

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“APLICACIÓN DE ELECTRODIÁLISIS CON MEMBRANA BIPOLAR PARA
LA RECUPERACIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO EN AGUAS
RESIDUALES PRODUCIDAS EN EL ANÁLISIS DE ANIONES POR
CROMATOGRAFÍA IÓNICA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

AUTORES:

JOSE MANUEL, VILCHEZ ESCUDERO

ROBERTO CARLOS, CANGALAYA SANCHEZ

ASESOR:

DR. JUAN TAUMATURGO, MEDINA COLLANA

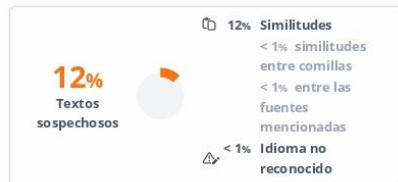
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Ingeniería y tecnología

Callao, 2024

PERÚ



TESIS FINAL - CANGALAYA SANCHEZ-VILCHEZ ESCUDERO



<p>Nombre del documento: TESIS FINAL - CANGALAYA SANCHEZ-VILCHEZ ESCUDERO.pdf</p> <p>ID del documento: 260679adec7198b9e42c8c2a7a40e4b377397164</p> <p>Tamaño del documento original: 3.02 MB</p>	<p>Depositante: FIQ PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION</p> <p>Fecha de depósito: 22/1/2024</p> <p>Tipo de carga: interface</p> <p>fecha de fin de análisis: 22/1/2024</p>	<p>Número de palabras: 16.327</p> <p>Número de caracteres: 116.672</p>
---	---	--

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	stti.ua.es CROMATOGRAFIA IÓNICA. Servicios Técnicos de Investigación 2 fuentes similares	3%		Palabras idénticas: 3% (482 palabras)
2	www.metrohm.com Ion chromatography Instrument Metrohm Metrohm 1 fuente similar	2%		Palabras idénticas: 2% (352 palabras)
3	cientecinstrumentos.cl ¿Qué es Cromatografía? Cientec 5 fuentes similares	2%		Palabras idénticas: 2% (325 palabras)
4	hdl.handle.net Influencia de parámetros operacionales en la concentración de á... 1 fuente similar	1%		Palabras idénticas: 1% (215 palabras)
5	www.revistas.unam.mx 1 fuente similar	1%		Palabras idénticas: 1% (200 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.doi.org Comparative study on the production of gluconic acid by electrodia... El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)
2	Documento de otro usuario #4ad432 El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)
3	hdl.handle.net *Reducción de Aluminio y Zinc mediante tratamientos de Electro... El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
4	www.iagua.es ¿Cuántos tipos de agua hay? iAgua	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)
5	www.scielo.org.mx Uso de curvas de polarización para entender el transporte d... El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (19 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/desalination>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/nanofiltration>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/exchange-membrane>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/water-reclamation>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/perm-selectivity>

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: Ingeniería Química.

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: Unidad de investigación de la Facultad de Ingeniería Química.

TÍTULO: Aplicación de Electrodialisis con Membrana Bipolar para la Recuperación de Hidróxido de Potasio en Aguas Residuales Producidas en el Análisis de Aniones por Cromatografía Iónica.

AUTORES / CÓDIGO ORCID / DNI:

José Manuel, Vilchez Escudero / 0009-0001-6664-8462 / 44702562

Roberto Carlos, Cangalaya Sanchez / 0009-0007-7696-9546 / 46312950

ASESOR / CÓDIGO ORCID / DNI:

Juan Taumaturgo, Medina Collana / 0000-0002-3625-8308 / 06213328

LUGAR DE EJECUCIÓN: Laboratorio de Análisis Medioambientales - Servicios Analíticos Generales S.A.C.

UNIDAD DE ANÁLISIS: Agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica.

TIPO DE INVESTIGACIÓN: Aplicada.

ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN: Cuantitativo.

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Diseño Experimental Taguchi.

TEMA OCDE: Ingeniería y Tecnología.

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
XI CICLO DE TESIS
JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**ACTA N° 128 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**LIBRO 01 FOLIO N° 129 ACTA N° 128 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

A los 23 días del mes de enero del año 2024, siendo las 19:08 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/xch-ftwg-dpj>, el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS para la obtención del TÍTULO profesional de Ingeniero Químico de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. SÁNEZ FALCON LIDA CARMEN	PRESIDENTE
Ing. RODRIGUEZ VILCHEZ RICARDO	SECRETARIO
Lic. CABRERA ARISTA CESAR	MIEMBRO
Ing. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	ASESOR

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de los bachilleres **VILCHEZ ESCUDERO JOSE MANUEL** y **CANGALAYA SANCHEZ ROBERTO CARLOS**, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustentan la tesis titulada "**APLICACIÓN DE ELECTRODIÁLISIS CON MEMBRANA BIPOLAR PARA LA RECUPERACIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO EN AGUAS RESIDUALES PRODUCIDAS EN EL ANÁLISIS DE ANIONES POR CROMATOGRAFÍA IÓNICA**", cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual;

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado de Sustentación y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por **APROBADO** con la escala de calificación cualitativa **MUY BUENO** y calificación cuantitativa **DIECISIETE (17)**, la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 24 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU del 30 de junio de 2021.

Se dio por concluida la sustentación a las 19:44 horas del día 23 de enero del año en curso.

Ing. Dra. SÁNEZ FALCON LIDA CARMEN
PRESIDENTE DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

Ing. Mg. RODRIGUEZ VILCHEZ RICARDO
SECRETARIO DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

Lic. Mg. CABRERA ARISTA CESAR
MIEMBRO DE JURADO DE SUSTENTACIÓN

Ing. Dr. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO
ASESOR DE JURADO DE SUSTENTACIÓN



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
XI CICLO DE TESIS
JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

**"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA
CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"**

INFORME N° 006-2024-JS-XICT-FIQ

DE : Ing. Dra. SANEZ FALCON LIDA CARMEN
PRESIDENTE DE JURADO DE SUSTENTACIÓN
XI CICLO DE TESIS – FIQ

PARA : Ing. Dr. CALDERON CRUZ JULIO CESAR
DECANO – FIQ

ASUNTO : LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES

FECHA : Bellavista, 11 DE MARZO DE 2024

Me dirijo a usted para saludarlo cordialmente y a su vez comunicarle que al haberse visto y revisado las observaciones formuladas por el Jurado de Sustentación del XI Ciclo de Tesis FIQ a la Tesis titulada **"APLICACIÓN DE ELECTRODIÁLISIS CON MEMBRANA BIPOLAR PARA LA RECUPERACIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO EN AGUAS RESIDUALES PRODUCIDAS EN EL ANÁLISIS DE ANIONES POR CROMATOGRAFÍA IÓNICA"** presentado los bachilleres señor **VILCHEZ ESCUDERO JOSE MANUEL** y señor **CANGALAYA SANCHEZ ROBERTO CARLOS** de la Facultad de Ingeniería Química, el Jurado de Sustentación da su conformidad respecto al levantamiento de observaciones para que continúe con los trámites respectivos.

Atentamente.

Ing. Dra. SANEZ FALCON LIDA CARMEN
PRESIDENTE DE JURADO DE SUSTENTACIÓN
XI CICLO DE TESIS – FIQ

DEDICATORIA

ROBERTO CANGALAYA:

Esta tesis va dedicada a Dios en primer lugar, por darme la fuerza y fortaleza de seguir adelante ya que sin el nada sería posible.

A mi hijo que me dio el aliento de día a día superarme y buscar mejoría en mis proyectos de vida.

A mis padres y hermanos que con su esfuerzo, apoyo y consejos hicieron posible culminar esta hermosa carrera.

JOSÉ M. VILCHEZ ESCUDERO:

Con mucho amor, a mi padre Alberto y madre Lorenza, por el infinito apoyo en mi vida y carrera profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestra Universidad Nacional del Callao, a la Facultad de Ingeniería Química por brindarnos la oportunidad de estudiar y adquirir los valores y conocimientos necesarios para ser buenas personas y profesionales, a los docentes con alta trayectoria y sabiduría en sus enseñanzas que nos transmitieron a lo largo de nuestra formación académica y por inculcarnos la pasión y amor por esta carrera, a nuestro asesor por las indicaciones y experiencia en el tema de investigación que nos permitió avanzar en esta tesis, a la empresa Servicios Analíticos Generales S.A.C. por brindarnos el apoyo en la realización de nuestra investigación.

