocidades medias diarias se encuentran entre 2.5 m/s a 4.75 m/s, el viento posee una dirección predominante que va desde oeste a este.

Las laderas occidentales del Ecuador están influenciadas por el clima de la costa del Pacífico, resultado de la variabilidad de precipitación espacial y temporal. Por lo que el clima está influenciado por el régimen de la costa del Pacífico, el continente y las masas de aire del este del Atlántico tropical. (OCHOA, 2013)



Figura 2.3: Clima característico del proyecto minero "Loma Larga"

### 2.1.3. Temperatura

Por encontrarse en una zona de páramo las temperaturas son muy bajas, usualmente pueden variar entre 2.2 °C y 17.1 °C, aunque se han registrado temperaturas por debajo de los 0 °C, siendo el mes más cálido el de diciembre y el más frío en agosto, el pico más alto de temperatura y a su vez de radiación que se registra en el día se encuentra entre las 12:00 pm y las 3:00 pm, y las más bajas se encuentran entre las 3:00 am y las 6:00 am. (Robson, 2016).

La humedad media relativa de la zona es de 90.3%, mientras que la humedad máxima relativa del año es de 99.8% y la humedad mínima relativa es de 81.8%. El valor promedio de radiación es de 123,31 W/m<sup>2</sup> y los valores máximos oscilan entre 261.46 W/m<sup>2</sup> y 304.83 W/m<sup>2</sup> en la época de verano mientras que los valores mínimos están entre 39.69 W/m<sup>2</sup> y 51.75 W/m<sup>2</sup>.

La nubosidad es de alrededor de 7/8 durante todo el año, y los valores mínimos de nubosidad se dan durante el mediodía con valores medios anuales de 4/8. Los meses de menor nubosidad se relacionan con los meses de menor precipitación, es decir, entre agosto, septiembre y diciembre, donde la nubosidad es de alrededor de 3/8. A lo largo del día la nubosidad en la zona puede variar bruscamente, durante el mediodía puede alcanzar valores de hasta 1/8, llegando hasta valores de 8/8 en horas de la tarde. Los valores promedio de la humedad atmosférica son máxima 99.85% media de 95.23% y la mínima es de 82.20%.



Figura 2.4: Clima del proyecto Loma Larga

#### 2.1.4. Geología

El proyecto minero “Loma Larga” se encuentra ubicada en la parte sur de Chaucha, que se encuentra entre dos fallas principales, la falla de Gañarín y de Girón, y esta predominantemente sustentada por la formación del Mioceno superior de Quimsacocha, que se compone de tobas y lavas alternas de andesita, así como de domos félsicos tardíos, brechas relacionadas con el colapso, y sedimentos de diatrema. Una estructura de caldera colapsada, de cuatro kilómetros de diámetro, se encuentra a lo largo de la falla de Gañarín y sigue a 400 m al oeste de la mineralización principal de Loma Larga. La caldera está cortada por un diatrema de fases múltiples. (INV, 2015)

El margen occidental del Ecuador está relacionado a la subducción oblicua del slab de la placa de Nazca, que incluye la cordillera de Carnegie de 400 km de ancho y 2 km de alto, el sistema de rift de Malpelo y la zona de fractura de Grijalva por debajo de la placa Sudamericana. La subducción dio origen a la cordillera de los andes que continuamente produce movimientos sísmicos y volcanismo. (François Michaud, 2009)

Parte de la corteza oceánica de la antigua placa Farallón está siendo subducida en el golfo de Guayaquil al sur de la zona de fractura de Grijalva; es así que el Ecuador posee cuatro regiones naturales caracterizadas cada una de ellas por sus diferentes eventos evolutivos en su determinado ambiente y cinco regiones litotectónicas; tratándose en este caso de la cuenca intramontana

La influencia del golfo de Guayaquil da lugar a el desplazamiento a lo largo de la megafalla Guayaquil-Dolores. Esta megafalla con rumbo Andino N-S, parte desde el golfo de Guayaquil y corre a lo largo de la cordillera occidental de los Andes del Ecuador, Colombia y el Caribe. Indica un desprendimiento del bloque norte andino que con movimiento dextral se desplaza hacia el norte a una tasa de aproximadamente 0.6-1 cm/año. En este contexto geodinámico se desarrolló el yacimiento Loma Larga.

2.1.4.1. Geología regional

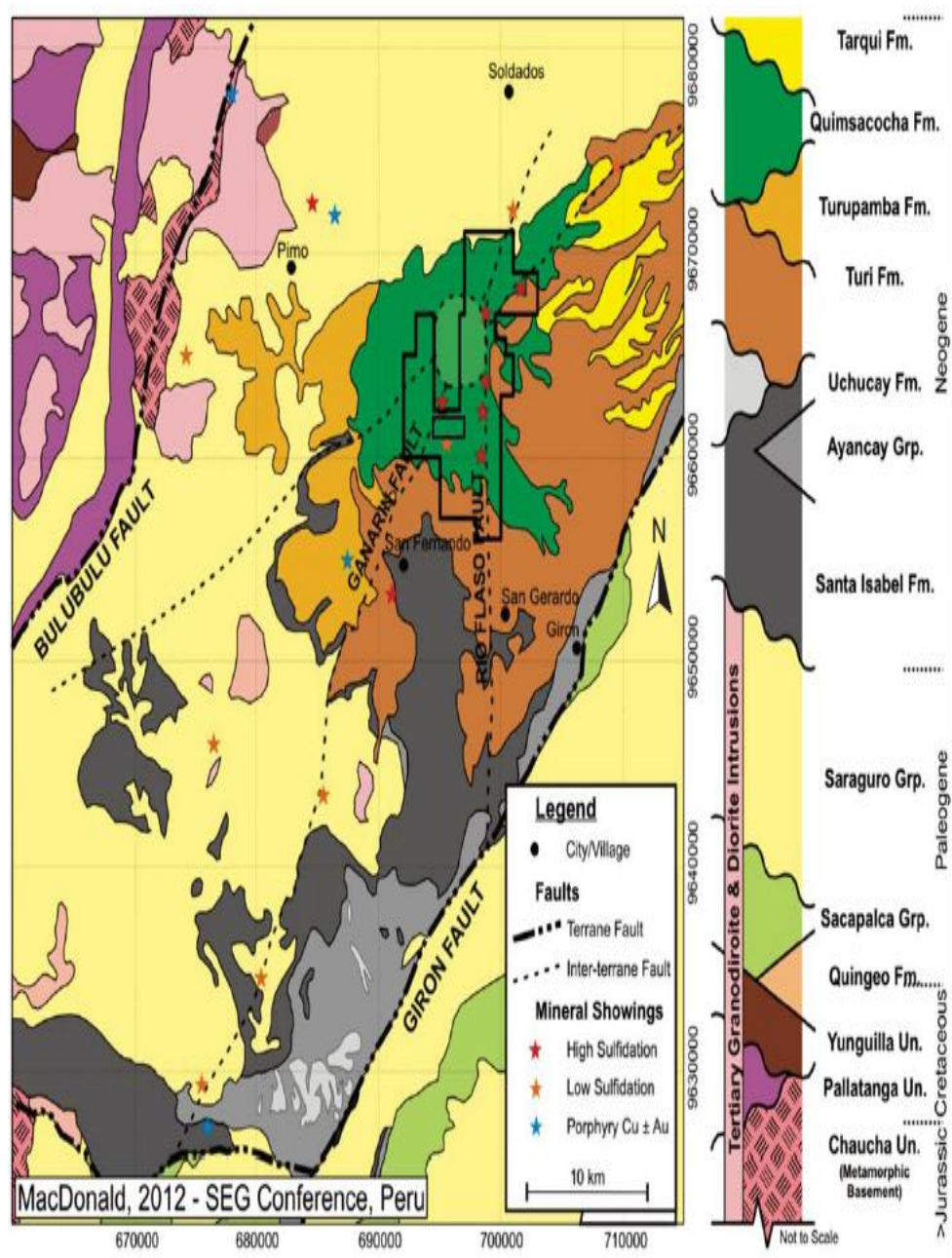


Figura 2.5: Geología regional del proyecto minero Loma Larga

Fuente: (INV, 2015)

El yacimiento minero de Loma Larga, es un sistema epitermal, con mineralización de oro, plata y cobre. Está ubicado geológicamente en el valle interandino, en la región geotectónica del terreno Chaucha–Guamote,



delimitada tectónicamente por el sistema de fallas Bulubulu-Pallatanga-Pujilí-Calacalí al oeste y por el sistema de fallas Naranjo-Portovelo, Girón-Peltetec al este; con dirección NE-SO (Quinto, 2018).

Según Quinto, 2018. El basamento probablemente son rocas metamórficas y lajas de origen oceánico de edad paleozoica y jurásica, cubiertas de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias de ambiente de arco magmático continental además existen intrusiones tempranas del oligoceno. Formación Turi.

Al sur del yacimiento minero entre (9658658 N; 697986 E), aflora como un bloque N-S, litológicamente la unidad presenta brechas con clastos policmíticos, subangulosos, silicificados de 1-10 cm, en una matriz fina consolidada. En las coordenadas (9657995 N; 697121 E) se ha identificado depósitos típicos relacionados a la presencia de un estrato volcán (Quimsacocha); formado por depósitos laharíticos y flujo de detritos. Una datación realizada para esta unidad por trazas de fisión demuestra una edad del Mioceno Tardío. (Michael Steinmann, 1999)

#### **2.1.4.2. Formación Quimsacocha**

Las rocas de la formación Quimsacocha están expuestas en toda la zona de estudio, suprayace a la Formación Turi alrededor de la caldera de Quimsacocha. Entre las coordenadas (9658379 N; 698239 E) aflora un flujo de lavas al margen izquierdo de la quebrada Alumbre. Las lavas son de composición andesítica con alteración argílica. La litología está formada por lavas y estratificación de tobas. Autores infieren una edad del Mioceno tardío o más joven. (Michael Steinmann, 1999)

### 2.1.4.3. Geomorfología

El Proyecto Loma Larga se encuentra en un terreno de elevaciones que varían entre 3700 y 3800 m.s.n.m en su mayoría, siendo la montaña más alta el Cerro Casco, con una altura de 3969 m.s.n.m.

Una antigua caldera volcánica está ubicada entre 3650 y 3850 m.s.n.m., tiene una forma circular de aproximadamente 4 Km. de diámetro, es una planicie con pendientes no mayores a 5°, mayormente se encuentran zonas de pantanos, con pequeñas elevaciones en la parte central, no mayores a los 3.770 m.s.n.m., los bordes de la caldera están constituidos por flujos de lava de forma radial y composición andesítica, de no muy pronunciada pendiente, hacia el norte se encuentra el Cerro Casco, siendo el borde norte de la caldera más alto que el sur.

En zonas como: Cerro Casco, Loma Costillas, se presenta una morfología con 15 pendientes casi verticales, donde se pueden observar escarpes. En el sector abundan los depósitos tipo morrénico. El sistema hidrográfico se encuentra formado principalmente por un conjunto de lagunas de origen glacial.

El conjunto de ríos que se originan en el área forman una cuenca de drenaje radial, esta forma se caracteriza por una red circular con canales que proceden de un punto elevado y corren hacia una corriente principal que circula alrededor de la base de la elevación. Esta red de drenajes está compuesta por las quebradas de Sayacu y Gulag, en dirección Noreste para unirse con otros ríos y formar parte del Yanuncay. Las quebradas de Aguarongopamba (NW-SE), Quinuahuaycu (NW-SE), Calloancay (NW-SE), Cristal (N-S), Río Falso (N-S), Zhurucay (N-S) y Lluchir (N-S) pasan a formar parte de la corriente colectora principal conformada por el río Girón-Tarqui. Esto forma una topografía predominantemente ondulada con pendientes entre 30° - 35° y valles en forma de “U”.

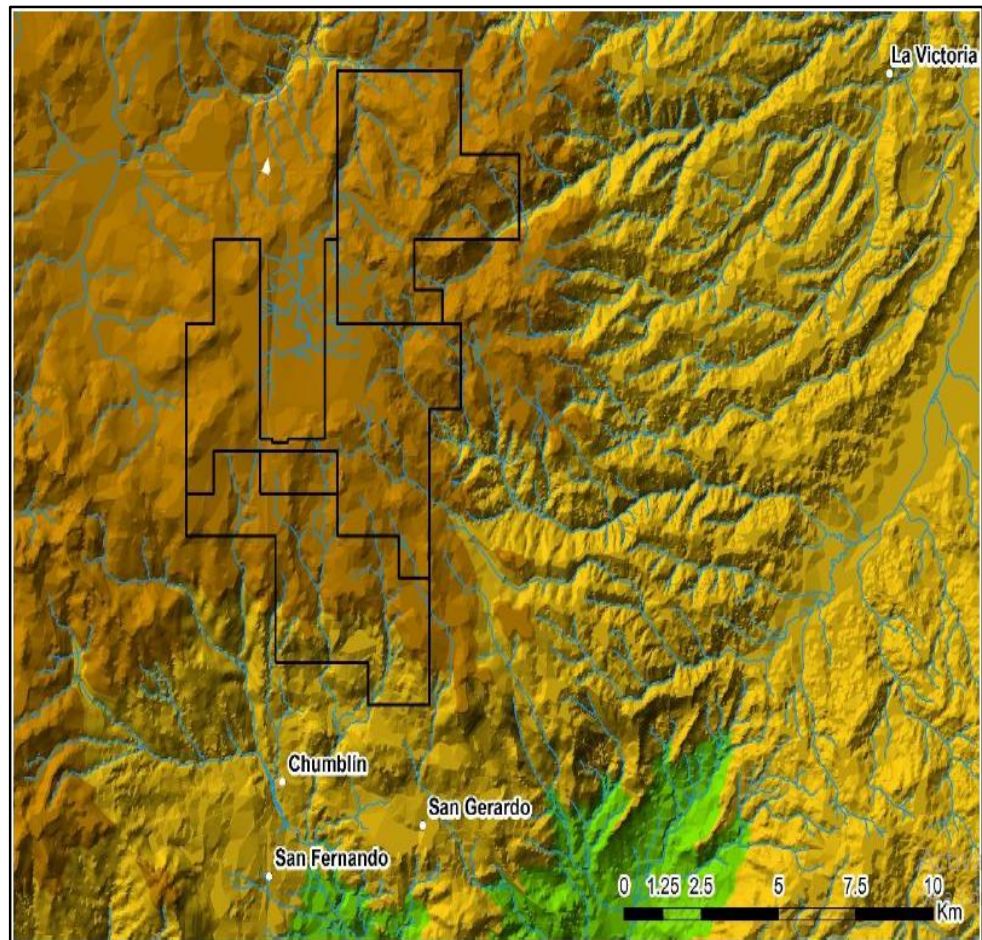


Figura 2.6: Mapa Geomorfológico e Hidrográfico

Fuente: (INV, 2015)

#### 2.1.4.4. Mineralización

Proyecto Loma Larga es un sistema epitermal de alta sulfuración con una mineralización de oro, plata y cobre, esta se formó por inyecciones de multifasicas fluidos hidrotermales controladas litológicamente y estructuralmente. La actividad mineralizadora de alteración se caracteriza por una fase de alteración temprana por una entrada fuerte de fluidos volátiles y ácidos que se enfriaron progresivamente y fueron neutralizados por su reacción con la roca de caja, esto dio lugar a capas silicificadas rodeadas por halos de alteración de minerales arcillosos. Los sulfuros y minerales de ganga asociados con la mineralización fueron depositados por fluidos posteriores dentro de los cuerpos silicificados. (Robson, 2016)

En la zona norte del cuerpo mineral se encontró una mineralización que contiene principalmente pirita, vestigios de enargita, baritina y oro. Hacia el sur, en el área de Río Falso, se encuentra la presencia de cinabrio, estibina, barita y pirita, mientras que en el norte de las áreas de Cerro Casco y Costillas se encuentran rastros de cinabrio y pirita.

Según Robson, 2016, la mineralización epitermal de alta sulfuración de oro, cobre y plata en el depósito del proyecto también se controla estratigráficamente como ocurre en los contactos litológicos entre lavas y tobas andesíticas de la formación Quimsacocha y alcanza mayor espesor en las tobas más permeables.

La forma del cuerpo mineral es plana, con una pequeña inclinación hacia el oeste, tiene una longitud de norte a sur de 1600 m y una potencia de 120 a 400 m de este a oeste. También, desciende ligeramente hacia el norte de modo que la zona mineralizada está más cerca de la superficie en el extremo sur.

Las zonas mineralizadas se caracterizan por tener brechas múltiples y eventos de llenado en espacios abiertos y sulfuros tales como pirita, enargita, covelita, calcopirita y luzonita, en estados de alteración más bajos, tenantita y tetraedrita. Los intervalos de mayor grado de sulfuración suelen coincidir con mayor cantidad de enargita, barita y una intensa brecha hidráulica que contiene fragmentos redondeados y silicificados. También el oro visible es muy raro (Robson, 2016).