Los autores.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	10
1.2 Formulación del problema.....	11
1.2.1 Problema general.....	11
1.2.2 Problemas específicos	11
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 Justificación.....	12
1.5 Delimitantes de la investigación	12
1.5.1 Teórica	12
1.5.2 Temporal	12
1.5.3 Espacial.....	12
II. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Antecedentes: Internacional y nacional.....	13
2.1.1 Antecedentes internacionales:	13
2.1.2 Antecedentes nacionales:	16
2.2 Bases teóricas.....	17
2.2.1 Cromatografía	17
2.2.2 Tipos de cromatografía	18
2.2.3 Cromatografía Iónica.....	18
2.2.4 Aplicaciones de la IC.....	19
2.2.5 Determinación de aniones por cromatografía iónica	20
2.2.6 Cromatógrafo iónico	21
2.2.7 Tipos de eluyentes utilizados en cromatografía iónica	23

2.2.8	Agua residual	24
2.2.9	Hidróxido de potasio.....	24
2.2.10	Electrodiálisis	25
2.2.11	Clasificación de la electrodiálisis	26
2.2.12	Tipos de membrana de intercambio iónico.....	26
2.2.13	Vida útil de las membranas	27
2.2.14	Aplicaciones de la electrodiálisis	27
2.2.15	Electrodiálisis con membrana bipolar (EDMB)	28
2.2.16	Requisitos técnicos de la EDMB	28
2.2.17	Curva de polarización.....	29
2.3	Marco conceptual:	31
2.3.1	Agua residual producida en el análisis de aniones por IC.....	31
2.3.2	Electrodiálisis con membrana bipolar.....	31
2.3.3	Configuración de electrodiálisis con MB.....	31
2.3.4	Equipo de electrodiálisis.....	32
2.4	Definición de términos básicos.....	33
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	35
3.1	Hipótesis	35
3.1.1	Operacionalización de variable	35
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	37
4.1	Diseño metodológico.....	37
4.1.1	Tipo de investigación.....	37
4.1.2	Diseño experimental.....	37
4.1.3	Matriz de experimentos	38
4.2	Método de investigación.....	39
4.3	Población y muestra	41
4.3.1	Población	41
4.3.2	Muestra	41
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado	42
4.4.1	Lugar de estudio.....	42
4.4.2	Periodo desarrollado	42
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	42

4.5.1	Técnicas para la recolección de la información.....	42
4.5.2	Determinación de las variables de diseño.....	43
4.5.3	Procedimiento y desarrollo de las corridas experimentales	44
4.5.4	Instrumentos para la recolección de información	47
4.6	Análisis y procesamiento de datos.....	48
4.7	Aspectos éticos en investigación	48
V.	RESULTADOS.....	49
5.1	Resultados descriptivos	49
5.1.1	Determinación de las características fisicoquímica del agua residual	49
5.1.2	Resultados del procedimiento experimental.....	50
5.2	Resultados inferenciales	59
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.	65
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares.	67
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos	67
VII.	CONCLUSIONES.....	68
VIII.	RECOMENDACIONES	69
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	ANEXOS	75
	Anexo 1: Matriz de consistencia.....	76
	Anexo 2: Resultados de ensayos volumétricos.....	77
	Anexo 3: Resultados de mediciones amperométricas	81
	Anexo 4: Resultados por ICP-OES	82
	Anexo 5: Resultados por IC de muestras finales del KOH recuperado.....	84
	Anexo 6: Autorización para la realización de la tesis.	85
	Anexo 7: Certificados de reactivos.....	87
	Anexo 8: Característica del cromatógrafo iónico.....	89
	Anexo 9: Característica del ICP	90
	Anexo 10: Fotografías de los experimentos	91
	Anexo 11: Capturas de pantalla del software de resultados del ICP y el IC	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Cromatograma de un cromatógrafo iónico.....	22
Figura 2	Esquema simple de una celda de electrodiálisis.....	26
Figura 3	Estructura de membrana bipolar.....	29
Figura 4	Curva de polarización.....	30
Figura 5	Configuración de celda de un equipo de electrodiálisis.....	31
Figura 6	Esquema del equipo de electrodiálisis.....	33
Figura 7	Diseño de investigación por etapas.....	41
Figura 8	Equipo de electrodiálisis.....	44
Figura 9	Titulación de KOH con BHK.....	46
Figura 10	Mediciones de conductividad en los tanques de AR y KOH.....	46
Figura 11	Voltaje máximo de trabajo.....	51
Figura 12	Histograma del rendimiento de recuperación del KOH.....	52
Figura 13	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 1.....	55
Figura 14	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 2.....	55
Figura 15	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 3.....	56
Figura 16	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 4.....	56
Figura 17	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 5.....	57
Figura 18	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 6.....	57
Figura 19	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 7.....	58
Figura 20	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 8.....	58
Figura 21	Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 9.....	59
Figura 22	Efectos principales para medias.....	60
Figura 23	Efectos principales para medias en 20-40-60 minutos.....	63
Figura 24	Diagrama de Pareto para efectos estandarizados.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Aplicaciones de la cromatografía iónica	20
Tabla 2	Eluyentes comunes para cromatografía de intercambio aniónico	23
Tabla 3	Propiedades físicas del hidróxido de potasio	25
Tabla 4	Características de las membranas catiónica y bipolar	32
Tabla 5	Operacionalización de las variables	36
Tabla 6	Diseño experimental taguchi	38
Tabla 7	Arreglo ortogonal L9.....	38
Tabla 8	Matriz de experimentos	39
Tabla 9	Parámetros y técnicas.....	40
Tabla 10	Codificación de corridas experimentales.....	45
Tabla 11	Caracterización de la composición química inicial del AR.....	49
Tabla 12	Voltaje e intensidad de corriente para la curva de polarización.....	50
Tabla 13	Concentración de recuperación y rendimiento del KOH.....	51
Tabla 14	Conductividad en el recipiente de KOH diluido	53
Tabla 15	Conductividad en el recipiente del AR.....	54
Tabla 16	Tabla de respuestas para medias	59
Tabla 17	Análisis de Varianza de Medias	61
Tabla 18	Rendimiento de recuperación de KOH en 20-40-60 minutos	62
Tabla 19	Análisis de Varianza de Medias	62
Tabla 20	Anova del rendimiento de recuperación de KOH para voltaje-tiempo	66
Tabla 21	Anova del rendimiento de recuperación de KOH para voltaje-flujo ...	66

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AR:	Agua residual
BC:	Configuración de 2 membranas. Bipolar, catiónica
BCA:	Configuración de 3 membranas. Bipolar, catiónica, aniónica.
BCAA:	Configuración de 4 membranas. Bipolar, catiónica, aniónica, aniónica
BCCA:	Configuración de 4 membranas. Bipolar, catiónica, catiónica, aniónica
BHK:	Biftalato ácido de potasio
BPM:	Membrana bipolar
BWED	Electrodiálisis de agua salobre
CC:	Corriente continua
CEM:	Celda de electrodiálisis con membranas
COPs:	Contaminantes orgánicos persistentes
ED:	Electrodiálisis
EDM:	Electrodiálisis metátesis
EDMB:	Electrodiálisis con membranas bipolares
EDR:	Electrodiálisis inversa o reversible
HPLC:	Cromatografía líquida de alta resolución
IC:	Cromatografía Iónica
ICP-OES:	Espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento Inductivo
IEM:	Membrana de intercambio iónico
MA:	Membrana aniónica
MB:	Membrana bipolar
MC:	Membrana catiónica
OEFA:	Organismo de evaluación y fiscalización ambiental
PAD:	Amperometría de pulsos
RF:	Regulador de flujo
RV:	Regulador de voltaje
SEC:	Consumo específico de energía
SED:	Electrodiálisis selectiva
Vg:	Volumen gastado
WR:	Recuperación de agua

RESUMEN

La cantidad de residuos químicos generados por las industrias y muchas de ellas contenientes de residuos recuperables, conlleva a buscar alternativas para su recuperación y reducir la contaminación.

El objetivo de esta investigación fue determinar el rendimiento de recuperación del hidróxido de potasio en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica. La metodología fue de tipo experimental a nivel de laboratorio con 4 etapas, se aplicó el arreglo ortogonal L9 de Taguchi para 3 factores y 3 niveles, las variables experimentales fueron: el potencial eléctrico (5, 10, 15) v, tiempo de operación (20, 40, 60) min y flujo de alimentación (50, 75, 100) ml/min. Se aplicó la electrodiálisis con membrana bipolar con 2 compartimientos y una configuración de membranas "MB/MC/MB". Se obtuvieron resultados de concentración de hidróxido, lecturas amperométricas y de conductividad cada 10 minutos, se determinó la concentración inicial del KOH del agua residual en función al potasio total determinado por espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento Inductivo (ICP-OES). Como conclusión, obtuvimos un rendimiento de recuperación del 77%, un 0.0236N como concentración del KOH inicial del agua residual y los parámetros óptimos de operación fue de 15v, 60min y 75 ml/min.

Palabras clave: electrodiálisis con membrana bipolar, hidróxido de potasio, Taguchi, espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento Inductivo, cromatografía iónica.

ABSTRACT

The amount of chemical waste generated by industries and many of them containing recoverable waste, leads us to seek alternatives for its recovery and reduce pollution.

The objective of this research was to determine the recovery performance of potassium hydroxide in wastewater produced in the analysis of anions by ion chromatography. The methodology was experimental at the laboratory level with 4 stages, Taguchi's L9 orthogonal arrangement was applied for 3 factors and 3 levels, the experimental variables were: the electric potential (5, 10, 15) v, operation time (20, 40, 60) min and feed rate (50, 75, 100) ml/min. Electrodialysis was applied with a bipolar membrane with 2 compartments and a "MB/MC/MB" membrane configuration. Hydroxide concentration results, amperometric and conductivity readings were obtained every 10 minutes, the initial concentration of KOH in the wastewater was determined based on the total potassium determined by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-OES). In conclusion, we obtained a recovery performance of 77%, 0.0236N as the initial KOH concentration of the wastewater and the optimal operating parameters were 15v, 60min and 75 ml/min.

Keywords: electrodialysis with bipolar membrane, potassium hydroxide, Taguchi, optical emission spectrometry with inductively coupled plasma, ion chromatography.

INTRODUCCIÓN

Los laboratorios de análisis medioambientales son encargados de analizar las distintas muestras que los clientes solicitan para cumplir la norma medioambiental del país. En consecuencia, se generan grandes residuos químicos sólidos y líquidos las cuales son tercerizadas por un gestor de residuos ambientales.

Dentro de los análisis se encuentra la determinación de aniones por cromatografía iónica (IC), donde el cromatógrafo es el instrumento para procesar el ensayo (1). La técnica IC consiste en separar los distintos iones de la muestra para luego ser cuantificado. El uso de esta técnica implica usar el hidróxido de potasio (KOH) como eluyente, cuya función es transportar la muestra desde la inyección hasta su detección dentro del cromatógrafo, generándose de esta forma el agua residual (AR).

La composición del AR es básicamente hidróxido de potasio diluido con trazas de contaminación por las muestras y con alto contenido de carbonato por la reacción con el dióxido de carbono del medio ambiente. Este residuo es parte del cúmulo de residuos líquidos generados en laboratorio la cual no es aprovechada sino descartada por terceros.

Con el fin de aprovechar el contenido del KOH en las aguas residuales producidas en la determinación de aniones por IC, la presente investigación se enfocó en determinar el rendimiento de recuperación del KOH, aplicándose la electrodiálisis con membrana bipolar.

La electrodiálisis (ED) es un proceso de separación de iones por membranas gracias a una diferencia de potencial aplicado en el sistema (2). Las membranas utilizadas pueden ser aniónicas "MA", catiónicas "MC" y/o bipolares "MB". La electrodiálisis con membrana bipolar (EDMB), hace posible la producción de iones H^+ y OH^- para la formación de ácidos y bases respectivamente.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática.

La eliminación y/o manejo de residuos químicos, especialmente las aguas residuales (AR) en laboratorios de análisis ambientales, hoy en día generan un problema de contaminación. Con la exigencia de regulaciones ambientales, las empresas de los distintos sectores buscan cumplir con dichas regulaciones y es ahí donde contratan a los laboratorios de análisis ambientales para que se le remitan un informe de ensayo, por ende, muchos de estos ensayos implican generar residuos inorgánicos tales como sulfato de sodio, ácido clorhídrico, hidróxidos de potasio, soluciones de dicromato etc. (3)

El área de cromatografía iónica, es un área del laboratorio encargado en la determinación de aniones y cationes, para ello se utiliza el hidróxido de potasio como medio de transporte (eluyente). El proceso del análisis, genera un agua residual que son gestionados mediante terceros para su eliminación.

El gran cumulo de aguas residuales generadas en los distintos análisis del laboratorio, y el no aprovechamiento de ellos, hace surgir la necesidad de reducir la cantidad de AR del laboratorio, y como primer paso, la investigación sólo se enfocó en el AR producida en la determinación de aniones por cromatografía iónica.

En esta investigación, la determinación del rendimiento de recuperación de KOH mediante la técnica de electrodiálisis con membrana bipolar, se considera el pilar para el futuro tratamiento del AR ya que con las variables de operación (voltaje, flujo y tiempo de operación) en los distintos niveles, hace posible encontrar el rendimiento más adecuado para su futura concentración y purificación del KOH.

1.2 Formulación del problema.

1.2.1 Problema general

¿Cuál será el rendimiento del hidróxido de potasio recuperado con la aplicación de la electrodiálisis con membrana bipolar en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuál será la composición química inicial del agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica?

¿Cuáles serán los parámetros óptimos para recuperar el hidróxido de potasio mediante electrodiálisis con membrana bipolar?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el rendimiento del hidróxido de potasio recuperado con la aplicación de la electrodiálisis con membrana bipolar en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar la composición química inicial del agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica.

Determinar los parámetros óptimos para recuperar el hidróxido de potasio mediante electrodiálisis con membrana bipolar.

1.4 Justificación

La siguiente investigación permitirá encontrar los parámetros para la recuperación del hidróxido de potasio mediante una tecnología limpia como es la electrodiálisis con membrana bipolar, aprovechando la reutilización del agua residual rico en hidróxido de potasio, siendo los resultados de esta investigación un gran aporte a futuras investigaciones y así llegar a un siguiente nivel como: la concentración y purificación del hidróxido de potasio, diseño de planta piloto, etc.

1.5 Delimitantes de la investigación

1.5.1 Teórica

La electrodiálisis con membranas bipolares es un proceso electroquímico que consiste en el uso de la corriente eléctrica para generar iones a través del paso de membranas catiónicas, aniónicas y bipolares, los cuales desestabilizan las moléculas mediante un proceso de selección, para producir sustancias deseadas.

1.5.2 Temporal

La tesis de desarrollo en un periodo de 7 meses, de mayo a noviembre del 2023.

1.5.3 Espacial

La investigación se centró en la recuperación del hidróxido de potasio a partir del agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica del segundo trimestre del año del área de cromatografía iónica de un laboratorio privado de análisis de ambiental ubicado en el distrito de Cercado de Lima.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes: Internacional y nacional.

2.1.1 Antecedentes internacionales:

En la investigación "Separación de hidróxido de sodio de las salmueras posteriores a la carbonatación por (EDMB)" Los autores realizan una prueba preliminar que utiliza una solución de alimentación al 5% en peso de NaCl y 0.8mol/L de Na, aplicando automáticamente un rango de voltaje de 21 a 35 V dependiendo de la conductividad de la solución de alimentación. En este modo, el NaOH se recuperó en 1.24mol/L después de 30 minutos a 25°C. Los potenciales más bajos y más altos (21 y 35 V) se probaron a 25 y 35°C respectivamente, utilizando la misma solución para analizar los efectos del potencial aplicado y la temperatura sobre la tasa de recuperación de NaOH. En el compartimento de alimentación, la conductividad disminuyó gradualmente con el tiempo, mientras que aumentó con el tiempo en el compartimento base. Las recuperaciones de NaOH ocurrieron después de 30 y 50 min a 21 y 35 V, respectivamente, y la tasa de recuperación de NaOH fue más rápida con el aumento en el voltaje aplicado. (4)

En la investigación "Separación de amoníaco mediante electrodiálisis de membrana bipolar en residuos orgánicos por digestión anaeróbica" La autora estudió diferentes voltajes aplicados para optimizar el funcionamiento de la pila EDMB, esto aumenta la eficiencia de separación de amoníaco y mejora la recuperación de amoníaco. La operación EDMB a 5,0v dio como resultado una rápida separación de amoníaco del 87% en 30 minutos con un bajo consumo energético de 7,7 kWh/kg-N; también se encontró que la pureza del amoníaco recuperado era mayor, reduciendo el tiempo de operación de 60 a 30 minutos. La operación de EDMB cerca de la densidad de corriente límite resultó en una menor selectividad del amoníaco, mientras que el consumo de la energía cambió significativamente. Teniendo en cuenta la tasa de separación de amoníaco, la pureza, y consumo de energía, la aplicación de voltaje de 5,0v durante 30 minutos es recomendado para operar en la EDMB. (5)