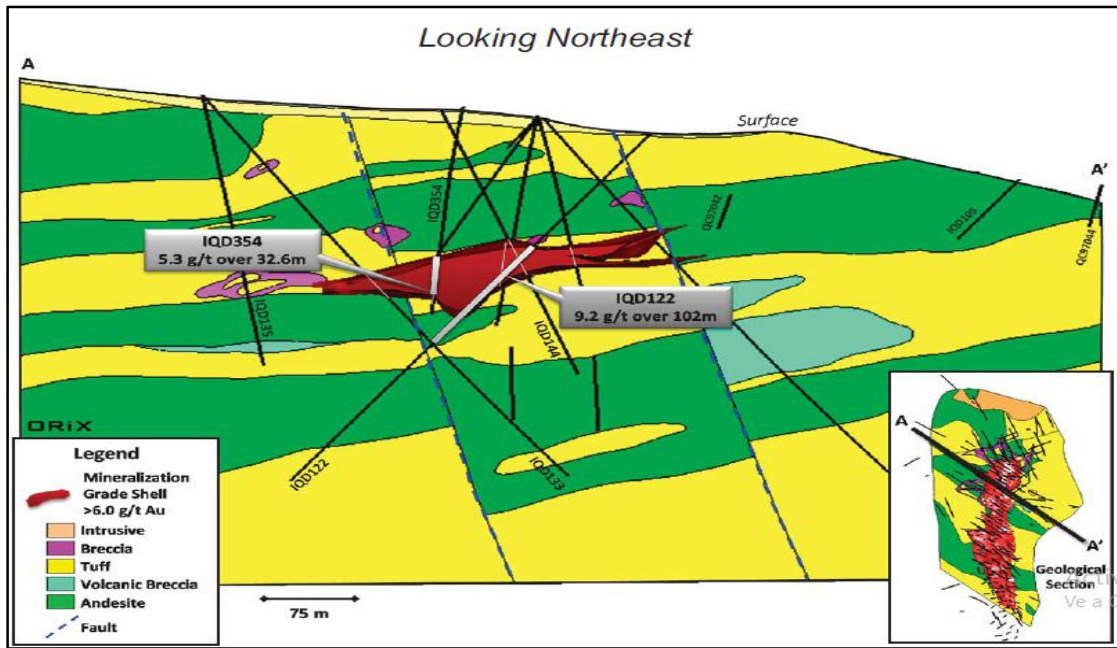


Figura 2.7: Sección transversal del depósito Loma Larga

Fuente: (Robson, 2016)

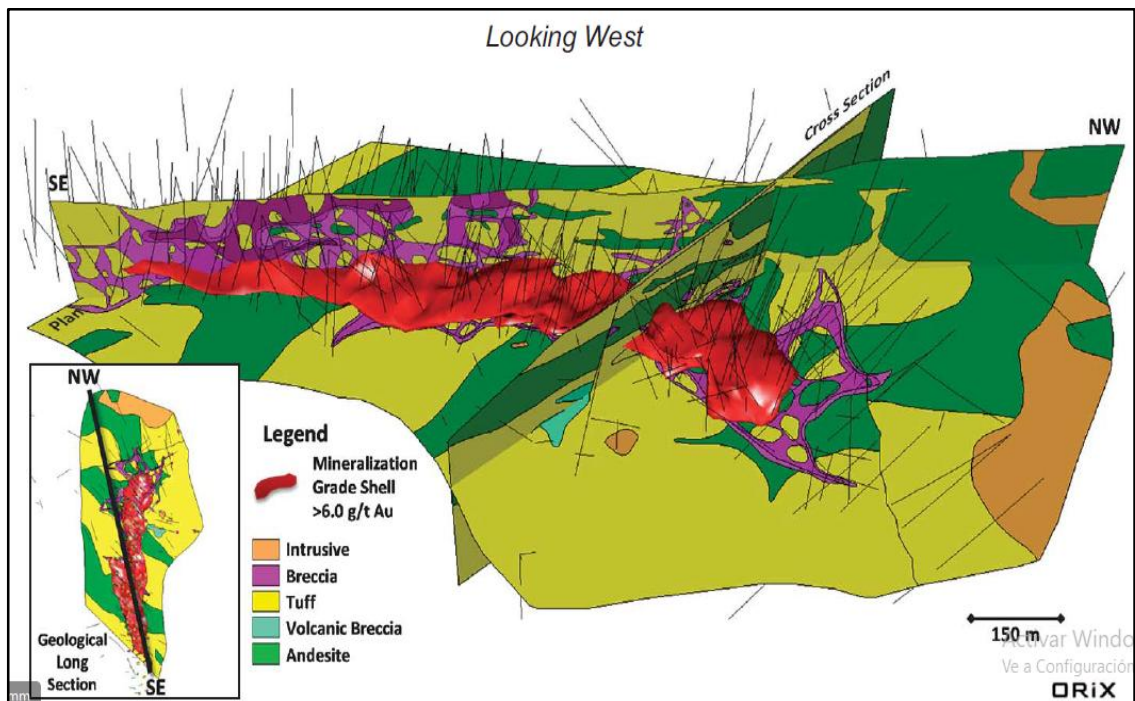


Figura 2.8: Sección longitudinal del depósito Loma Larga

Fuente: (Robson, 2016)

## CAPITULO 3

### DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

Este trabajo tiene como finalidad la aplicación de test estáticos y dinámicos para determinar la forma en la que se genera el drenaje ácido de mina a través de un periodo de tiempo. Se utilizará material (rocas) del proyecto minero “Loma Larga”, con una densidad de  $2.45 \text{ gr/cm}^3$  en un total de 10 kg los procesos a los que se sometieron los materiales se encuentran detallados a continuación.

Los test estáticos consisten en el análisis del potencial ácido y de neutralización de los materiales a analizar que en este caso serán tres: alimento, concentrado y relave. Esto permitirá una clasificación primaria de los materiales de acuerdo a su capacidad de generar o no ácido. Los análisis de PA y PN se realizaron en el laboratorio de química de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, mediante titulación potenciométrica evaluando el consumo de ácido de una muestra.

Para la realización de test dinámicos se crearon columnas de lixiviación que simularan condiciones iguales a los procesos de meteorización a los que se exponen los materiales en la vida real, con el fin de analizar el comportamiento del pH, Eh y la conductividad.

#### **3.1. Preparación de la muestra**

##### **3.1.1. Preparación mecánica**

El material traído del yacimiento del proyecto “Loma Larga” se sometió a varios procesos de preparación mecánica, primero por la trituradora de rodillos, segundo por la trituradora de mandíbulas y finalmente por el molino de bolas, obteniendo un material muy fino de un tamaño aproximado a 0.3 pulgadas.



Figura 3.1: Trituradora de mandíbulas



Figura 3.2: Molino de bolas

### 3.1.2. Tamizaje

El tamaño de partícula del mineral es un parámetro importante en el proceso de flotación. Se han encontrado diversos trabajos que reportan el efecto del tamaño de partícula en la recuperación del mineral valioso. Estos indican que la eficiencia del proceso de flotación se ve impactada negativamente cuando se opera en los extremos, es decir, con partículas finas ( $250\ \mu\text{m}$ ). Por ejemplo, en la flotación de minerales de fosfatos en celdas convencionales el rango óptimo de partícula suele estar en fracciones entre  $>45\ \mu\text{m}$  y  $<250\ \mu\text{m}$ . (Concha, 2015)

La flotación de cobre no está ajena a este fenómeno, (Bulatovic, 2007) presenta un estudio realizado en tres plantas concentradoras en América del Sur. La Figura 3.3 muestra la influencia del tamaño de partícula en la recuperación de cobre. Se observa que en las fracciones de partículas finas ( $150\ \mu\text{m}$ ) la recuperación de cobre también es menor al 50%. Lo mismo es mencionado por (Jameson, 2013), quien indica que la recuperación de partículas mayores a  $150\ \mu\text{m}$  es deficiente cuando se utiliza celdas convencionales, a pesar que dichas partículas pudiesen estar adecuadamente liberadas para ser flotadas.

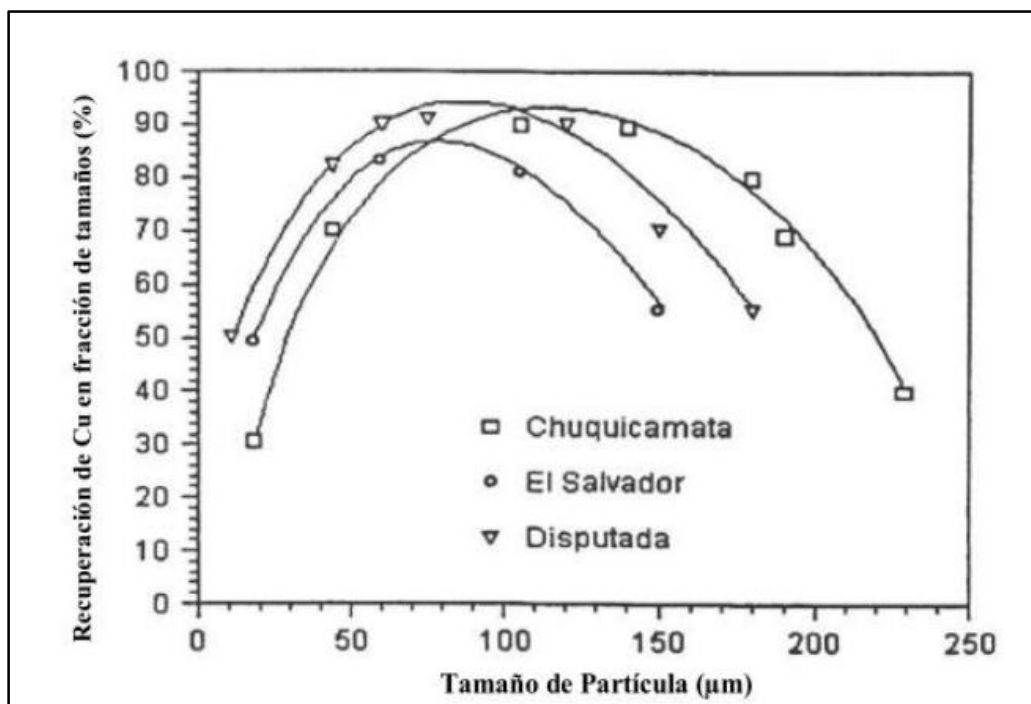


Figura 3.3 Recuperación de cobre en fracciones de tamaños en diferentes plantas concentradoras

Fuente (Concha, 2015)



Es por lo antes mencionado que para poder realizar la flotación del material es necesario que el material sea muy fino, en este caso se trabajó con un material que tiene que pasar malla #100, es por eso que todo el material triturado que se obtuvo del molino de bolas fue sometido a un proceso de tamizaje, para asegurar que se trabaje con el material que cumple las condiciones para posteriormente ser utilizado en flotación.



Figura 3.4: Agitadora Ro – Top

### 3.1.3. Flotación

El proceso de flotación se realizó en una celda tipo DENVER que es la que se encuentra en el laboratorio de la escuela de Ingeniera en Minas. Se utilizaron

- 600 gr de material
- 900 cm<sup>3</sup> de agua
- 4 gotas de espumante ER-370
- 6 gotas de Xantato Amflico de Potasio Z-6

- El tiempo total de cada flotación con estas dosificaciones fue de aproximadamente 15 minutos.
- En cada circuito de flotación se obtenían aproximadamente
  - 800 gr de concentrado en pulpa
  - 1.63 kg de relave en pulpa



Figura 3.5: Celda de flotación DENVER

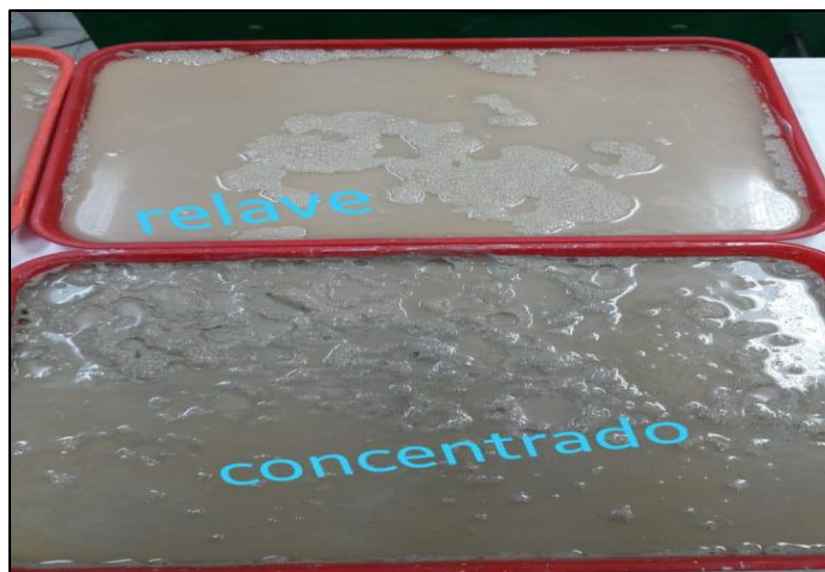


Figura 3.6: Productos de la flotación



Figura 3.7: Proceso de secado del producto de flotación

El material obtenido de la flotación se sometió a un proceso de secado aproximadamente de 5 a 6 días, posteriormente se procedió a realizar un proceso de homogenización de todo el material ya secado para poder ser colocado en las columnas.



Figura 3.8: Homogenización del material

Después de haber realizado todos los procesos previos a la obtención de la muestra que va a ser analizada, se puede proceder a hacer los test estáticos y los test dinámicos.

### 3.2. Test Estáticos

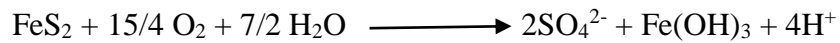
Constituyen el primer acercamiento para una acertada predicción del DAM, éstos comparan el potencial de producción de ácido de la muestra (PA) con el potencial de neutralización (PN). Tanto el análisis del potencial ácido (PA) como del potencial de neutralización (PN), serán realizados en los laboratorios de química de una Facultad de Ciencia y Tecnología, para los 2 análisis se utilizará un potenciómetro marca JENWAY modelo 3510.



Figura 3.9: Potenciómetro utilizado para realizar los análisis de PA y PN

### 3.2.1. Potencial ácido

El PA es determinado multiplicando por un factor de conversión que proviene del balance de la ecuación global:



Ecuación 3.1: Ecuación Global

Por cada mol de pirita (equivalente a  $2 \times 32.065 = 64.13$  g de azufre) se generan protones (equivalentes a 2 moles de ácido sulfúrico). Luego, considerando que para neutralizar 2 moles de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  se requieren 2 moles de  $\text{CaCO}_3$  (equivalentes a 200 g), el valor de PA (expresado en kg equivalente de  $\text{CaCO}_3$  por tonelada de material) será: (Bahamóndez, 2012)

$$\text{PA} = 31,25 * \% \text{ Sulfuro}$$

Ecuación 3.2: Determinación del potencial ácido

Tabla 3.1: Potencial ácido

	<b>%Sulfuro</b>	<b>PA</b>
Alimento	1.8690706	60.2775282
Concentrado	2.599512	83.83426336
Relave	2.2557749	72.74874093

### 3.2.2. Potencial de neutralización

El análisis del potencial de neutralización se realizó mediante pruebas por duplicado es decir se hicieron 2 pruebas para cada muestra de material, en total se analizarán 6 muestras, 2 para alimento, 2 para concentrado y 2 para relaves, para realizar el análisis del potencial de neutralización se preparó en un Erlenmeyer una solución de 10 g de muestra y 100 ml de agua destilada, para sacar el peso de la muestra al igual que en el test anterior se realizó por medio de diferencia de pesos en la balanza analítica, con este método aseguramos obtener los valores exacto de cada una de muestras. Se obtuvieron los siguientes pesos para cada muestra:

Tabla 3.2: Peso exacto de la muestra utilizada para la determinación de PN

	<b>Alimento</b>	<b>Alimento</b>	<b>Concentrado</b>	<b>Concentrado</b>	<b>Relave 1</b>	<b>Relave 2</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>		
<b>Peso vacío</b> (gr)	64.63976	63.27115	62.30944	63.90666	64.88882	63.55273
<b>Peso Lleno</b> (gr)	74.66932	73.31815	72.00771	73.98506	74.97584	73.62733
<b>Peso Total</b> (gr)	10.03	10.05	9.70	10.08	10.09	10.07

La solución se dejó reposar por 15 horas, una vez terminado este proceso, se procedió a filtrar y aforar con agua destilada a 100 ml, una vez aforada la solución se la sometió a un proceso de agitación en la máquina centrifugadora modelo CENTRIFUGE 5804, durante 6 minutos, para finalizar se realizó la titulación con ácido de la solución añadiendo 0.1 ml de HCl y calculando el pH, hasta llegar al pH de 3.5.



Figura 3.10: Titulación con HCl

Los valores obtenidos del pH al realizar la titulación potenciométrica se muestran a continuación.