En la investigación “Estudio de electrodiálisis con membranas bipolares”. El autor estudió el efecto de la concentración máxima alcanzable del NaOH en cuatro diferentes configuraciones de EDMB. La mayor concentración de hidróxido de sodio fue obtenida en la configuración de cuatro compartimentos BCCA (58 g/l), que era aproximadamente el 30% superior al valor de la configuración estándar BCA de tres compartimentos (45 g/l). En la configuración de cuatro compartimentos, BCAA ha medido niveles de hidróxido ligeramente más bajos concentración (50 g/l), mientras que en el caso de la configuración de dos compartimentos BC La concentración de hidróxido de sodio fue de aproximadamente 40 g/l, que es similar al valor en la configuración de tres compartimentos. Las configuraciones de cuatro compartimentos tienen un efecto positivo al aumentar la concentración máxima de NaOH. (6)

En la investigación “Obtención de ácidos y bases a partir de disoluciones salinas concentradas mediante electrodiálisis con membranas bipolares” El autor trabajó con una planta piloto equipada con una celda de EDMB y a partir de una mezcla de disoluciones salinas sintéticas de NaCl, Na₂SO₄; donde obtuvo un menor consumo energético a medida que se aumenta la concentración de las sales para la producción de NaOH. Como consecuencia de la mayor presencia de iones en disolución, donde a tensión constante de 8.9 V se obtuvieron valores de consumo inferiores para conseguir concentrar hasta la misma cantidad de los productos requeridos, y se presentarían como una forma viable de producir NaOH hasta 1,8 mol/L (con un consumo energético de 5 kWh/kg NaOH). (7)

En la investigación “Un sistema emergente de electrodiálisis a escala piloto para la desalinización de permeado: Evaluación del papel de los factores típicos” El autor fabricó un sistema ED energéticamente eficiente a escala piloto para la desalinización de permeado de nano filtración de agua de mar, y se investigaron en detalle siguientes factores: el tipo de membrana de intercambio iónico (IEM), la recuperación de agua (WR), la temperatura y la concentración de alimentación. Los resultados muestran que la selectividad de IEM está relacionado con la fuga de iones, esto desempeñó un papel importante en el

rendimiento de la desalinización por ED. Además, la salinidad del agua producida se triplicó y el WR aumentó del 53 % al 67 % debido a la intensificación de la retro difusión iónica. Además, el SEC aumentó 37.7 % con una relación de remoción de sal similar cuando la temperatura aumentó de 7 a 29 °C, lo que se atribuye a los cambios en las estructuras IEM y las propiedades químicas de la solución. Finalmente, la fluctuación en la concentración de alimentación tuvo una influencia significativa en la calidad del agua producida y el SEC debido al modo de operación continua . Este estudio proporciona información y orientación para el proceso de desalinización BWED a gran escala. (8)

En la investigación “Estudio comparativo sobre la producción de ácido glucónico por electrodiálisis y electrodiálisis de membrana bipolar: efectos de las configuraciones celulares” Para producir ácido glucónico a partir de gluconato de sodio , tres tipos de configuraciones celulares de electrodiálisis de membrana bipolar(EDMB) y se aplicaron dos tipos de configuraciones de celdas de electrodiálisis (ED) y se compararon factores como la variación de corriente, tasa de conversión, eficiencia de corriente y consumo de energía. Los resultados indicaron que la configuración de celda EDMB 2C–C (EDMB de dos cámaras con membrana de intercambio catiónico) tuvo el mejor desempeño general que la configuración EDMB 2C-A (EDMB de dos cámaras con membrana de intercambio aniónico) y la configuración EDMB 3C (EDMB de tres cámaras con membrana de intercambio de aniones), y la configuración ED 3C (ED de tres cámaras) tuvo el mejor rendimiento general que la configuración ED 4C (ED de cuatro cámaras). Se estableció un modelo de producción industrial y se estimó que el costo de producción del ácido glucónico es de 0,25 US\$/kg para EDMB 2C–C y 0,067 \$/kg para ED 3C, respectivamente. Teniendo en cuenta el valor calculado para el hidróxido de sodio, el coste de EDMB 2C–C será 0. 104 \$/kg, inferior al de producción tradicional. Aunque ED3C tiene el costo de producción más bajo, produce el subproducto sulfato de sodio que debe manejarse más. (9)

2.1.2 Antecedentes nacionales:

En la investigación “Evaluación de los parámetros operacionales en un equipo de electrodiálisis para recuperación de iones níquel a partir de efluentes galvánicos”, se determinaron los parámetros de operación adecuados en un equipo de electrodiálisis a nivel de laboratorio, para la recuperación de iones níquel provenientes de las aguas de enjuague del proceso de niquelado. Utilizaron soluciones sintéticas semejantes a los fluidos de la galvanoplastia y soluciones reales como fluidos a tratar a diferentes concentraciones aplicando la metodología Taguchi. Así mismo, se determinó que los parámetros de operación óptimos del proceso para ambas soluciones fueron: flujo de alimentación 600 mL/min, concentración inicial de 50 ppm de sulfato de níquel, 0.03 M de concentración de sulfato de sodio en el lavado de electrodos y el potencial eléctrico fue de 15 V, los cuales le permitieron establecer que los resultados de recuperación fueran muy similares para la solución sintética y la solución real. (10)

En la investigación “Influencia de parámetros operacionales en la concentración de ácido y base producido a partir de salmuera procedente de osmosis inversa vía electrodiálisis bipolar”, se determinó los parámetros de operación adecuados en un equipo de electrodiálisis a nivel experimental, para evaluar en qué medida influye los parámetros operacionales en la concentración de ácido y base producido a partir de salmuera vía electrodiálisis bipolar y ser una alternativa para mejorar la gestión de los efluentes salinos provenientes de plantas de desalinización, los resultados muestran claramente cuando el voltaje de operación de la celda es 15V, flujo volumétrico del ácido y base es de 400mL/min, y la concentración inicial del ácido y base de 0,05N, la concentración del ácido alcanza a 0,16N y 0,132 N de la base, por lo que de los cuatro parámetros de operación del equipo de electrodiálisis bipolar en estudio, el de mayor influencia en la concentración es el potencial eléctrico. (2)

En la investigación “Evaluación de los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis para la desmineralización de aguas subterráneas del

parque industrial de Arequipa para alimentación de calderas” Se determinó la densidad de corriente límite empleando el método de la curva de polarización, para ello se hicieron mediciones de voltaje aplicado a la celda de electrodiálisis y la corriente que fluye por la celda de electrodiálisis, para un flujo de alimentación correspondiente al diluido de 19.2 mL/min, 26.4 mL/min y 31.2 mL/min, por lo cual el voltaje aplicado de la fuente se incrementó en 2 voltios cada 4 minutos. Luego se graficaron los datos obtenidos: Intensidad de corriente vs. Voltaje, para poder obtener la curva de polarización, se determinó la densidad de corriente límite, que es la máxima cantidad de corriente que puede circular a través de una determinada área del electrodo sin que se produzca un brusco incremento de su resistencia eléctrica o una drástica disminución. (11)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Cromatografía

La cromatografía es un procedimiento químico utilizado en todas las ramas de la ciencia, que permite la separación, identificación, cuantificación, cualificación y determinación de los componentes químicos individuales de sustancias en mezclas complejas, de acuerdo con la purificación de compuestos de una manera muy precisa. Estos procedimientos, abarcan varias técnicas separativas basadas en propiedades físicas de ciertos materiales que, en interacción con otras sustancias o mezclas de éstas, permite descomponer la mezcla y analizar sus constituyentes, mediante una fase móvil que consta, según el procedimiento, de un líquido o gas que corre a través de una superficie y de la fase estacionaria, una fase estacionaria de materia sólida o líquida que se queda en la misma posición. (12)

De esta manera, los componentes en una muestra a analizar se van distribuyendo en estas dos fases, cuando la fase móvil atraviesa la fase estacionaria es lo que se denomina proceso de elución. La separación de los distintos componentes de la muestra es resultado de repetidos procesos de sorción – desorción de estos componentes, para finalmente lograr su separación y visualizarlos en una gráfica que se conoce como cromatograma. (12)

2.2.2 Tipos de cromatografía

Los métodos cromatográficos se clasifican según el estado de la fase móvil en:

A. Cromatografía líquida: en este tipo de cromatografía, la fase móvil es un solvente o mezcla de ellos y la fase estacionaria un sólido que interactúa con las sustancias a separar. Existen diferentes ordenamientos para este tipo de cromatografía, ya que puede hacerse en columna, papel, capa fina o HPLC (cromatografía líquida de alta resolución). (12)

B. Cromatografía de gases: aquí la fase móvil es un gas inerte y fase estacionaria es un sólido (cromatografía gas-líquido). Este tipo de cromatografía siempre es en columna. (12)

C. Cromatografía con fluido supercrítico: en este tipo la fase móvil es un fluido por encima de sus temperaturas y presión críticas. Es utilizado para el análisis y purificación de moléculas de bajo a moderado peso molecular. (12)