Tabla 3.3: Consumo de HCl

Volumen de titulación (ml)	pH					
	Alimento 1	Alimento 2	Concentrado 1	Concentrado 2	Relave 1	Relave 2
0	6.88	6.80	7.21	7.17	7.30	7.28
0.1	6.37	6.34	7.02	6.95	6.82	6.82
0.2	6.20	6.17	6.46	6.53	6.63	6.61

0.3	5.53	5.49	6.11	6.13	6.32	6.37
0.4	4.42	4.40	5.84	5.81	6.08	5.75
0.5	3.96	3.93	5.13	5.21	5.62	5.44
0.6	3.82	3.79	4.61	4.51	5.09	4.71
0.7	3.57*	3.53*	4.03	3.94	4.26	3.94
0.8	3.45	3.43	3.73	3.66	3.76	3.76
0.9	3.32	3.30	3.61	3.59*	3.63	3.61
1	3.27	3.24	3.48*	3.45	3.46*	3.49*

\* Valores a ser promediados

Posteriormente se procede a realizar las gráficas de las curvas de comportamiento del pH a medida que se va consumiendo el HCl, estas gráficas serán presentadas en el siguiente capítulo. Para entender las reacciones de neutralización que transcurren a lo largo de la curva de pH, se presenta a continuación los rangos de pH de reacción de algunos minerales alcalinos.

Tabla 3.4: Rango de pH en que algunos minerales consumidores de ácido reaccionan estabilizando el pH.

	Nombre	Fórmula	pH de amortiguación
<b>Carbonatos</b>	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	5,5 – 6,9
	Siderita	FeCO <sub>3</sub>	5,1 – 6,0
	Malaquita	Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>	5,1 – 6,0
	Gibsita	Al(OH) <sub>3</sub>	3,7 – 4,3
<b>Óxidos</b>	Limonita/goethita	FeOOH	3,0 – 3,7
	Ferrihidrita	Fe(OH) <sub>3</sub>	2,8 – 3,0
	Jarosita	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1,7 – 2,0
<b>Aluminosilicatos</b>			0.5 – 1.5

Fuente: (Bahamóndez, 2012)



Con los valores obtenidos de la titulación se calculará el contenido de CaCO<sub>3</sub>/t de material, este cálculo se realizará con la siguiente formula:

$$PN = \frac{V_{HCl} * N_{HCl} * eq(CaCO_3)}{\text{Peso de la muestra (g)}} * \frac{g \text{ CaCo}_3}{g_{\text{muestra}}} * \frac{1kg}{1000g} * \frac{1000000 g}{1 t}$$

Ecuación 3.3: Conversión a kg CaCO<sub>3</sub>/t

En donde:

- V<sub>HCL</sub> = Volumen de ácido (ml)
- N<sub>HCl</sub> = Normalidad del HCl = 0.1187
- Eq. (CaCO<sub>3</sub>) = equivalente químico de carbonato de calcio = 50 eq. -g

Tabla 3.5: kg de CaCO<sub>3</sub> /t de cada muestra para determinación del PN

Volumen de titulación (ml)	kg CaCO <sub>3</sub> / t					
	Alimento 1	Alimento 2	Concentrado 1	Concentrado 2	Relave 1	Relave 2
0.1	59.17508	59.07236	61.19648143	58.88831561	58.83799	58.91053
0.2	118.3502	118.14472	122.3929629	117.7766312	117.676	117.8211
0.3	177.5252	177.21708	183.5894443	176.6649468	176.514	176.7316
0.4	236.7003	236.28944	244.7859257	235.5532624	235.352	235.6421
0.5	295.8754	295.3618	305.9824072	294.441578	294.19	294.5526
0.6	355.0505	354.43416	367.1788886	353.3298936	353.028	353.4632
0.7	414.2255*	413.50652*	428.37537	412.2182092	411.8659	412.3737
0.8	473.4006	472.57888	489.5718515	471.1065248	470.7039	471.2842
0.9	532.5757	531.65124	550.7683329	529.9948405*	529.5419	530.1947
1	591.7508	590.7236	611.9648143*	588.8831561	588.3799*	589.1053*

\* Valores a ser promediados

El valor de  $\text{CaCO}_3$  que se debe tomar para cada muestra es el equivalente al dato que se obtuvo con el volumen de ácido requerido para obtener un pH de 3.5. Como se realizaron 2 análisis para cada muestra, el valor final de  $\text{CaCO}_3$  utilizado será el promedio entre los 2 ensayos. Obteniéndose los valores finales para cada muestra que equivaldrán a el valor de Potencial Neutro de la muestra.

Tabla 3.6: Valores finales de consumo de ácido expresados kg de  $\text{CaCO}_3$  /t

<b>Muestra</b>	<b>kg <math>\text{CaCO}_3</math> / t (Potencial Neutro)</b>
Alimento	413.866
Concentrado	570.9798
Relave	588.7426

### **3.3. Test Dinámicos**

Los test dinámicos son diseñados para acelerar la meteorización natural de los minerales sulfurados, con el propósito de conocer la velocidad en que se producirá el drenaje ácido. Estos test se llevan a cabo en aquellas muestras que han sido clasificadas previamente por los test estáticos como potencialmente generadoras de acidez. Los test dinámicos son más costosos e implican una mayor inversión de tiempo que los test estáticos. (Bahamóndez, 2012)

### 3.3.1. Construcción de la infraestructura de las columnas de lixiviación

#### 3.3.1.1. Diseño de la estructura

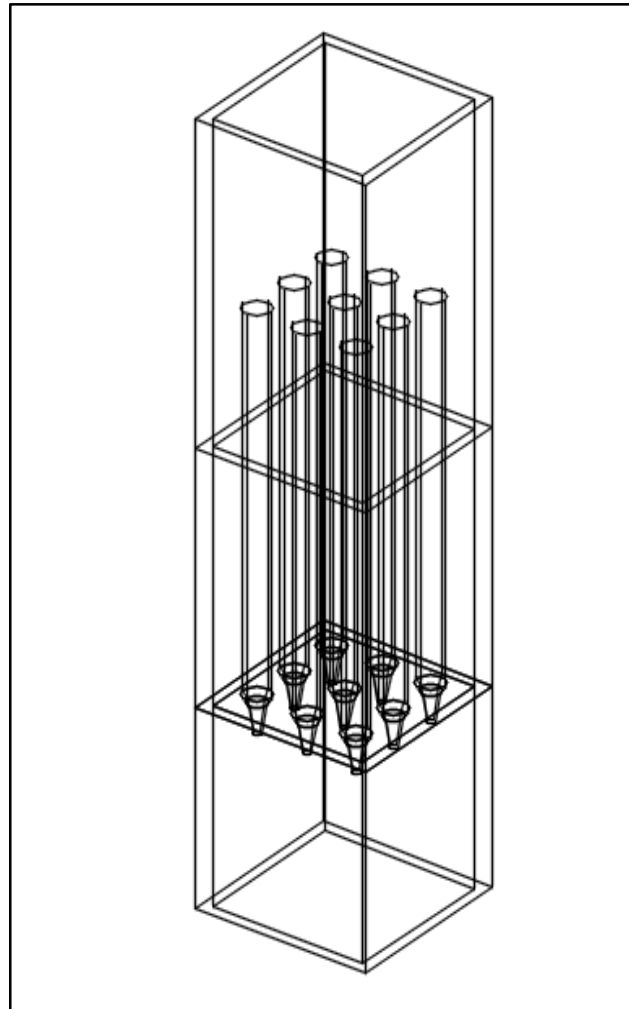


Figura 3.11: Diseño de la columna de lixiviación

La estructura donde se van a colocar las columnas de lixiviación consta de 9 tubos de PVC de 1.20 m de largo y de 1" de diámetro, dispuestas verticalmente, asentadas sobre una base móvil de hierro de 2 m de alto por 0.6 m de ancho, de forma cúbica.

### 3.3.2. Construcción de las columnas de lixiviación

Las columnas de lixiviación son de PVC (policloruro de vinilo) que es un plástico muy versátil y resistente, ideal para este tipo de experimentos, cada columna consta de 3 puntos de recolección, uno ubicado al inicio de la columna, el segundo ubicado a la mitad y el tercero que se encuentra al final de toda la columna, se han dispuesto llaves de paso en estos puntos de recolección con el fin de facilitar la toma de muestra.



Figura 3.12: Construcción de las columnas de lixiviación



Figura 3.13: Columnas de lixiviación

### 3.3.3. Dosificación de las columnas de lixiviación

La experimentación se va a realizar únicamente en 3 columnas que constan de la siguiente dosificación exactamente igual para las 3:

- 600 gr de material grueso
- 400 gr de material fino, pasante malla #100, (alimento, concentrado, relave).
- 2.5 litros de agua
- Adicionalmente se colocó una malla al fondo de la columna que ayudara a la filtración del agua.

Esta distribución de material grueso y material fino facilita la permeabilidad del agua dentro de la columna y no se produzcan obstrucciones.



Figura 3.14: Material grueso



Figura 3.15: Adición de material fino



Figura 3.16: Llenado de las columnas de lixiviación

### **3.4. Medición del PH y conductividad**

Las mediciones del pH y conductividad fueron tomadas con el fin de conocer el momento en el que el agua se empieza a volver ácida y que tiempo ocurrirá dicho proceso. Las mediciones se empezaron a tomar una semana después de que esta haya sido construida. Se fueron tomando los datos de forma esporádica por un lapso de noventa días.

#### **3.4.1. pH**

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia. Una escala numérica utilizada para medir la acidez y basicidad de una sustancia. Las mediciones de pH se realizaron en el laboratorio de la Facultad Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, mediante un potenciómetro marca OAKTON, obteniendo los siguientes datos.

Tabla 3.7: Datos pH

Datos	Fecha	Días	pH		
			Alimento	Relave	Concentrado
1	miércoles, 14 de noviembre de 2018	1	6.47	7.2	7.06
2	jueves, 22 de noviembre de 2018	8	6.45	7.05	6.96
3	jueves, 29 de noviembre de 2018	15	6.43	6.94	6.87
4	viernes, 7 de diciembre de 2018	37	6.41	6.86	6.83
5	miércoles, 12 de diciembre de 2018	42	6.39	6.64	6.81
6	lunes, 17 de diciembre de 2018	47	6.38	6.57	6.76
7	viernes, 21 de diciembre de 2018	51	6.52	6.68	6.79
8	miércoles, 2 de enero de 2019	63	6.67	6.83	6.97
9	jueves, 3 de enero de 2019	64	6.85	7.15	7.04
10	viernes, 4 de enero de 2019	65	6.99	7.22	7.12
11	lunes, 7 de enero de 2019	68	7.55	7.18	6.96
12	martes, 8 de enero de 2019	69	7.77	7.02	6.89
13	miércoles, 9 de enero de 2019	70	7.03	7.23	7.21
14	jueves, 10 de enero de 2019	71	7.57	7.33	7.18
15	viernes, 11 de enero de 2019	72	7.62	7.25	7.21
16	lunes, 14 de enero de 2019	75	7.70	7.19	7.21
17	lunes, 21 de enero de 2019	82	7.50	7.32	7.47
18	Martes, 29 de enero del 2019	90	7.18	7.62	7.39



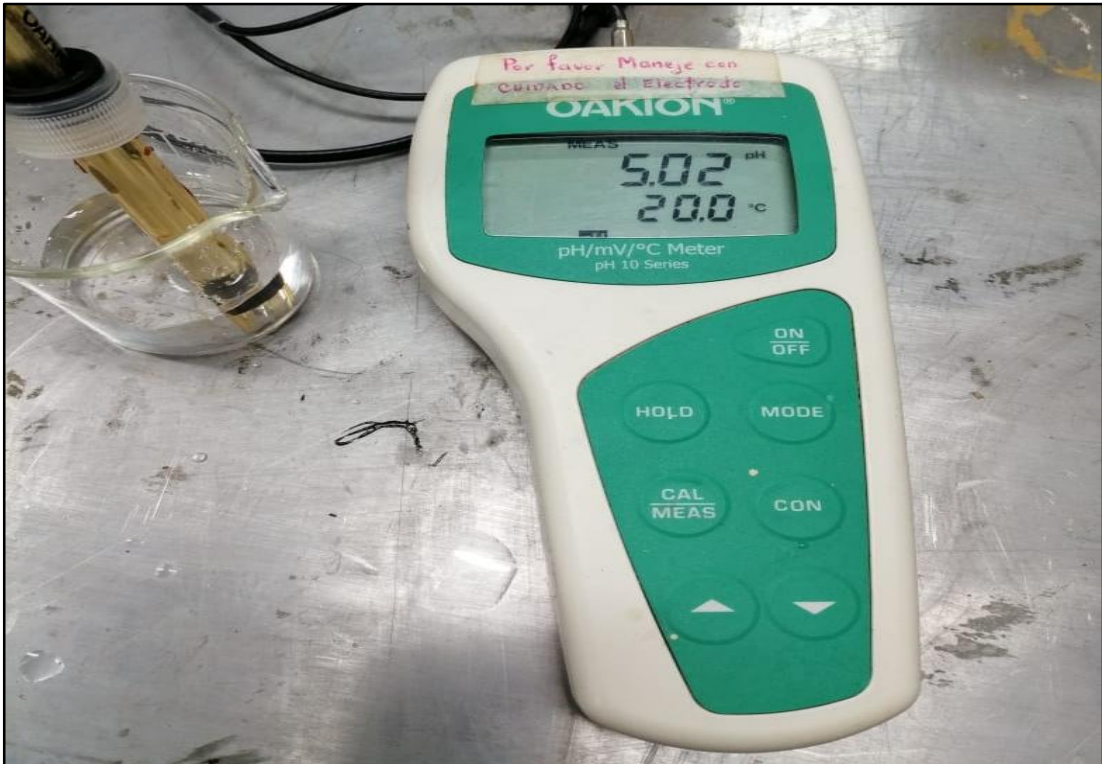


Figura 3.17: Medición del PH

### 3.4.2. Conductividad

Las mediciones de conductividad al igual que las de pH se realizaron en los laboratorios de la Universidad del Azuay, mediante un conductímetro de marca BOECO. Obteniéndose los siguientes valores.

Tabla 3.8: Datos Conductividad

Datos	Fecha	Días	Conductividad ( $\mu\text{s}$ )		
			Alimento	Relave	Concentrado
1	miércoles, 14 de noviembre de 2018	1	370.8	512.1	726.1
2	jueves, 22 de noviembre de 2018	8	353.4	483.1	701.8
3	jueves, 29 de noviembre de 2018	15	353.4	467.9	694.3
4	viernes, 7 de diciembre de 2018	37	348	445.1	684
5	miércoles, 12 de diciembre de 2018	42	335.7	439.2	668.3
6	lunes, 17 de diciembre de 2018	47	332.4	423.8	650.2
7	viernes, 21 de diciembre de 2018	51	318.9	403.8	668.6
8	miércoles, 2 de enero de 2019	63	301.7	439.1	672.9
9	jueves, 3 de enero de 2019	64	272.8	452.2	685
10	viernes, 4 de enero de 2019	65	258.7	462	693
11	lunes, 7 de enero de 2019	68	255.2	447.8	690.2
12	martes, 8 de enero de 2019	69	254.8	420	677
13	miércoles, 9 de enero de 2019	70	289.1	435.4	568
14	jueves, 10 de enero de 2019	71	261.9	452.8	663.1
15	viernes, 11 de enero de 2019	72	263.6	449.3	629.4
16	lunes, 14 de enero de 2019	75	265.8	450.5	618
17	lunes, 21 de enero de 2019	82	265.6	451.1	593
18	Martes, 29 de enero de 2019	90	282.7	471.7	620



Figura 3.18: Medición de la conductividad

### 3.4.3. Eh

Cuando se ponen en contacto dos elementos en solución, con presencia de su forma elemental y la forma ionizada correspondiente, siempre hay uno que se oxida y otro que se reduce, lo que se manifiesta por el incremento en una de sus formas. El elemento que se reduce es el que posee una capacidad oxidante mayor. La capacidad oxidante es lo que se conoce como potencial de oxidación (Eh), que cuanto más alto es, mayor es la capacidad oxidante del sistema y mayor es la concentración de la forma reducida. El potencial de oxidación se mide en voltios, aunque como su valor es muy pequeño se expresa usualmente en milivoltios (mV) (García, 2015).

Para calcular el Eh se utilizó la siguiente fórmula.

$$Eh = 1.23 - 0.059pH$$

Ecuación 3.4: Calculo del Eh

Tabla 3.9: Datos Eh

Datos	Fecha	Días	Eh (mv)		
			Alimento	Relave	Concentrado
1	miércoles, 14 de noviembre de 2018	1	0.84827	0.8052	0.81346
2	jueves, 22 de noviembre de 2018	8	0.84945	0.81405	0.81936
3	jueves, 29 de noviembre de 2018	15	0.85063	0.82054	0.82467
4	viernes, 7 de diciembre de 2018	37	0.85181	0.82526	0.82703
5	miércoles, 12 de diciembre de 2018	42	0.85299	0.83824	0.82821
6	lunes, 17 de diciembre de 2018	47	0.85358	0.84237	0.83116
7	viernes, 21 de diciembre de 2018	51	0.84532	0.83588	0.82939
8	miércoles, 2 de enero de 2019	63	0.83647	0.82703	0.81877
9	jueves, 3 de enero de 2019	64	0.82585	0.80815	0.81464
10	viernes, 4 de enero de 2019	65	0.81759	0.80402	0.80992
11	lunes, 7 de enero de 2019	68	0.78455	0.80638	0.81936
12	martes, 8 de enero de 2019	69	0.77157	0.81582	0.82349
13	miércoles, 9 de enero de 2019	70	0.81523	0.80343	0.80461
14	jueves, 10 de enero de 2019	71	0.78337	0.79753	0.80638
15	viernes, 11 de enero de 2019	72	0.78042	0.80225	0.80461
16	lunes, 14 de enero de 2019	75	0.7757	0.80579	0.80461
17	lunes, 21 de enero de 2019	82	0.7875	0.79812	0.78927
18	Martes, 29 de enero de 2019	90	0.80638	0.78042	0.79399

## CAPITULO 4

### RESULTADOS

A continuación, se podrán observar los diagramas de los datos obtenidos en la elaboración de los test estáticos y dinámicos, para el caso de los test estáticos, se observará el consumo de ácido en un volumen determinado con el fin de obtener los datos del potencial de neutralización, para el caso de los test dinámicos, los diagramas indicaran como se comportó el pH, la conductividad y el Eh (que se obtuvo mediante los valores del pH durante el periodo que fueron analizadas las muestras dentro de las columnas de lixiviación, tanto para el material del alimento, concentrado y relave.

#### 4.1. Test estáticos

##### 4.1.1. Potencial neutro (PN)

Se registró la variación de pH según volumen de ácido agregado, con lo que se realizó curvas de pH que muestran cómo se desarrolla el drenaje ácido, así como la existencia de minerales consumidores de ácido.

En las siguientes ilustraciones se puede observar el comportamiento del PH que se genera al añadir HCl 0.1 N en las muestras de alimento, concentrado y relaves.

A medida que el pH disminuye por la adición de ácido, los minerales alcalinos presente en las muestras reaccionan manteniendo el pH relativamente constante; una vez agotados los minerales consumidores de ácido, el pH continúa su descenso hasta el fin de la experiencia a 3,5.

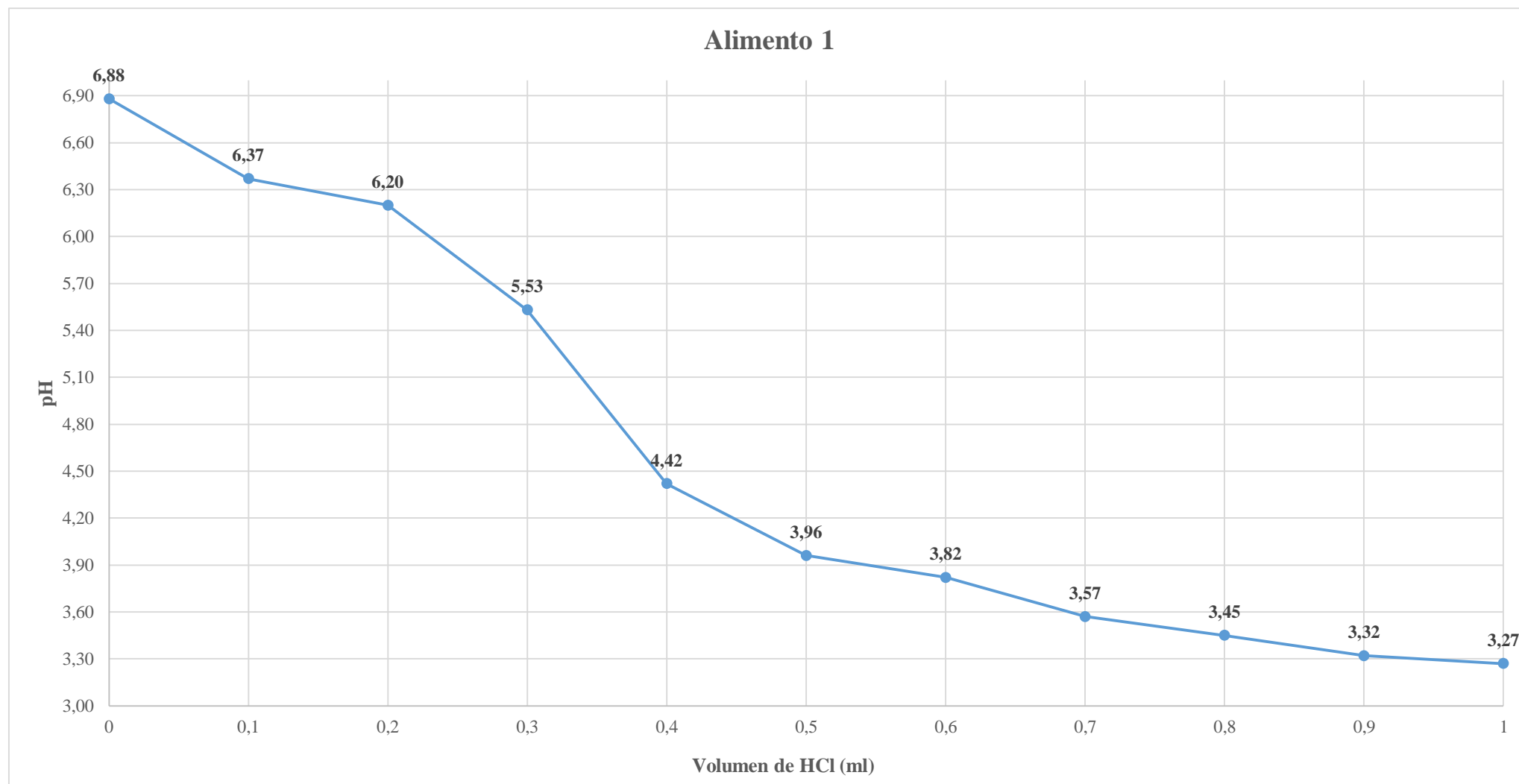


Figura 4.1: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Alimento 1)

## Alimento 2

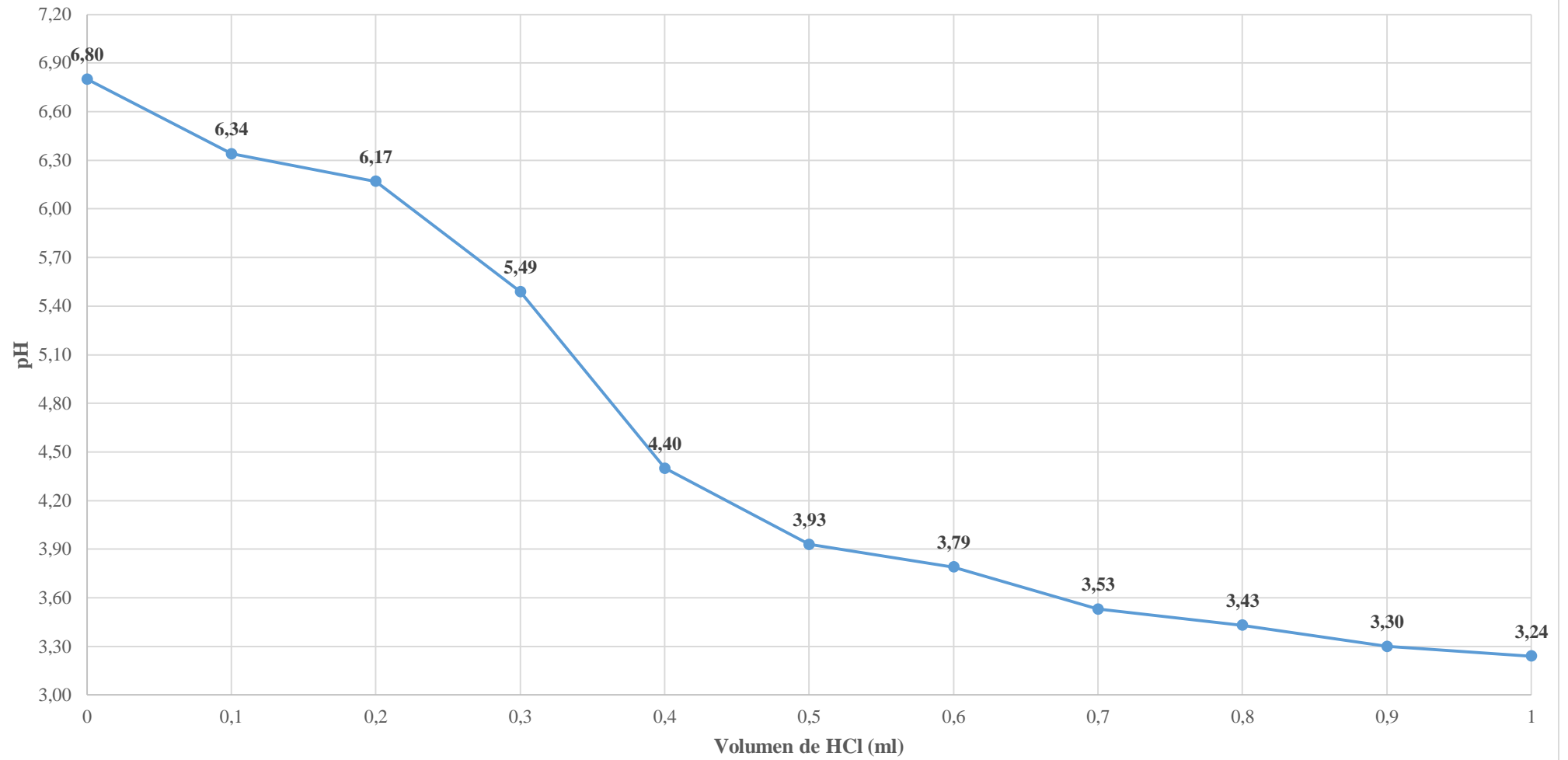


Figura 4.2: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Alimento 2)

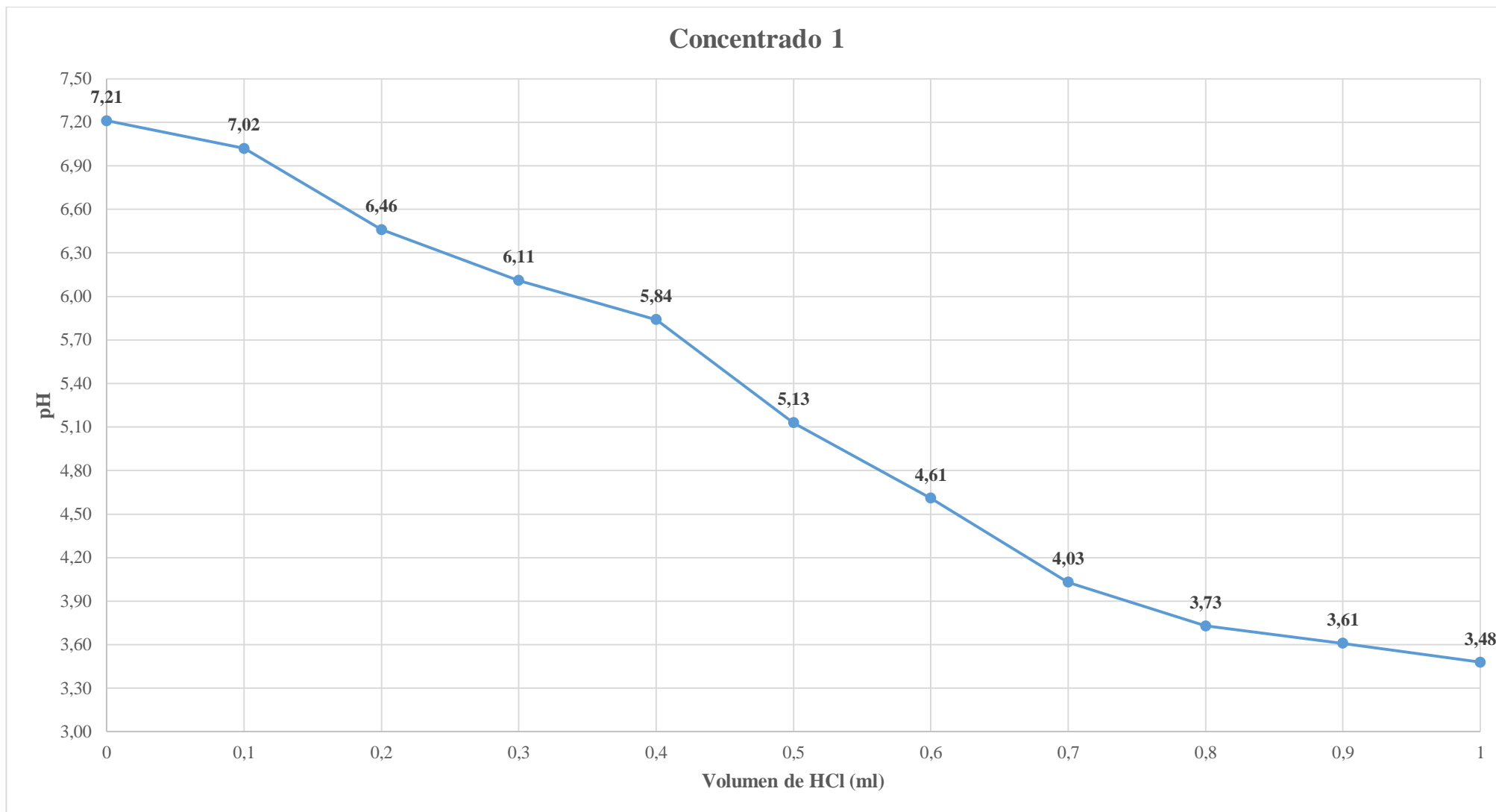


Figura 4.3: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Concentrado 1)



## Concentrado 2

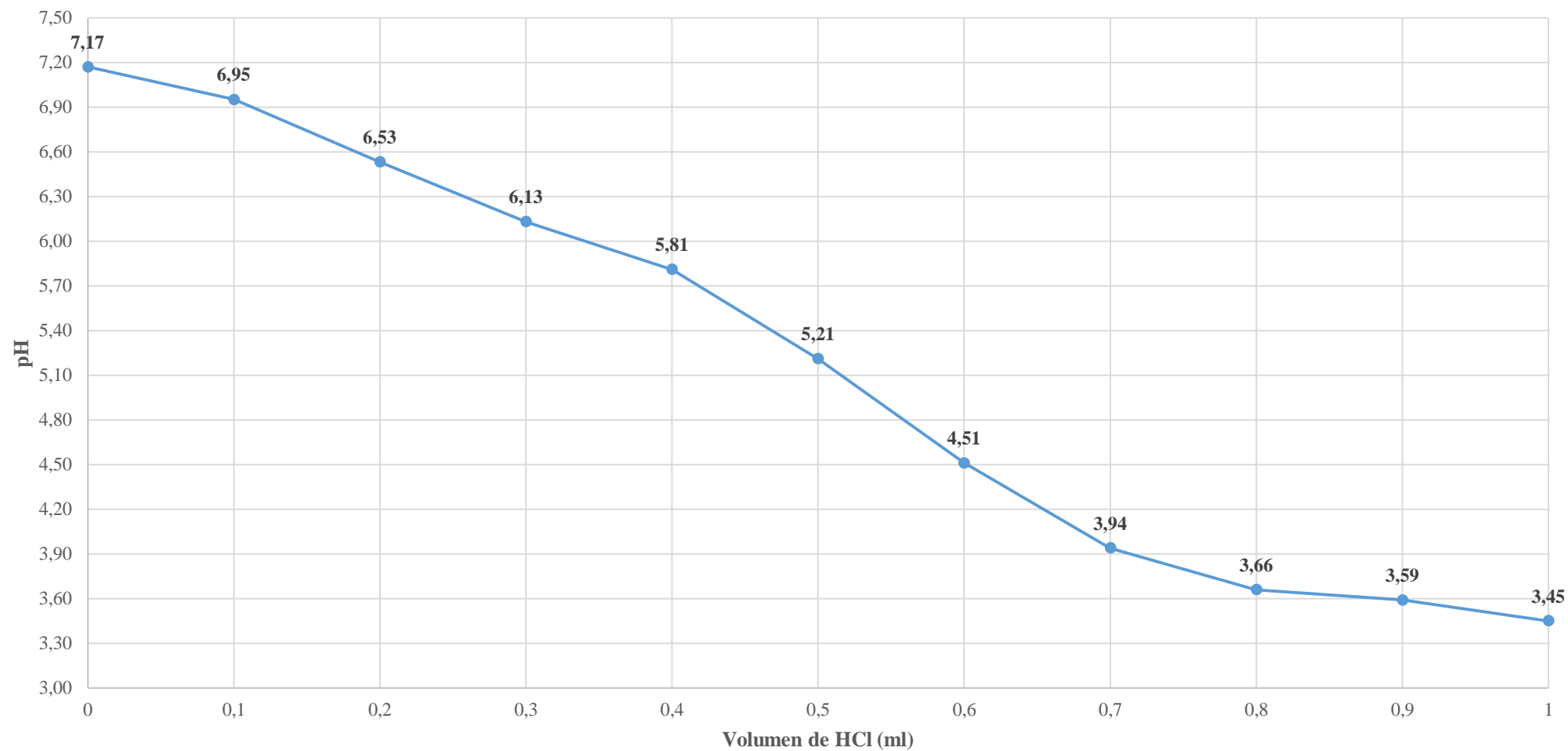


Figura 4.4: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Concentrado 2)