2.2.3 Cromatografía iónica

La Cromatografía Iónica está íntimamente relacionada con la cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC). Es un método eficaz para la separación y determinación de iones, basado en el uso de resinas de intercambio iónico. Existen varios modos de detección de los analitos: (13)

A. En la detección por conductividad, se mide la conductancia del ion analito cuando pasa a través de una célula de conductividad. Tanto el eluyente como la muestra son especies iónicas y suelen presentar una elevada conductividad de fondo por lo que para detectar con una buena sensibilidad los analitos, es necesario eliminar la conductividad de fondo del eluyente, químicamente, en una reacción post columna en la que se convierte al eluyente en una especie con baja conductividad. A estas columnas se les conoce con el nombre de supresores de conductividad, y pueden ser químicos o electroquímicos. Este modo de detección es el más común en cromatografía iónica. (13)

B. En la detección amperométrica, se mide la corriente eléctrica generada cuando el analito es oxidado o reducido en el interior de una célula

amperométrica, que consta de un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar. La oxidación o reducción de los iones dependerá de la aplicación de un potencial entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar. La señal medida consiste en la Intensidad de la corriente generada entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar. Dentro de este modo de detección destaca la amperometría de pulsos (PAD), muy utilizada para la detección de carbohidratos. Este modo de detección es muy selectivo ya que sólo los iones susceptibles de oxidación o reducción al potencial aplicado podrán ser medidos. (13)

C. La detección espectrofotométrica Ultravioleta-VIS, se basa en la absorción de energía electromagnética por ciertos grupos presentes en las moléculas o iones llamados cromóforos. La longitud de onda y la energía absorbida depende de los enlaces químicos dentro de la molécula o ion y son característicos de los mismos. En cromatografía iónica en detección fotométrica directa sólo los iones de la muestra que presenten grupos cromóforos podrán absorber parte de la luz que llega a la célula, originando una disminución en la intensidad del haz de luz que es directamente proporcional a la cantidad de soluto absorbente eluido. La detección UV en cromatografía iónica no es muy significativa, ya que los cationes y aniones inorgánicos y las moléculas orgánicas alifáticas carecen de grupos cromóforos, por tanto, se usa como complemento de la detección por conductividad. Una de las aplicaciones más comunes de este modo de detección es la determinación de nitritos y amonio en aguas de mar. La detección UV-VIS de estos iones minoritarios (y cromóforos) en el mar se puede conseguir eliminando la interferencia de los iones mayoritarios en este tipo de muestras: cloruro y sodio (no cromóforos). (13)

2.2.4 Aplicaciones de la IC

La tabla 1, muestra las aplicaciones de la IC según el tipo de detección:
(13)

Tabla 1

Aplicaciones de la cromatografía iónica

Tipo de detección	Aplicación
Conductividad	Cationes y aniones inorgánicos mayoritarios en aguas, Oxihaluros, Acetatos y haloacetatos, Aniones orgánicos e inorgánicos. Ácidos carboxílicos de bajo peso molecular Algún metal de transición, Amonio y aminas de bajo peso molecular (etanolaminas, metilaminas, etc.)
Amperométrica	Tioles, sulfuros y cianuros, Sulfitos en muestras líquidas (baños de galvanoplastia, productos farmacéuticos, o en alimentos y bebidas).
Amperométrica de pulsos	Azúcares en zumos, mieles y vinos (monosacáridos, disacáridos) y alcoholes de azúcar (sorbitol, arabitol, inositol), a muy bajas concentraciones.
UV-VIS	Nitratos y nitritos en aguas de mar (detección directa), Amonio en aguas de mar (derivatización + detección UV) Cromo (6+) (derivatización + detección UV)

Fuente: Servicios técnicos de investigación de la Universidad de Alicante 2023.

2.2.5 Determinación de aniones por cromatografía iónica

Para la determinación de aniones por cromatografía iónica, se hace uso de un cromatógrafo iónico y se pueden determinar los aniones siguientes: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , F^- , NO_2^- , I^- , Br^- , SO_3^{2-} , S^{2-} , ClO_3^- , SCN^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, ClO_2^- , es

decir, cloruro, sulfato, nitrato, fosfato, fluoruro, nitrito, yoduro, bromuro, sulfito, sulfuro, clorato, tiocianato, tiosulfato y clorito. (14)

El método para la determinación de aniones viene descrito según la norma a emplear, por ejemplo, la norma UNE-EN ISO 14911, la cual es aplicable a cualquier tipo de agua.

2.2.6 Cromatógrafo iónico

Los cromatógrafos iónicos son instrumentos analíticos que se utilizan para separar y cuantificar iones en muestras líquidas. Los siguientes pasos se realizan mediante un instrumento de cromatografía iónica: (15)

A. Prelavado: El eluyente, o fase móvil, pasa por el sistema de IC. El eluyente se bombea continuamente a través de la columna de separación. Consiste en una solución acuosa con varios iones que compiten con los iones de la muestra por los sitios de unión de la resina en la columna de separación. La composición del eluyente se optimiza cuidadosamente para lograr la mejor separación de los iones objetivo.

B. Preparación de muestras: Normalmente las técnicas de preparación de muestras se utilizan antes de inyectar la muestra en el bucle de muestra. La preparación de muestras produce resultados más precisos y fiables y puede evitar daños a la columna de separación y al sistema IC. Las técnicas de preparación de muestras incluyen filtración, dilución y extracción.

C. Válvula de inyección: La posición de la válvula de inyección cambia a FILL y la muestra ingresa al circuito de muestra.

D. Inyección de muestra: La válvula de inyección inyecta la muestra hacia la columna de separación.

E. Separación de muestras: La muestra fluye a través de una columna de separación, o fase estacionaria, llena de una resina de intercambio iónico. Esta resina contiene grupos funcionales cargados que interactúan selectivamente con iones específicos. La elección de la resina depende de los iones objetivos a analizar.

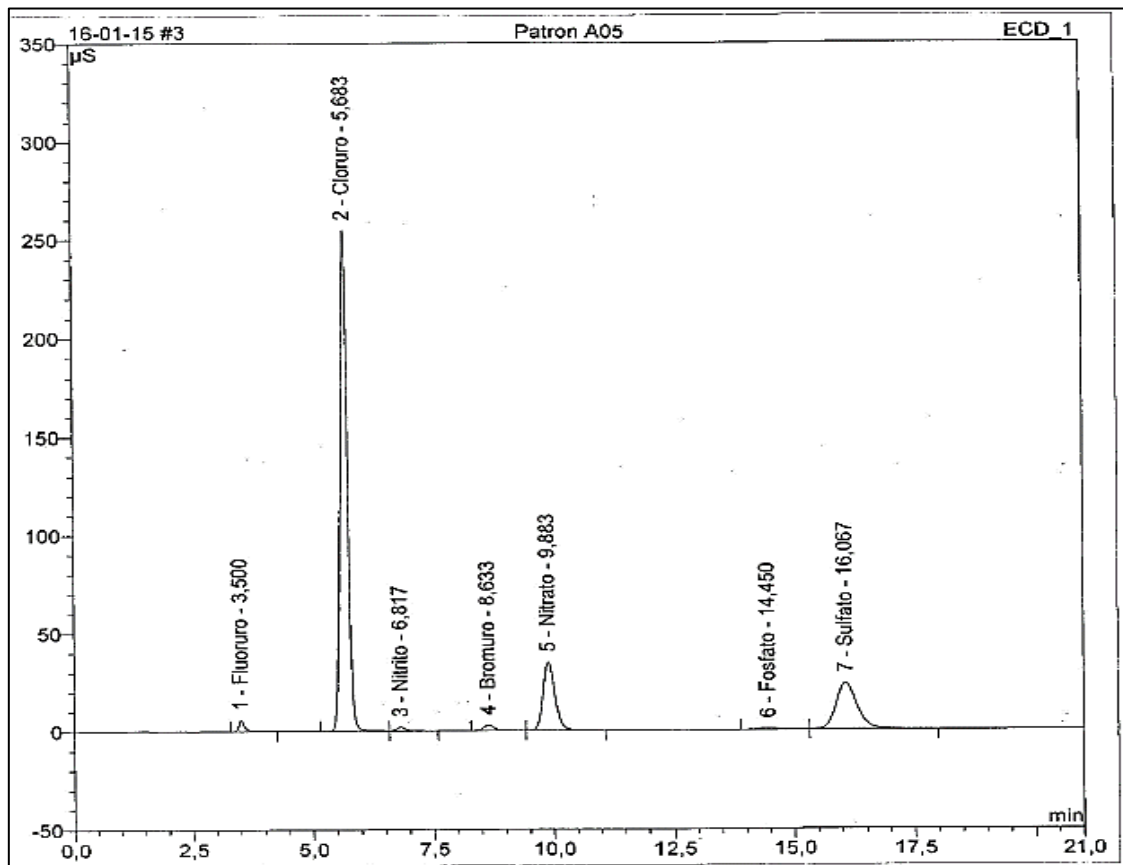
F. Elución y detección: Los iones retenidos se liberan gradualmente de la resina a medida que la muestra avanza a través de la columna. El tiempo de

retención de cada ion depende de su afinidad por la resina y las condiciones del eluyente. El eluyente, que contiene los iones separados, llega a un detector dentro del cromatógrafo iónico. Se pueden utilizar diferentes tipos de detectores, como detectores de conductividad, detectores UV/Vis o espectrómetros de masas. El detector mide la concentración de iones específicos que eluyen de la columna.

G. Análisis de los datos: Un software de cromatografía iónica registra y procesa la salida del detector. Los datos resultantes se utilizan para generar cromatogramas que muestran la concentración de iones objetivo a lo largo del tiempo. Ver figura 1.

Figura 1

Cromatograma de un cromatógrafo iónico



Nota: Ejemplo de cromatograma de determinación de aniones por cromatografía iónica. Tomado de (Quimitube, 2017)

2.2.7 Tipos de eluyentes utilizados en cromatografía iónica

La tabla 2 muestra los eluyentes típicos utilizados en la cromatografía de intercambio aniónico, junto con el modo de detección asociado con cada eluyente. (16)

Tabla 2

Eluyentes comunes para cromatografía de intercambio aniónico

Sistema eluyente	Comentarios	Modo de detección común
Hidróxido (sodio o potasio)	El ion hidróxido es el anión competidor eluyente más débil, pero tiene una conductancia iónica equivalente muy alta. Es adecuado para aniones débilmente retenidos y se utiliza con columnas de intercambio aniónico débil o selectivas de hidróxido.	Conductividad suprimida o conductividad indirecta.
Carbonato/bicarbonato (sodio o potasio)	Un sistema eluyente más fuerte que los eluyentes más simples que contienen solo hidróxido y permite un mayor control de la selectividad mediante el control de la relación carbonato/bicarbonato.	Conductividad suprimida.
Ácidos carboxílicos alifáticos (p. ej., ácidos cítrico, tartárico, acético y fórmico)	Estos son eluyentes débiles (citrato en barra) y relativamente altamente conductores, con una absorción de UV de débil a moderada. Son útiles para la elución de aniones débilmente retenidos.	Conductividad directa e indirecta.
Ácidos sulfónicos aromáticos y alifáticos.	Los ácidos sulfónicos aromáticos son eluyentes fuertes, con una conductividad relativamente baja a moderada y una alta absorción de rayos UV. Los ácidos sulfónicos alifáticos tienen selectividades de intercambio iónico moderadas y absorben débilmente los rayos UV.	Ácidos sulfónicos aromáticos: conductividad directa e indirecta, absorbancia UV indirecta. SA alifáticos: absorbancia UV directa.
Ácidos carboxílicos aromáticos	Los ejemplos incluyen sistemas tampón de benzoato/ftalato de ácido benzoico/ácido ftálico, que se emplean comúnmente en CI no suprimidos. Tienen conductancias iónicas bajas y absorben fuertemente los rayos UV. Los eluyentes pueden proporcionar una acción tampón en un rango relativamente amplio de pH.	Conductividad directa o absorbancia UV indirecta.
Sales inorgánicas	Se pueden preparar eluyentes inorgánicos fuertes a partir de sales de cloruro, sulfato y fosfato. Estos son incompatibles con la detección conductimétrica.	Absorbancia UV directa, detección electroquímica.

Fuente: Servicios técnicos de investigación de la Universidad de Alicante (2023)

2.2.8 Agua residual

Según la OEFA define al agua residual como: “aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado”. Asimismo, la OEFA los clasifica en: (17)

A. Aguas residuales domésticas, Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente.

B. Aguas residuales industriales, Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras.

C. Aguas residuales municipales, Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

2.2.9 Hidróxido de potasio

Es una base fuerte y absorbe el dióxido de carbono (CO₂) del ambiente fácilmente, también es conocido como potasa cáustica (18).

Es un sólido inodoro, blanco o ligeramente amarillo, escamoso o grumoso que a menudo se encuentra en una solución acuosa. (19).

Su información numérica asignada por el US Chemical Abstracts Service es N° CAS 1310-58-3 (20).

A. Propiedades físicas. se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Propiedades físicas del hidróxido de potasio

Umbral de olor	Inodoro
Punto de inflamación	No combustible
Presión de vapor	1 mm Hg a 1317 °F (714 °C)
Densidad relativa	2.04 (agua=1)
Solubilidad en agua	Soluble
Punto de ebullición	2408 °F (1320 °C)
Punto de fusión	761 °F (405 °C)
Peso molecular	56.1

Fuente: New jersey deparment of health, Hazardous Substance Fact Sheet.

B. Aplicaciones del hidróxido de potasio, En la síntesis de productos químicos como el carbonato de potasio, fertilizantes, elaboración de productos de limpieza, reactivo para análisis químicos, en la industria textil, en la industria farmacéutica, etc.

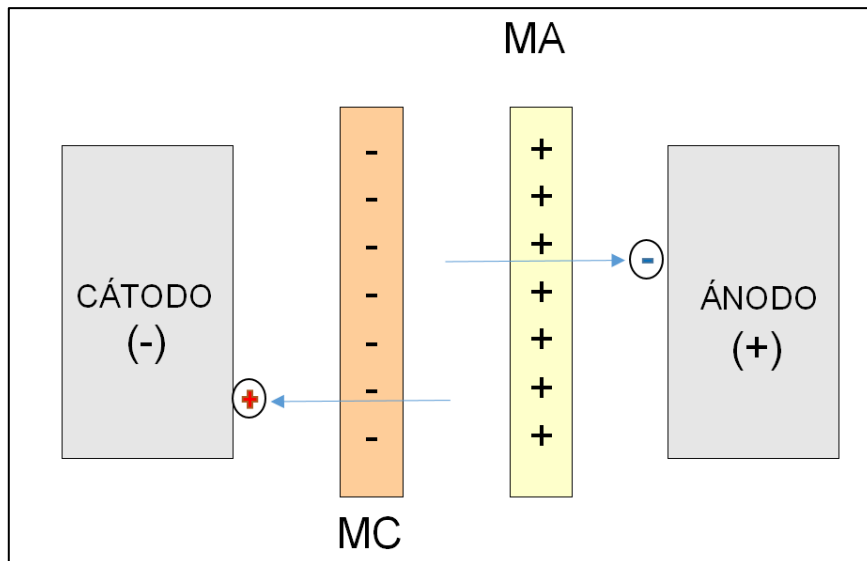
2.2.10 Electrodialisis

La electrodialisis es un proceso de separación por membranas en el que éstas son selectivas y dejan pasar los iones, pero no el agua. La solución salina se sitúa entre un par de membranas aniónica y catiónica a través del cual fluyen los iones bajo el cambio eléctrico de una corriente directa con lo cual el agua queda parcialmente desalinizada (21).

La electrodialisis es un proceso de separación electroquímica que utiliza energía de CC para mover los iones a través de membranas de intercambio iónico selectivas para eliminar la sal de un flujo de alimentación en un flujo de concentrado, dejando un producto con valor agregado (ver figura 2). (22)

Figura 2

Esquema simple de una celda de electrodiálisis



Nota, MC: membrana catiónica, MA: membrana aniónica.

2.2.11 Clasificación de la electrodiálisis

La electrodiálisis presenta diferentes desarrollos en función del tipo y disposición de las membranas en los módulos, como pueden ser: la electrodiálisis selectiva (SED), la electrodiálisis inversa o reversible (EDR), la electrodiálisis con membranas bipolares (EDMB) o la electrodiálisis metátesis (EDM). (23)

2.2.12 Tipos de membrana de intercambio iónico

Existen dos tipos de membranas (24):

A. Homopolares. Membranas que contienen solamente un tipo de carga fija y que permiten migrar aniones o cationes. Se destacan dos tipos de membranas homopolares:

a. Membranas de intercambio aniónico (MA). Contienen cargas positivas fijas, y permiten el paso de aniones.

b. Membranas de intercambio catiónico (MC). Contienen cargas negativas fijas, y permiten el paso de cationes.

B. Bipolares. Son una combinación de una MA y una MC, que se encuentran en contacto directo o separado por un medio poroso. Esta región intermedia se denomina región de transición. Este tipo de membranas permiten la disociación de moléculas de agua al aplicar un campo eléctrico, conocida como hidrólisis del agua.