## Relave 1

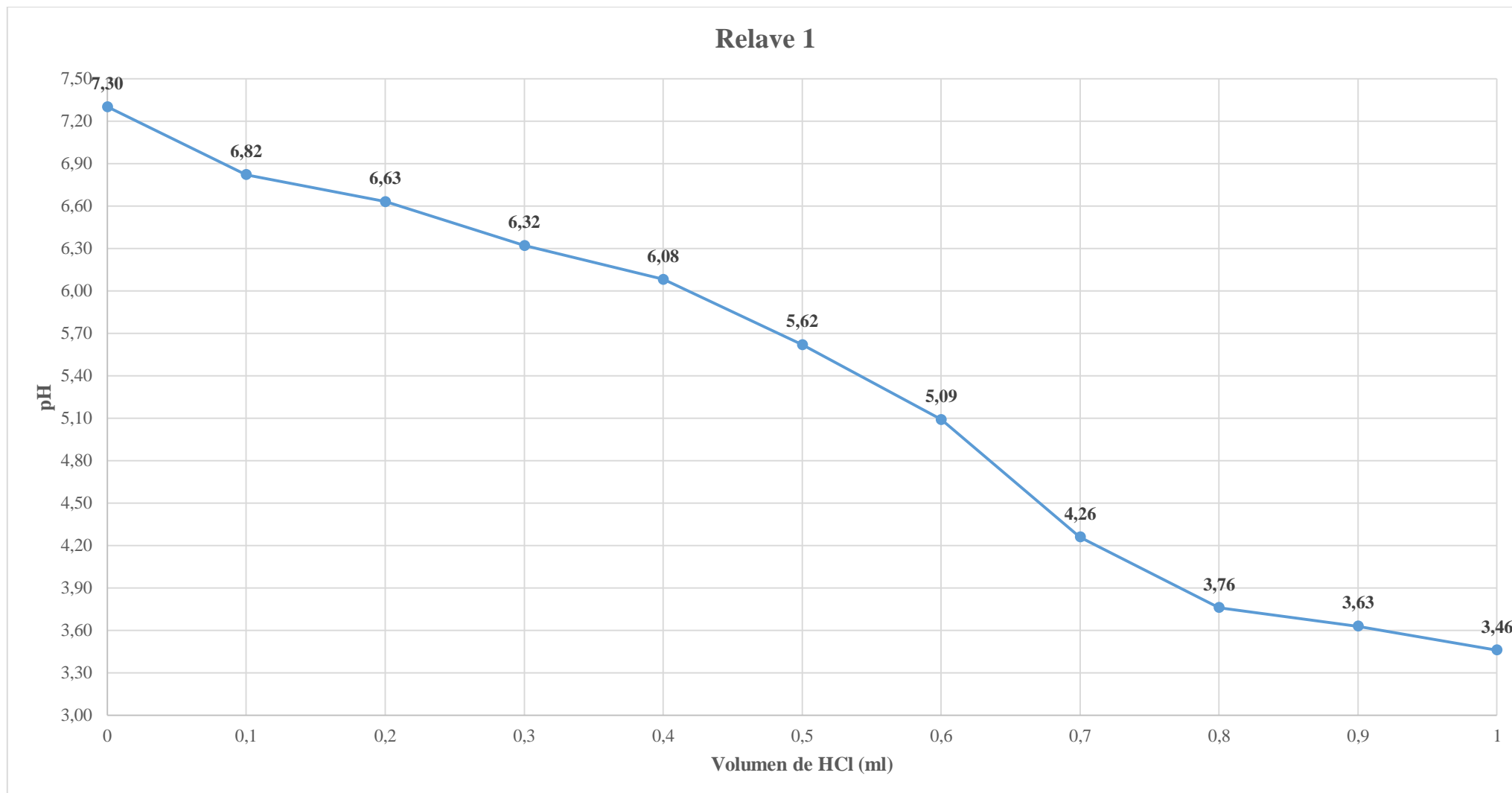


Figura 4.5: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Relave 1)

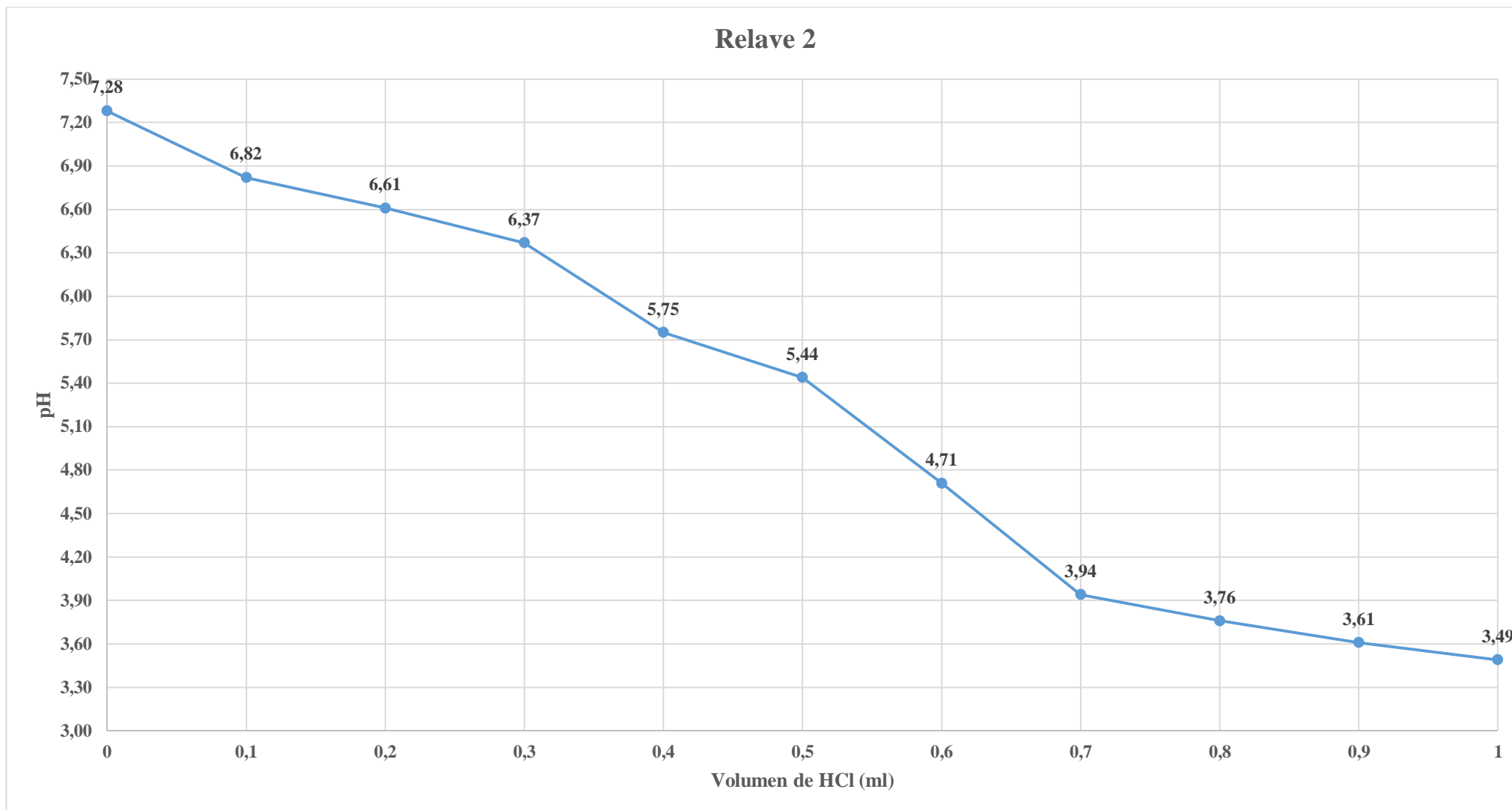


Figura 4.6: Evolución de pH dada por la adición de HCl (Relave 2)

De estas gráficas podemos deducir que a medida que el pH disminuye por la adición de ácido, los minerales alcalinos presente en las muestras reaccionan manteniendo el pH constante; una vez agotados los minerales consumidores de ácido, el pH continúa su descenso hasta el fin de la experiencia a 3.5.

#### 4.1.2. Potencial ácido (PA)

Tabla 4.1: Potencial Ácido.

Muestra	kg CaCO <sub>3</sub> /t PA
Alimento	60.2775282
Concentrado	83.83426336
Relave	72.74874093

#### 4.1.3. Potencial de Neutralización Neto

Una vez obtenidos los 2 potenciales anterior, se puede proceder a calcular el potencial de neutralización neto que es el que nos indica si una muestra es generadora o no de ácido.

Tabla 4.2: Potencial de Neutralización Neto

Muestra	PN kg CaCO <sub>3</sub> /t	PA kg CaCO <sub>3</sub> /t	PNN kg CaCO <sub>3</sub> /t	PN/PA	Observación
<b>Alimento</b>	413.866034	60.2775282	353.588506	6.86600872	Muestra no generadora de ácido
<b>Concentrado</b>	570.979827	83.8342634	487.145564	6.81081702	Muestra no generadora de ácido
<b>Relave</b>	588.742596	72.7487409	515.993855	8.0928218	Muestra no generadora de ácido

La resta del PN – PA permite clasificar las muestras bajo los siguientes criterios:

- No generadoras de ácido cuando el PNN sea mayor a +20 kg CaCO<sub>3</sub>/t,
- Potenciales generadores de ácido cuando el PNN sea menor a -20 kg CaCO<sub>3</sub>/t
- Muestras cuya clasificación se mantiene incierta cuando el PNN se encuentra entre – 20 y +20. (Bahamóndez, 2012)
- La razón entre PN y PA también permite clasificar las muestras:
- Si PN/PA es mayor a 2, se considera las muestras como no generadoras de ácido.
- Si PN/PN, es mayor a 1 y menor a 2 existe posibilidad de generación de ácido, por lo que esas muestras son clasificadas como inciertas.
- Si PN/PA es menor a 1, se considera que las muestras presentan potencial de generar ácido. (Bahamóndez, 2012)

De esta clasificación podemos observar que las muestras no son generadoras de ácido, para ninguno de los 3 tipos de muestras, la ventaja principal de realizar estos test estáticos es su rapidez y bajo costo, por lo que pueden ser realizados en varios tipos de muestras.

#### **4.2. Test dinámicos**

Los test dinámicos se utilizan como test confirmativos después de haber sido realizados los test estáticos, estos con el fin de analizar las muestras que son potencialmente generadoras de drenaje ácido.

En estos test se pudo demostrar que los materiales de alimento, concentrado y relaves, no son potencialmente generadores de ácido, ya que el registro más bajo de pH que se en los 3 casos es de 6.37. Es importante aclarar que el tiempo es un factor muy influyente en este tipo de test, ya que es posible que en un periodo posterior de tiempo las condiciones para que se genere la acidez sean más óptimas y el pH empiece a descender de nuevo.

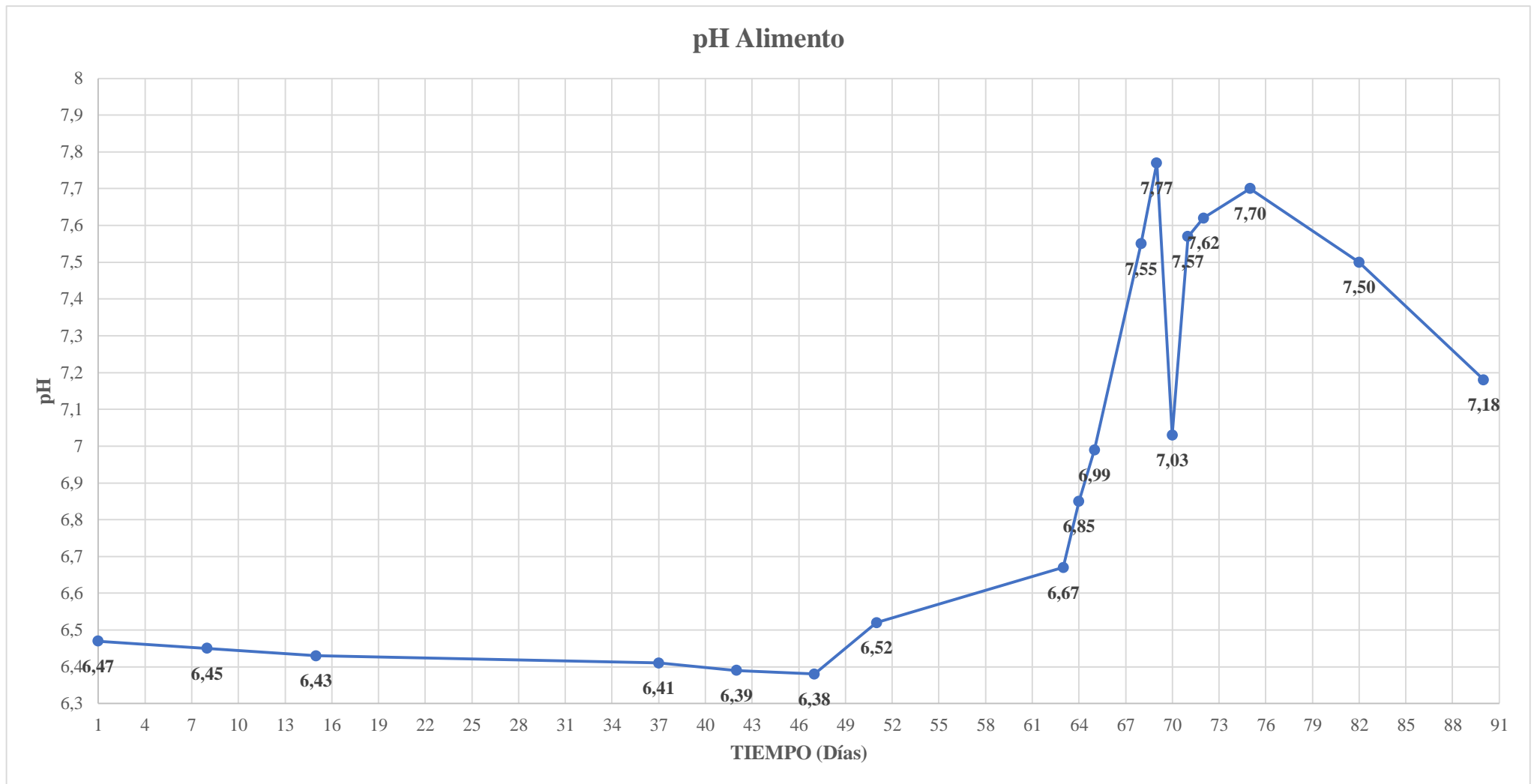


Figura 4.7: Comportamiento del pH en un periodo de tiempo (Alimento)

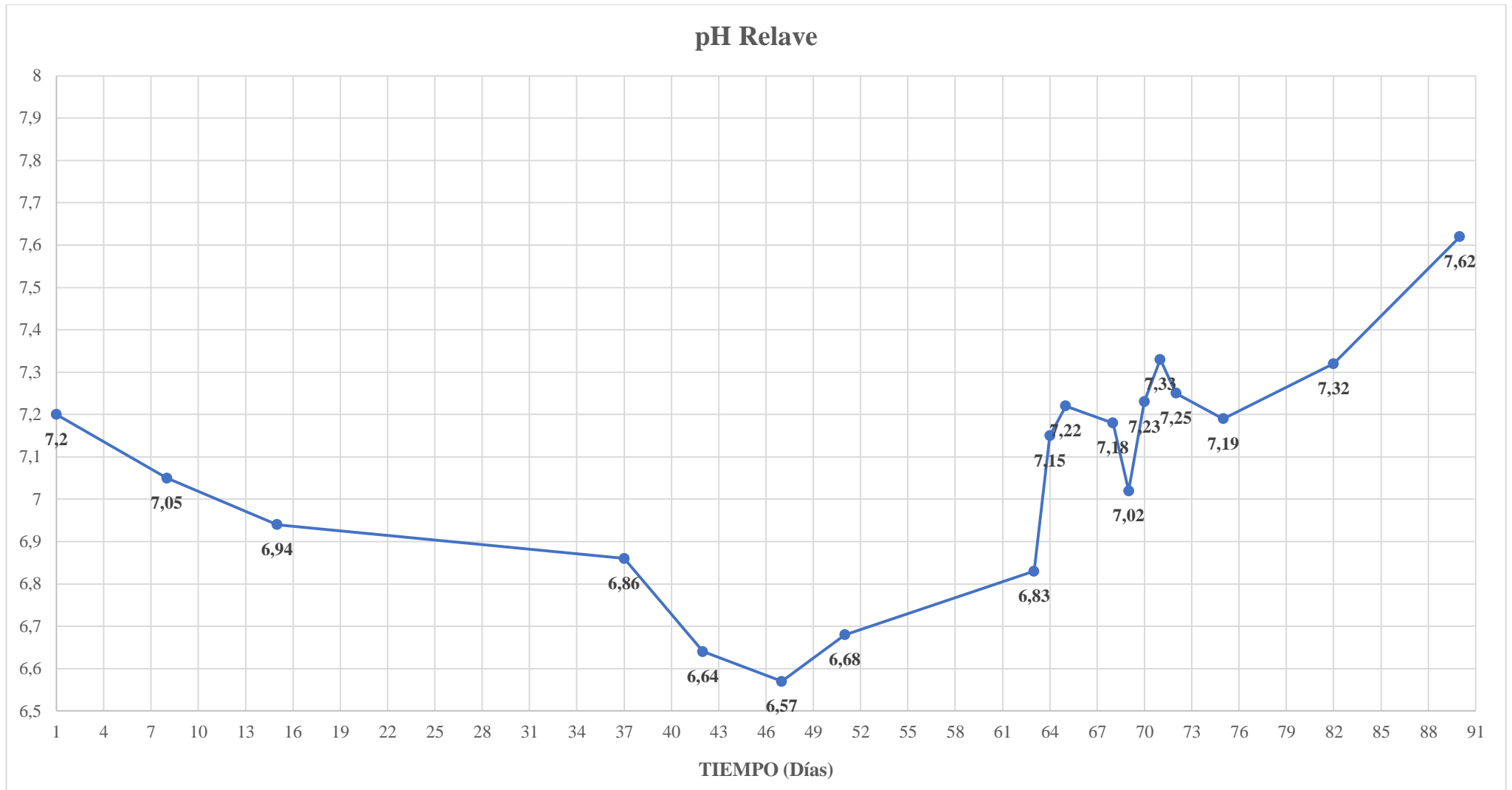


Figura 4.8: Comportamiento del pH en un periodo de tiempo (Relave)

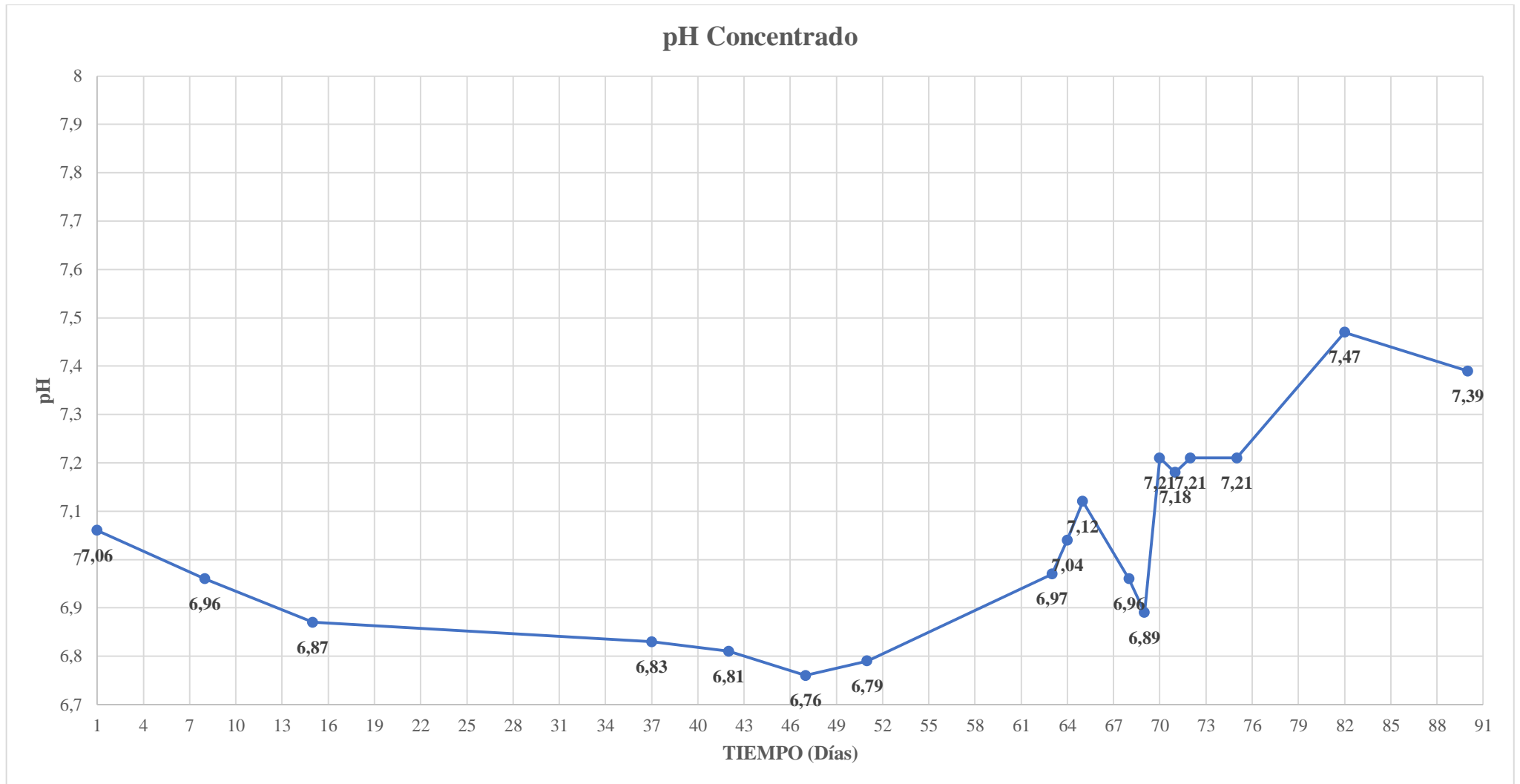


Figura 4.9: Comportamiento del pH en un periodo de tiempo (Concentrado)



#### 4.2.1. Interpretación de curvas de pH

La curva del pH para el material del alimento nos indica un leve descenso del pH desde el inicio del test dinámico hasta el día 47 que llega a un pH de 6.38, este es el valor más bajo que se registró del pH a lo largo del tiempo que duraron los análisis, a partir de este valor el pH comienza a ascender hasta el día 69 en el que se registró el pico más alto de pH llegando a ser este de 7.77, después de este tiempo el pH se mantiene relativamente constante hasta las últimas mediciones realizadas.

En segundo lugar, la curva del pH para el material de alimento, nos indica que al igual que para el material de alimento al inicio de la prueba se registra un leve descenso de los valores del pH hasta llegar al pH más bajo registrado el día 47 de 6.57, después de esta fecha los valores de pH ascienden hasta llegar a un valor aproximadamente de 7 y mantenerse relativamente constantes, hasta llegar al final del ensayo en el que este caso se registra un valor de pH igual a 7.62 siendo este el mayor pH registrado a lo largo de este ensayo.

Por último, la curva de pH para el material de concentrado, al igual que en los 2 casos anteriores se registra un descenso del pH hasta el día 47 donde se registra el valor más bajo de pH igual a 6.76 a partir de este valor el pH empieza a ascender hasta llegar a 7 y mantenerse relativamente constante con ligeras variaciones, en el día 82 se registra el valor de pH más alto igual a 7.47, y posterior a este día comienza de nuevo si descenso hasta el final del ensayo en el día 90 en el que el último pH registrado es de 7.39

Una vez obtenidas las gráficas de curvas de pH para las muestras analizadas se procedió a realizar la graficación de los valores de conductividad que también fueron analizados a la par con el pH, con el fin de observar su comportamiento a lo largo del periodo de prueba.

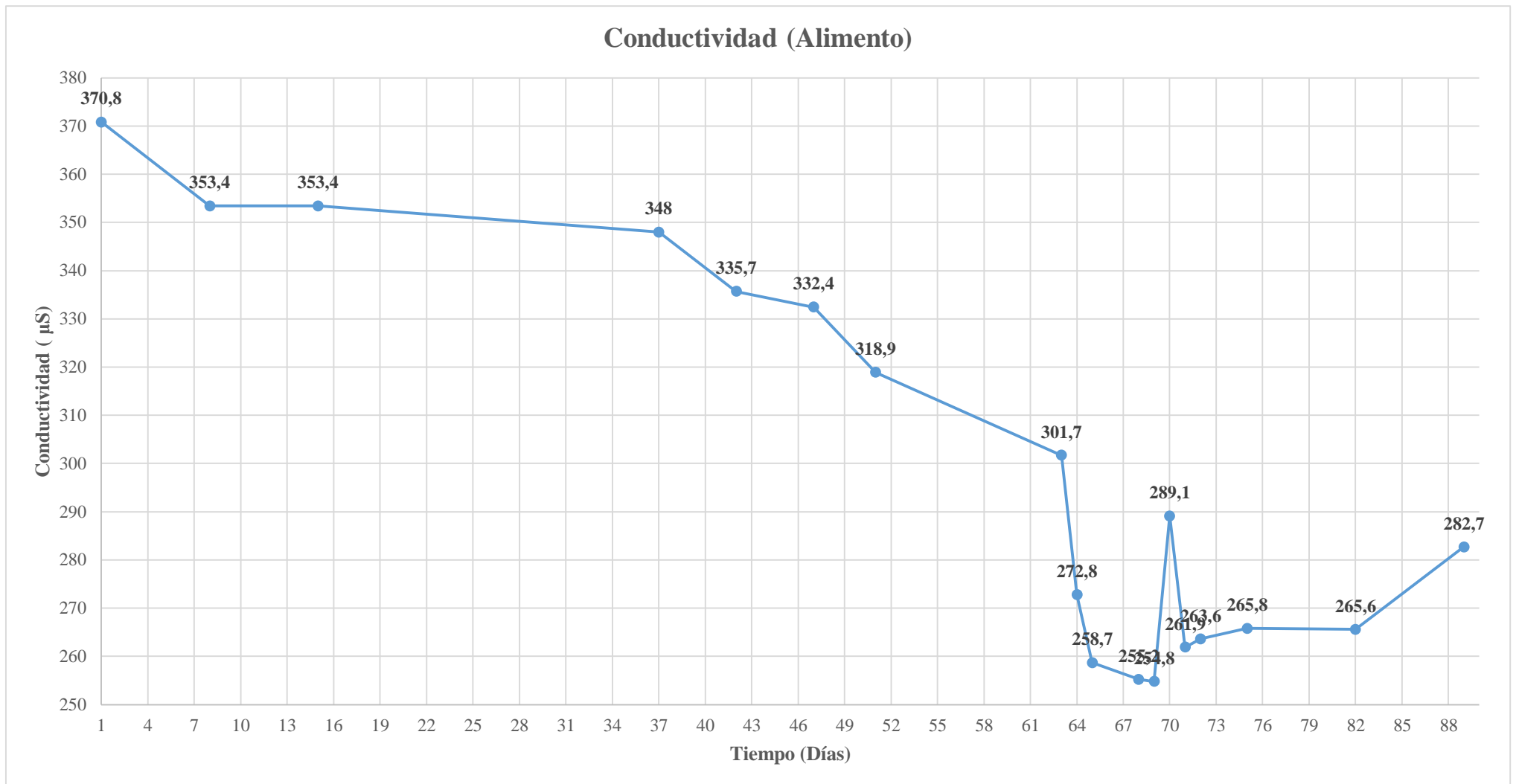


Figura 4.10: Comportamiento de la conductividad en un periodo de tiempo (Alimento)

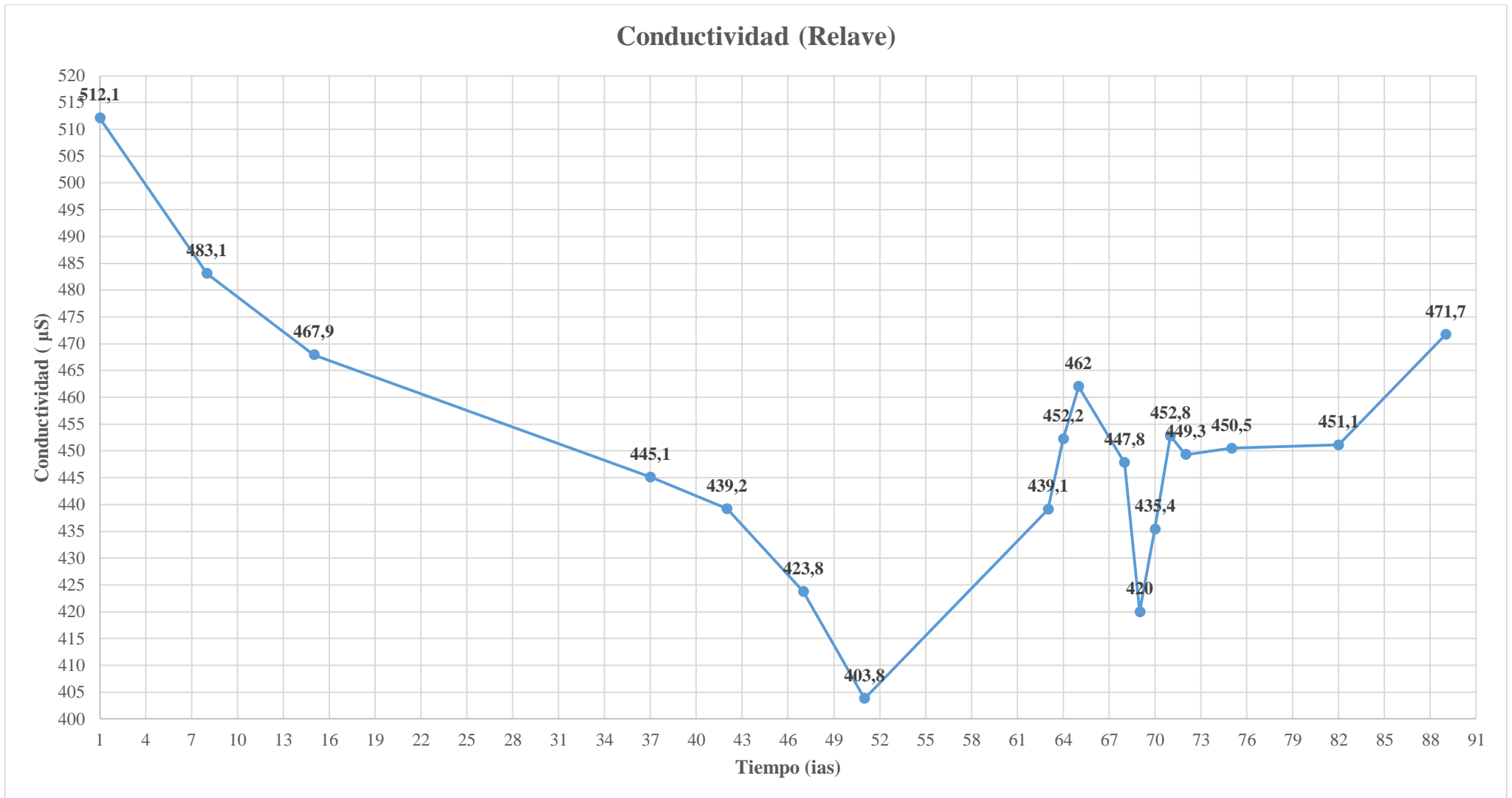


Figura 4.11: Comportamiento de la conductividad en un periodo de tiempo (Relave)