2.2.13 Vida útil de las membranas

Las membranas de electrodiálisis tienen una vida útil de aproximadamente 10 años. El cuidado y la limpieza de las membranas extienden la vida útil de la misma, y garantiza la calidad del producto y reduce el consumo de energía. Las membranas catiónicas tienen mayor duración que las aniónicas. Las membranas aniónicas son susceptibles a la oxidación con cloro y otros oxidantes fuertes. Los electrodos tienen una vida útil entre 2 o 3 años. (11)

2.2.14 Aplicaciones de la electrodiálisis

Las aplicaciones industriales más sobresalientes se mencionan en la siguiente lista (25):

- A.** Desalinización de aguas salobres. (<5.000 ppm de salinidad inicial).
- B.** Recuperación de ácidos y bases. De aguas que contienen sales (por ejemplo: recuperación de ácido sulfúrico y sosa de una disolución de sulfato sódico).
- C.** Recuperación de componentes valiosos. De acabados metálicos o tratamiento de sus efluentes.
- D.** Desalinización de suero de queso y leches no grasas.
- E.** Eliminación de cenizas de melazas y zumos de remolacha, caña y otros azúcares.
- F.** Desalinización de efluentes residuales industriales y urbanos.
- G.** Desalinización de productos de fermentación.
- H.** Desmineralización de plasma sanguíneo.

2.2.15 Electrodiálisis con membrana bipolar (EDMB)

Están compuestas principalmente por la superposición de una membrana de intercambio catiónico y otra de intercambio aniónico. La principal función de estas membranas es catalizar la disociación del agua para producir ácidos y bases en compartimientos contiguos de una celda de electrodiálisis, como se ve en la figura 3. (26).

2.2.16 Requisitos técnicos de la EDMB

Los requisitos técnicos que un módulo de EDMB debe cumplir son los siguientes (27):

A. La distancia mínima entre las membranas. Tiene que ser de entre 0.5 y 1 mm, para reducir la resistencia eléctrica.

B. Las condiciones hidrodinámicas. Deben ser las adecuadas según las especificaciones del módulo utilizado, garantizando una velocidad superficial alta.

C. La proporción del área de la membrana. Respecto el volumen del módulo de EDMB debe ser alto.

D. Evitar las fugas. Entre los diferentes compartimentos.

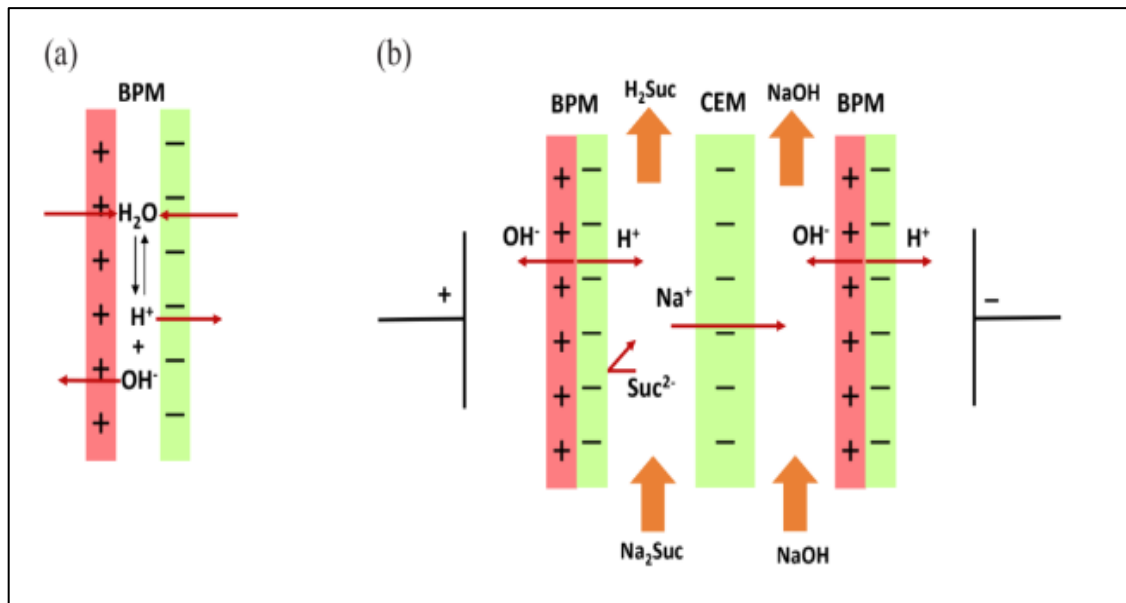
E. Reducir los cortocircuitos. Evitar otros posibles puntos de mal funcionamiento del circuito eléctrico.

F. Disponer de separadores. Que se encargan de dirigir las corrientes de las distintas disoluciones.

G. Límite de temperatura de operación. Este límite se determina por el material del cual están fabricados los espaciadores, el cual tiende a perder su rigidez a mayores temperaturas.

Figura 3

Estructura de membrana bipolar



Nota. a) Estructura de una membrana bipolar con capa de intercambio aniónico, que se junta donde tiene lugar la disociación del agua y la capa de intercambio catiónico. b) Configuración de una celda de electrodiálisis con membranas bipolares para la concentración de NaOH y la producción simultánea de ácido succínico. Tomado de (Fernández, otros. 2014).

2.2.17 Curva de polarización

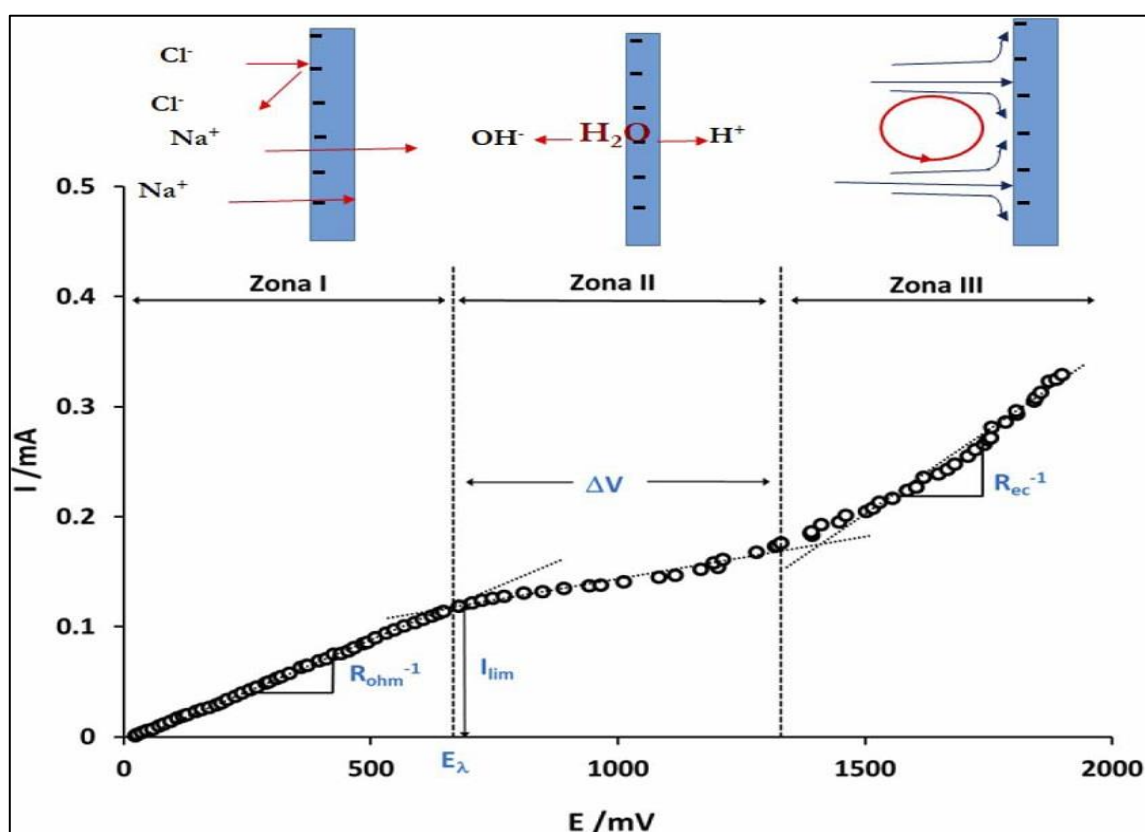
Una curva de polarización es un gráfico de densidad de corriente (I) versus potencial de electrodo (V) para una combinación específica de electrodo y electrolito (28).