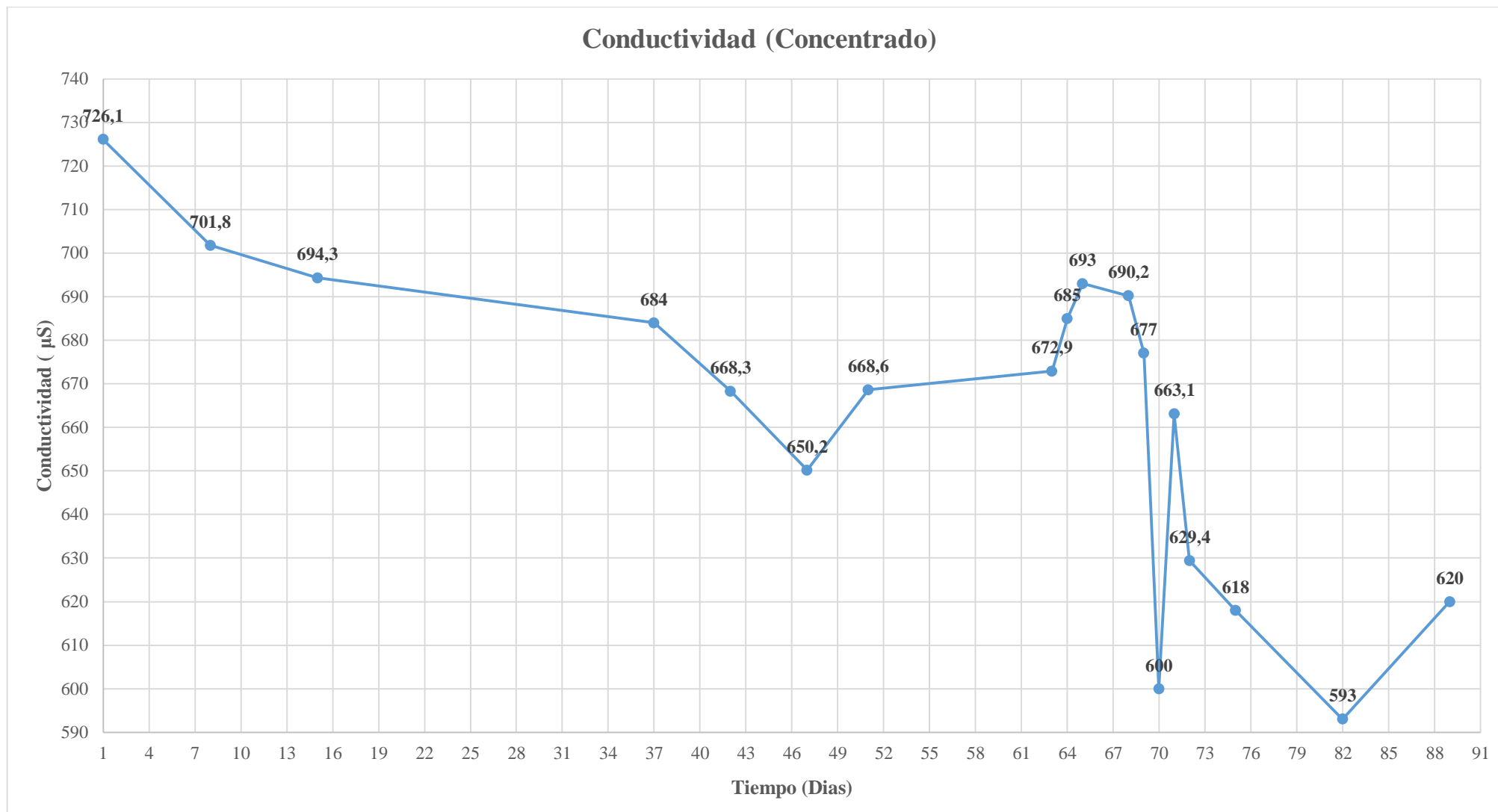


Figura 4.12: Comportamiento de la conductividad en un periodo de tiempo (Concentrado)

#### 4.2.2. Interpretación de curvas de conductividad.

Para el material de alimento la curva inicia en el día uno de prueba con una conductividad de 370.8  $\mu\text{s}$ , a partir de este día los valores empiezan a descender hasta llegar a un valor de 254.8  $\mu\text{s}$  registrado en el día 69, este valor es el más bajo al que llegó la conductividad del material de alimento durante todo el periodo en el que se realizaron los análisis, a partir de este valor, la conductividad empieza a ascender nuevamente hasta llegar al día 90 donde se finalizó el análisis dando un valor de 282.7, es importante mencionar que en el primer día de prueba es donde se registró el valor más alto de conductividad.

En segundo lugar, para el material de relave, en el día 1 se registra el valor más alto de conductividad, con un valor de 512.1  $\mu\text{s}$ , a partir de este día la conductividad, igual que en el caso anterior, comienza a descender hasta el día 51, donde se registra el valor más bajo, obtenido a lo largo de toda la etapa de prueba, igual a 403.8  $\mu\text{s}$ , a partir de este valor, la conductividad empieza a subir nuevamente hasta obtener el último valor registrado en el día 90, igual a 471.17  $\mu\text{s}$ , donde se finalizó el periodo de análisis.

Para finalizar la interpretación de las gráficas de conductividad, en el caso del material de concentrado, el primer valor de conductividad registrado, es decir, en el día 1, es de 726.1  $\mu\text{s}$ , al igual que en los 2 casos anteriores, el valor registrado en el primer día de prueba es el más alto que se tiene a lo largo de todo el periodo, después de esto la conductividad empieza a bajar hasta registrar un valor de 593  $\mu\text{s}$  en el día 82, este es el valor más bajo que se tiene de conductividad, para posterior a eso comenzar nuevamente a subir.

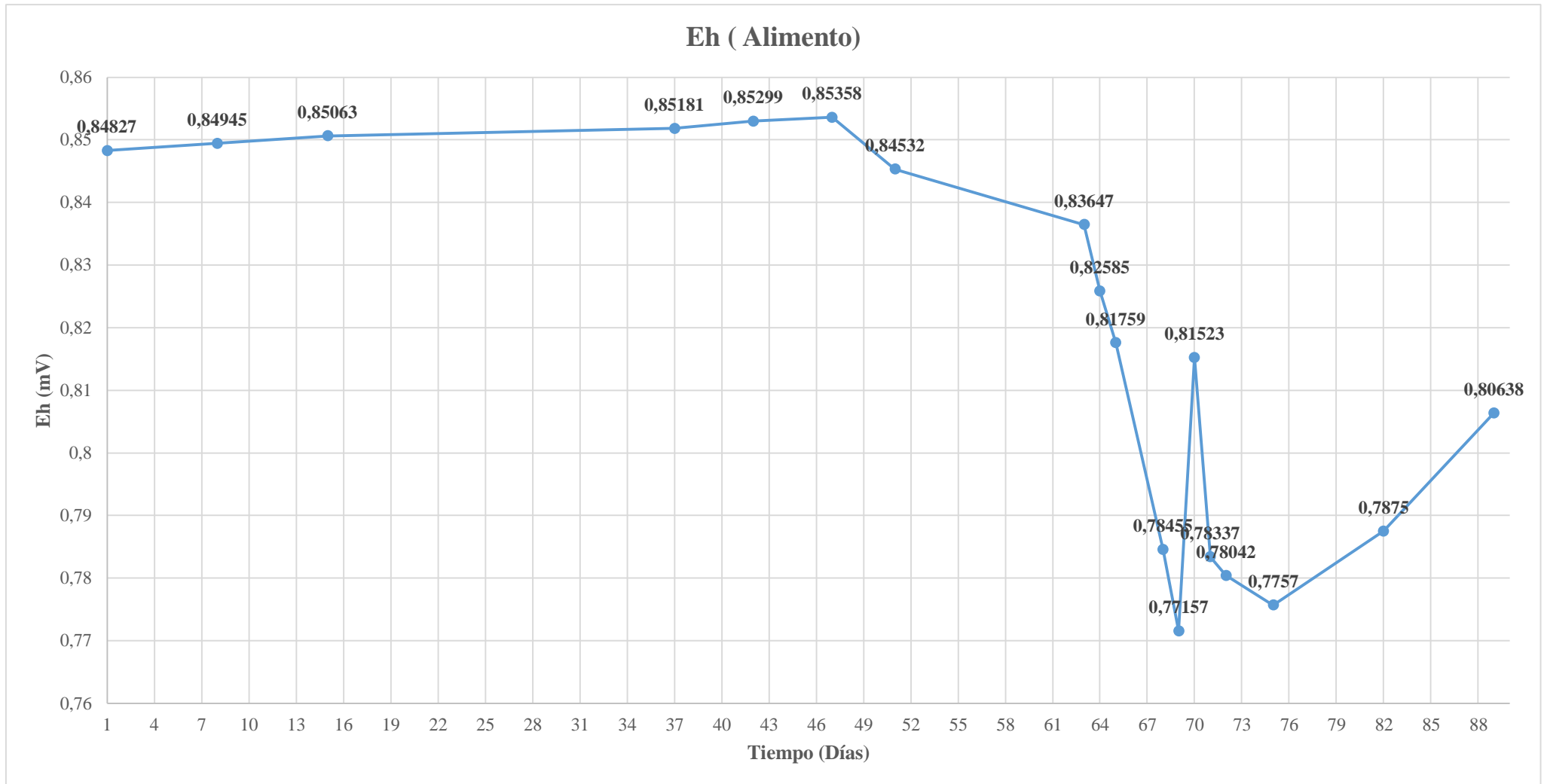


Figura 4.13: Comportamiento del Eh en un periodo de tiempo (Alimento)

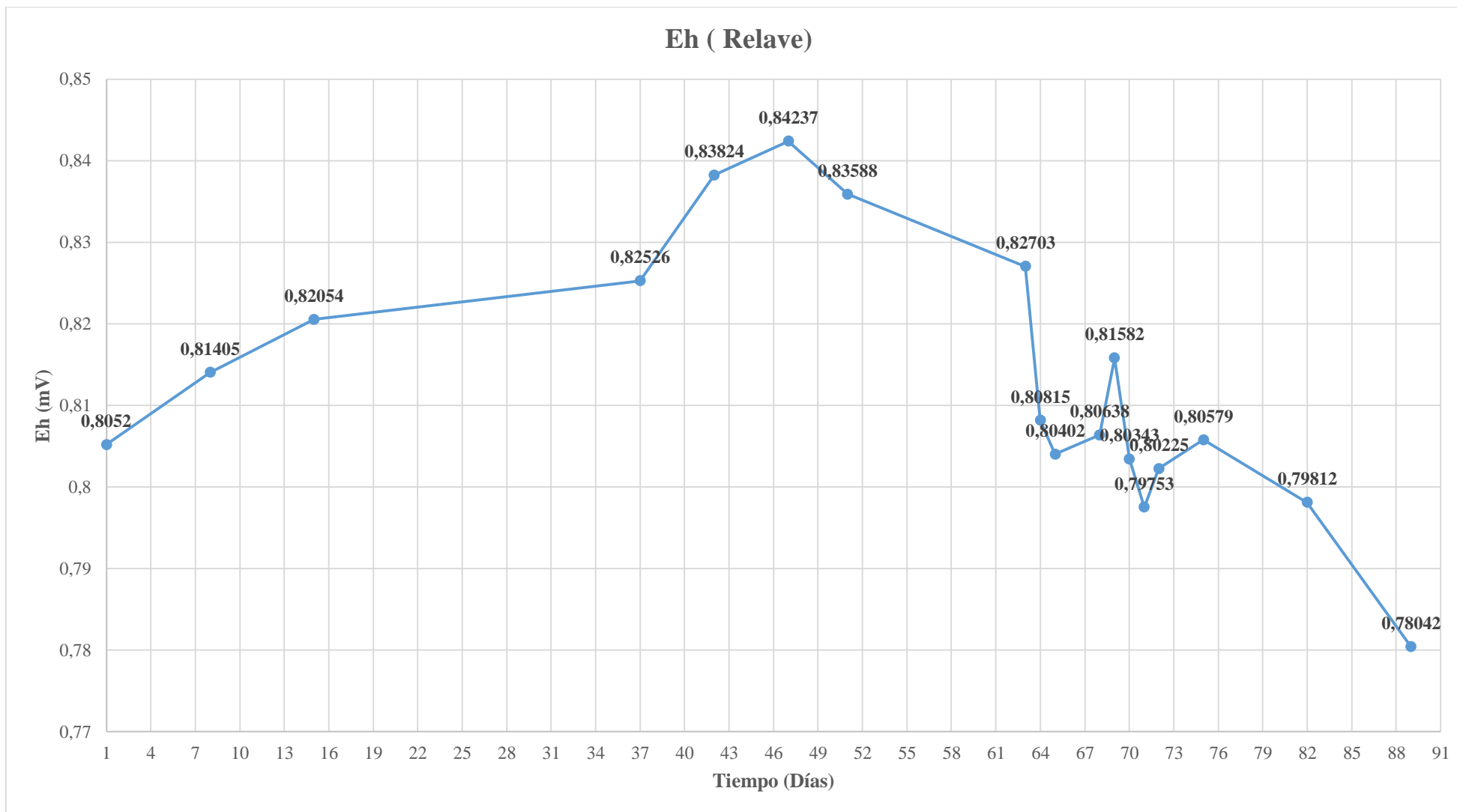


Figura 4.14: Comportamiento del Eh en un periodo de tiempo (Relave)

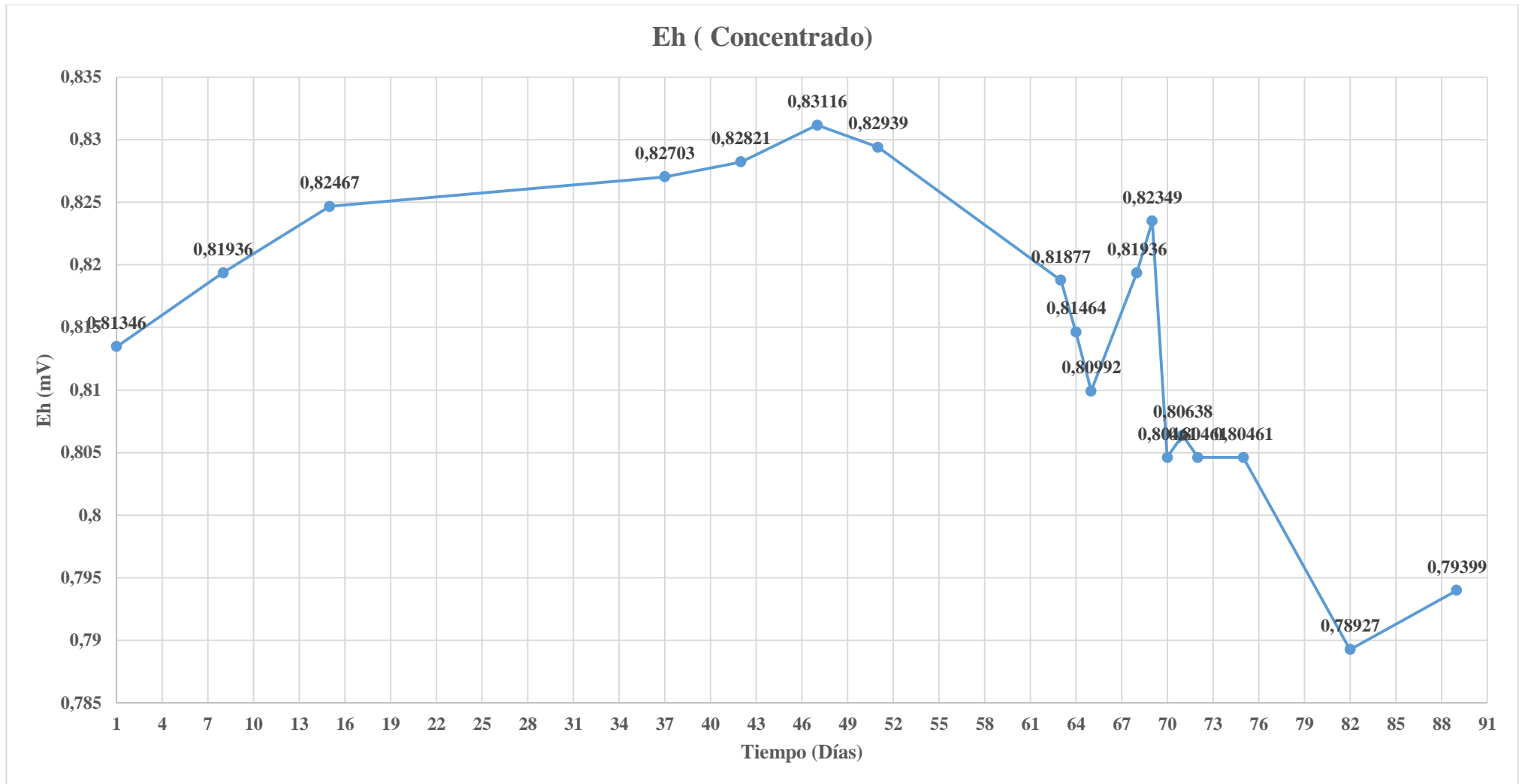


Figura 4.15: Comportamiento del Eh en un periodo de tiempo (Concentrado)



### 4.2.3. Interpretación de curvas de Eh

Los valores de Eh se obtuvieron a partir de los valores de Eh, la fórmula utilizada para obtener estos valores se encuentra descrita en el capítulo anterior, ver (Ecuación 3.3)

En primer lugar, para el caso del material de alimento, la curva de Eh empieza en 0.84827 mV, a partir de este valor se registra un ligero aumento hasta el día 47 donde se tiene el valor más alto de Eh registrado a lo largo de todo el periodo de experimentación, igual a 0.85358 mV, a partir de este día el Eh sufre un declive hasta llegar a 0.77157 mV en el día 69, luego comienza a subir nuevamente hasta llegar a un valor de 0.80638 mV, que se registra en el día 90, que es donde finaliza el periodo de experimentación.

Para el caso de la curva obtenida a partir de los valores de Eh del material de relave, el primer valor que se obtiene en el día 1 es de 0.8052 mV, a partir de este valor el Eh empieza a ascender hasta registrarse un valor de 0.84237 mV en el día 47, siendo este el valor más alto que se obtuvo de Eh a lo largo del periodo de pruebas, a partir de este día el Eh comienza su declive hasta el final de la experimentación donde se registra un valor de 0.78042 mV que es el más bajo que se obtuvo en toda la prueba.

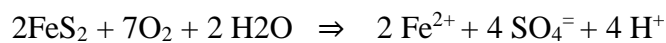
Finalmente, la curva obtenida de los valores de Eh del material de concentrado nos indica un registro de 0.81346 mV en el día que se inició la prueba, posteriormente el Eh, al igual que en el caso anterior, comienza a ascender hasta el día 47 donde se obtiene un valor de 0.83116 mV, que es el más alto de todos los valores registrados a lo largo de la etapa de experimentación, a partir de este día el Eh empieza su descenso hasta el día 82 donde se obtiene un registro de Eh bajo, el más bajo de todos los valores, igual a 0.78927 mV, en el final de la prueba en el día 90 se obtiene un valor de 0.79399 mV.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

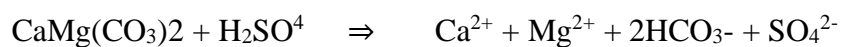
### CONCLUSIONES

- En la aplicación del test estático al material de alimento se puede observar que el potencial de neutralización neto, igual a la diferencia entre el potencial neutro menos el potencial ácido, es 353.5885506 kg CaCO<sub>3</sub>/t, siendo este valor mayor a + 20 kg CaCO<sub>3</sub>/t, y basándose en los criterios mencionados en el capítulo anterior, se puede determinar que la muestra NO ES GENERADORA DE ÁCIDO, una forma de corroborar estos resultados es obtener la relación entre el potencial ácido y potencial de neutralización, en este caso es de 6.86600872, según (Bahamóndez, 2012) si el resultado de esta relación es mayor a 2 la muestra se considera como NO GENERADORA DE ÁCIDO.
- Para el caso del material de concentrado el potencial de neutralización neto, es 487.145564 kg CaCO<sub>3</sub>/t, siendo este valor igual que el caso del alimento mayor a + 20 kg CaCO<sub>3</sub>/t, por lo que también la muestra puede determinarse como NO GENERADORA DE ÁCIDO, obteniendo la relación entre el potencial ácido y potencial de neutralización, para esta muestra obtenemos un valor de 6.81081702, también se considera como NO GENERADORA DE ÁCIDO.
- El material de relave fue analizado bajo los mismos criterios antes mencionados obteniendo el potencial de neutralización neto, igual a 515.993855 kg CaCO<sub>3</sub>/t, siendo este valor, igual que en los casos anteriores, mayor a + 20 kg CaCO<sub>3</sub>/t, por lo que la muestra se determinó que NO ES GENERADORA DE ÁCIDO, para el caso de la relación entre el potencial ácido y potencial de neutralización se obtuvo un valor de 8.0928218, este valor nos confirma que la muestra se categoriza como NO GENERADORA DE ÁCIDO.

- La aplicación del test dinámico a las 3 muestras analizadas, se realizó durante un periodo de 90 días, el pH más bajo que se registro para el material de alimento fue de 6.38, para el material de concentrado fue de 6.76 y para el material de relave de 6.57, lo que indica que no se ha generado acidez, durante este tiempo, el test dinámico es un medio para confirmar los resultados del test estático.
- Las gráficas obtenidas a partir de los datos del pH, de los materiales de alimento, concentrado y relaves, muestran al principio un declive de sus valores hasta un punto donde ya no bajan más y empiezan a subir nuevamente, esto se debe a la reacción de generación de ácido de acuerdo a la oxidación directa:



- Pese a la formación de ácido, la presencia de minerales neutralizantes, dan como respuesta una parcial neutralización, es por esto que el valor de pH no desciende más, de acuerdo a las reacciones siguientes:



- Para el caso de material de alimento se puede observar que el pH descendió levemente hasta el día 42 que llego hasta 6.32, notándose una disminución de 0.09 decimales a partir del primer día de medición, se establece entonces, la presencia de carbonatos tales como siderita y malaquita dentro de la muestra de alimento debido a que su pH de amortiguación se encuentra establecido entre 5.5 a 6.0.

- En el caso del material de relave, se registró una disminución de 0.63 décimas, desde el valor de 7.2 el primer día de medición hasta 6.57 el día 47, en este caso se establece que la muestra tiene presencia de carbonatos tales como calcita, la cual tiene un pH de amortiguación que se encuentra entre 5.5 – 6.9.
- Para el caso del material de concentrado, se registró una disminución de 0.3 décimas, con un valor de pH 6.76 que se registró el día 47 igual que en los casos anteriores, se ha establecido la presencia de carbonatos tales como calcita, la cual tiene un pH de amortiguación que se encuentra entre 5.5 – 6.9.
- Se debe resaltar el potencial de neutralización que poseen estas 3 muestras, que hacen que el pH se mantenga relativamente constante después del día 47.
- La graficación de los datos de Eh genera curvas que se comportan de manera relativamente similar en los 3 tipos de materiales es por eso que el análisis se va a referir a todos de la misma forma.
- Desde inicio de la prueba se puede notar un incremento del potencial REDOX hasta el día 47, esto se debe a que aumenta la relación entre  $Fe^{+3}/Fe^{+2}$ , favoreciendo así, la reacción de disolución de la pirita.
- Se logró determinar la capacidad de generar ácido de las muestras de alimento, concentrado y relaves, con el fin de evaluar si estos materiales podrían llegar a generar drenaje ácido en algún momento, es importante aclarar que los test realizados se enfocan únicamente en el material y su potencial de generar acidez, mas no, se toman en cuenta factores externos como bacterias, que cumplen un rol muy importante dentro de la formación de drenajes ácidos para los cuales se debe realizar otros test.
- La realización de estos ensayos constituye un primer paso hacia una correcta gestión de residuos mineros, ya que una vez determinado si el material se considera generador de ácido se deberán tomar las medidas necesarias para la preservación del medio donde se vayan a disponer dichos residuos, con el fin de disminuir al

máximo el impacto ambiental que estos puedan producir y evitar la contaminación, como es en este caso en particular el proyecto minero Loma Larga, de fuentes hídricas que son de mucha importancia para la ciudad de Cuenca y poblaciones aledañas.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el test dinámico únicamente en las muestras que, en el análisis del test estático se consideren como generadoras de ácido o estén en incertidumbre, esto debido a que el test dinámico es más costoso por la infraestructura que se requiere para su realización.
- Para la realización del test estático en la determinación del potencial de neutralización, se debe tener mucho cuidado al momento de realizar la titulación potenciométrica y tratar de realizarla con la mayor exactitud posible ya que de esto va a depender la veracidad de los datos.
- Es importante aplicar los test estáticos por el método de duplicado de muestras como se lo realizó en esta investigación, con el fin de tener como corroborar los datos y garantizar que estos sean correctos.
- En caso de ser posible, a más de realizar los test estáticos y dinámicos, se debe realizar otros test confirmativos que garanticen que los resultados obtenidos sean altamente confiables.
- Se debe realizar la calibración de los equipos que se utilizan para realizar las mediciones, cada vez que se vaya a llevar a cabo un registro de datos, esto sirve para que los resultados obtenidos sean confiables, no se den lecturas falsas o erróneas.
- Para el caso de los test dinámicos, si no se dispone de una bomba para recircular el agua dentro de las columnas de lixiviación, es necesario que este proceso se realice manual y periódicamente, al menos una vez cada 2 días.
- Debido a que los test realizados en esta investigación se centran únicamente en el material y su capacidad de neutralizar ácido, es conveniente llevar a cabo un análisis

completo de los microorganismos que contribuyen a la generación de drenaje ácido como es el caso de las bacterias, se recomienda utilizar la técnica de Card – Fish descrita por Pernthaler, ya que es la más utilizada en este tipo de análisis y es de alta confiabilidad.

- Es de gran importancia que las empresas mineras tomen conciencia de que existen muchas maneras de reducir los impactos que generan las relaveras, y la realización de estos test es una de ellas, aún más del test estático que no es costoso y se lo puede realizar en varias muestras.
- Los test dinámicos deben ser realizados por largos periodos de tiempo, ya que con esto se logra tener un amplio panorama del comportamiento del pH y la conductividad, y se puede obtener una visión más acertada de como el material logra neutralizar la acidez.
- El proyecto minero “Loma Larga” por estar ubicado en una zona de páramo debe tratar siempre de realizar sus actividades en pro de la población que se encuentra cerca del proyecto y a su vez del ecosistema donde se desenvuelve, para que no se vean comprometidas las fuentes hídricas cercanas.
- La realización de este tipo de análisis se debe realizar en todas las empresas mineras por lo menos una vez al año, como medida de prevención de posibles impactos ambientales.

## BIBLIOGRAFÍA

- A. Ballester, M. B. (2001). Mecanismo de biolixiviación de sulfuros metálicos. *Revista de Metalurgia*.
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina, generación y tratamiento*. Madrid.
- Australia, E. (1997). *Managing sulphidic mine wastes and acid drainage. Best Practice Environmental Management in Mining*.
- Bahamóndez, C. I. (2012). Importancia de la actividad microbiológica en la predicción del drenaje ácido de minas. Santiago de Chile.
- Benzaazoua, M. (2013). Predicciones de drenaje ácido de roca mediante test geoquímicos estáticos y dinámicos. *Revista Metalurgica*.
- Brierley, J. (2000). 2000 *Wadsworth award lecture: Expanding role of microbiology in metallurgical processes. Mining Engineering* , 49 - 53.
- Bulatovic, S. (2007). *Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice*. Elsevier.
- Carpio, E. P. (2015). Estudio de las colas de tratamiento de oro de la explotación minera en Ponce Enríquez (Ecuador) desde una perspectiva ambiental. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Chaparro, L. T. (2015). Drenajes Ácidos de mina. Formación y manejo. *ESAICA*,, 53-57.
- Concha, W. (2015). Flotación de Finos y Gruesos Aplicada a la Recuperación de Minerales de Cobre. Canada.
- David M. Robson, J. J. (2016). *Technical report on the Loma Larga project, Azuay province, Ecuador*. Toronto .
- François Michaud, C. W. (2009). *Influence of the subduction of the Carnegie volcanic ridge on Ecuadorian geology: Reality and fiction. Geological Society of America*.



- García, A. (03 de 10 de 2015). Universidad de Extremadura. Obtenido de Departamento de Biología y Producción de los Vegetales: <http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/index.html>
- Hach. (16 de marzo de 2018). *Hach Company*. Obtenido de [https://latam.hach.com/cms-portals/hach\\_mx/cms/documents/Que-s-la-conductividad-Final.pdf](https://latam.hach.com/cms-portals/hach_mx/cms/documents/Que-s-la-conductividad-Final.pdf)
- Hedin, N. K. (1994). *Passive treatment of coal mine drainage*. Estados Unidos: Bureau Of Mines.
- Icgen, M. a. (2007). *A Study of the Relative Dominance of Selected Anaerobic Sulfate-Reducing Bacteria in a Continuous Bioreactor by Fluorescence in Situ Hybridization*. *En Microbial Ecology*.
- INV, M. (2015). *INV Metals*. Obtenido de Loma Larga - Ubicación e Historia: <https://www.invmetals.com/loma-larga-location-and-history/>
- Jameson, G. (2013). *Size matter Coarse and quick flotation can reduce costs. The AusIMM Guillaume Delprat Distinguished Lecture*.
- Michael Steinmann, D. H. (1999). *Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach*. *Tectonophysics*, 255–276.
- Morin, K. y. (2001). *Relocation of net-acid-generating waste to improve post-mining water*. *Waste Management*, 185 - 191.
- OCHOA, A. V. (2013). Caracterización preliminar de la geomorfología e hidrología de la microcuenca del río irquis, parroquia victoria del portete, cantón Cuenca – provincia del Azuay. Quito .
- Pamo, L. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*.

- Plante, B. (2003). *Lab To fiel Scale Effects on Contaminated Neutral Drainage Prediction from the Tio Mine Waste Rocks. Journal of Geochemical Exploration., 37 - 47 .*
- Quinto, S. V. (2018). Caracterización geológica-geotécnica del macizo rocoso del cuerpo mineral del yacimiento Loma Larga. Quito.
- Quito, J. S. (2015). Influencia de las actividades antropogénicas sobre la comunidad de aves de páramo en los Andes sur del Ecuador. Cuenca.
- Rawling, D. (1998). *Industrial practice and the biology of leaching of metals from ores. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 268-274.*
- Reascos, D. V. (2017). Análisis de continuidad de extensión de la mineralización alrededor del sistema de alta sulfuración Loma Larga. Quito.
- Robertson, S. (1989). *Draft acid rock drainage technical guide.* Vancouver.
- Rohwerder, T. G. (2003). *Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. Applied Microbiological Biotechnology, 239-248.*
- Salas. (2014). Ingeniería y Construcciones. Obtenido de <https://www.salasing.cl/es/producto/columnas-de-lixiviacion>
- Skoog, W. H. (2004). Fundamentos de Química Analítica. Madrid: CENGAGE Learning.
- Skousen, J. S. (2002). *Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines. Journal Environmental Quality.*
- Watling, H. (2006). *The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on cooper sulphides – A review. Hydrometallurgy, 81-108.*
- Zamora, G. (2003). Predicciones de drenaje ácido de roca mediante test geoquímicos estáticos y dinámicos. Revista Metalúrgica.

## ANEXOS

Anexo 1: Listado de abreviaturas

**DAR:** Drenaje ácido de roca

**DAM:** Drenaje ácido de mina

**PA:** Potencial ácido

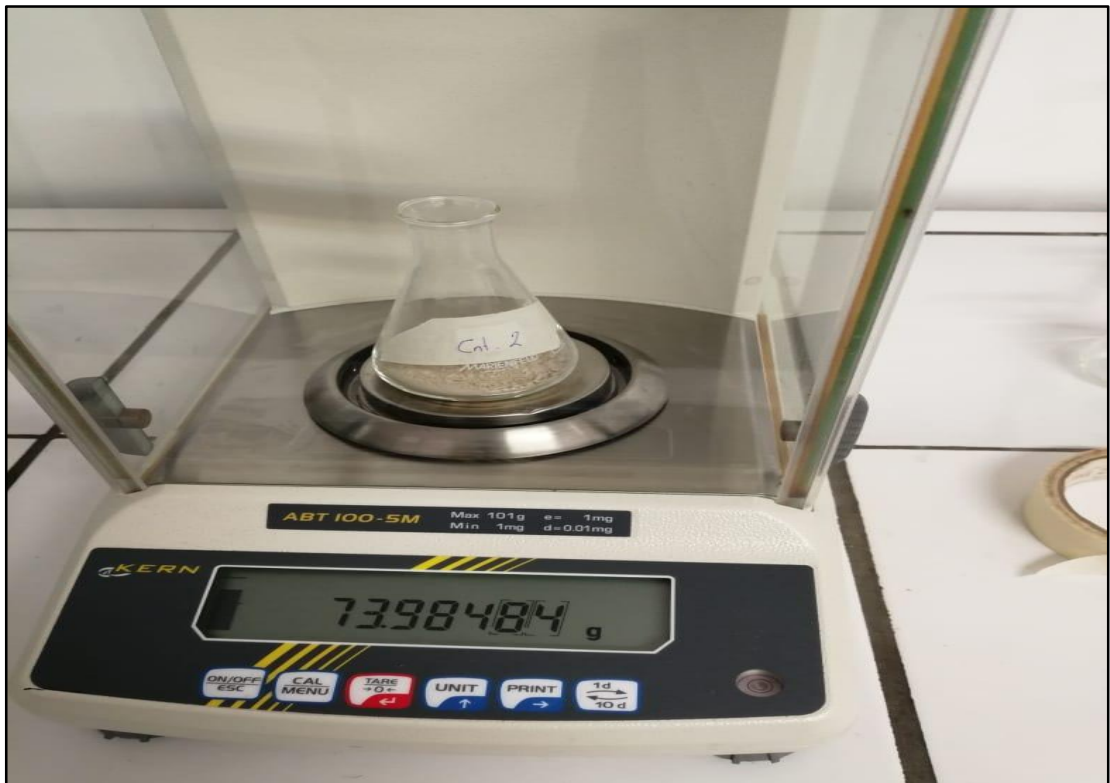
**PN:** Potencial de neutralización

**PNN:** Potencial neto de neutralización

**PMA:** Potencial máximo de acidez

**CNA:** Capacidad de neutralización ácida

Anexo 2: Peso de la muestra



Anexo 3: Colocación de la muestra en el Erlenmeyer



Anexo 4: Colocación de agua destilada



Anexo 5: Solución de material solido más agua destilada



Anexo 6: Filtrado de la solución



Anexo 7: Balones de aforo con la solución filtrada



Anexo 8: Dosificación en tubos de agitación



Anexo 9: Centrifugación de la muestra



Anexo 10: Titulación potenciométrica



Anexo 11: Calentamiento de la muestra