La curva de polarización presenta zonas (ver figura 4) tal como la zona I o zona óhmica, se caracteriza por una relación lineal entre la corriente y el potencial, es decir se cumple la ley de Ohm, la zona II o de pseudomeseta se reconoce porque la corriente es prácticamente independiente del potencial, debido a que en las cercanías de la membrana los iones se agotan en un momento dado y al no existir portadores de carga la resistencia aumenta

notablemente. Sin embargo, la corriente incrementa ligeramente con el potencial, debido a que la ausencia de portadores de carga, es compensada por los iones formados por efectos acoplados como el desdoblamiento del agua (Formación de H^+ y OH^-), en la zona III o región de electro convección, la corriente y el potencial nuevamente adoptan una relación lineal. En efecto, los iones atraviesan la membrana a través de los poros, no solo perpendicularmente a la superficie de la membrana, sino que también tangencialmente; dado que la superficie de la membrana es rugosa y heterogéneas, las cargas se mueven en remolinos que llevan a una destrucción de la capa de difusión y el reinicio de la difusión (29).

Figura 4

Curva de polarización



Nota. Forma típica de una curva de polarización para una MC. En la parte superior se ilustran los fenómenos que predominan en cada etapa. Tomado de (Torres, otros. 2019).

2.3 Marco conceptual:

2.3.1 Agua residual producida en el análisis de aniones por IC

En la determinación de aniones por cromatografía iónica, el residuo generado por parte del cromatógrafo se le considera como un agua residual, específicamente un agua residual industrial.

2.3.2 Electrodiálisis con membrana bipolar

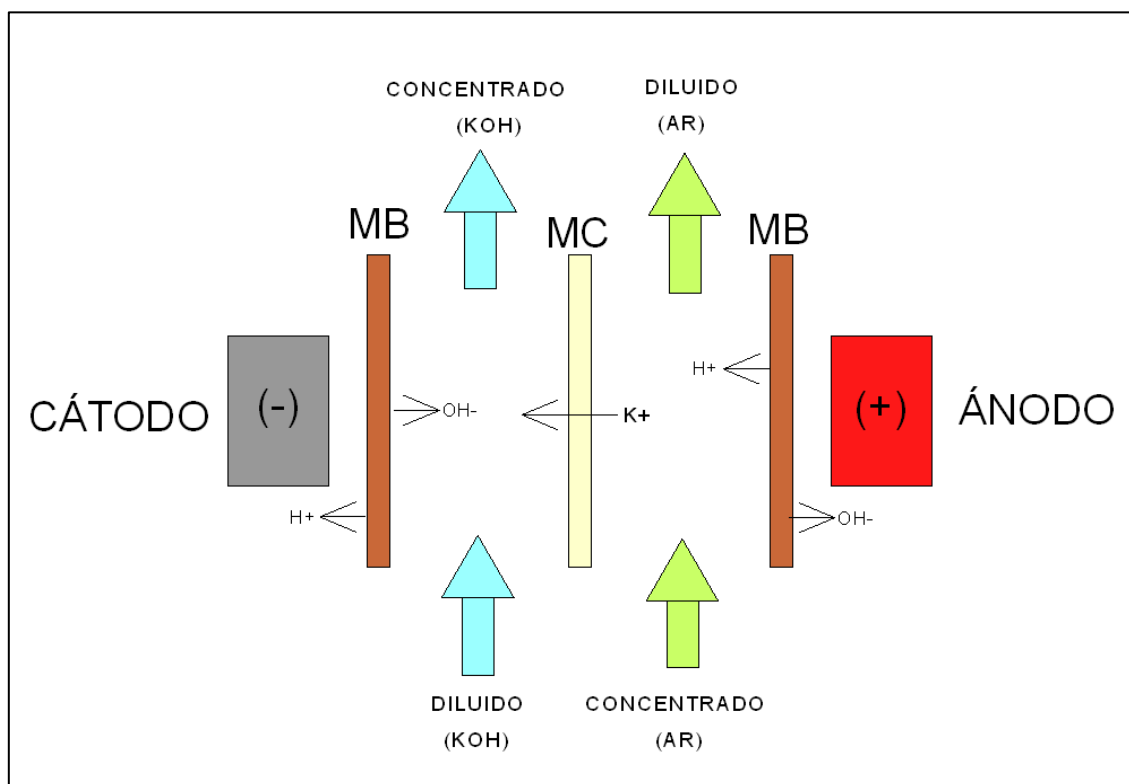
Cuando se hace uso de una o más membranas bipolares, la técnica de electrodiálisis se hace llamar electrodiálisis con membrana bipolar "EDMB", la cual puede estar en combinación con otras membranas aniónicas o catiónicas o ambas, teniendo de esta forma diferentes configuraciones.

2.3.3 Configuración de electrodiálisis con MB

Para el objetivo de nuestra investigación, se aplica la configuración MB/MC/MB. Ver figura 5

Figura 5

Configuración de celda de un equipo de electrodiálisis



2.3.4 Equipo de electrodiálisis

El equipo de electrodiálisis consta de:

A. Fuente de alimentación. es una fuente con capacidad de regular y mantener el voltaje continuo.

B. Fuente de regulador de flujo de alimentación. consta de un sistema que regula el porcentaje de energía para el bombeo peristáltico permitiendo dar diferentes flujos de alimentación.

C. Tanques de almacenamiento. tratándose de un sistema batch, se tiene tanques de la solución del concentrado, solución diluida y solución de lavado con capacidad de 1.5 litros.

D. Membranas. se tiene las membranas bipolares y la membrana catiónica para esta investigación ver tabla 4.

Tabla 4

Características de las membranas catiónica y bipolar

Características de las membranas	Unidades	FKB-PK-130	FBM
Resistencia eléctrica específica.	Ω/cm^2	3.27	-
Capacidad de intercambio iónico	Me-q/g membrana	0.9	-
Espesor	μm	126 - 140	130 - 160
Color	-	Marrón	Marrón
Temperatura máxima de operación	$^{\circ}\text{C}$	-	40

Fuente: Hojas de datos técnicos Fumatech, 2023.

E. Electrodo. se utilizó un par de electrodos de titanio recubierto con iridio y tantalio designado para el cátodo y el ánodo.

F. Separadores. se usó empaquetadura a base de silicona como separadores entre membranas.

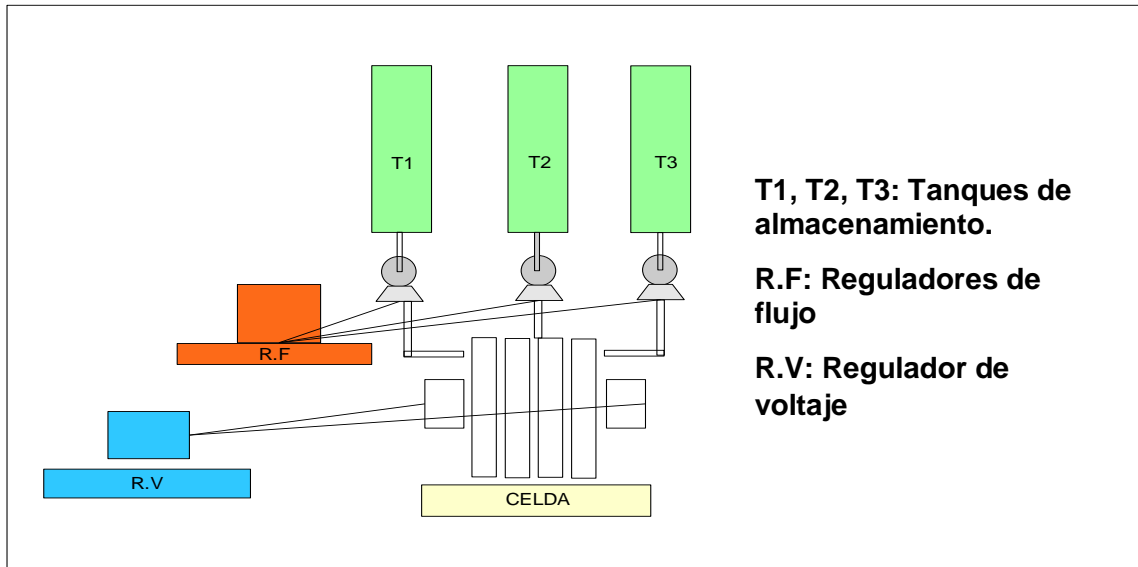
G. Generadores de turbulencia. se utilizó la malla de teflón para generar turbulencia.

H. Otros accesorios. se requirió el armado a base de acrílico, mangueras de silicones, uniones, tornillos con tuercas, manguera aislante.

Un esquema del equipo de electrodiálisis se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Esquema del equipo de electrodiálisis



Nota. Esquema de un equipo de electrodiálisis con tanques de almacenamiento, reguladores de flujo y regulador de voltaje

2.4 Definición de términos básicos

Agua residual

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica. (30)

Hidróxido de potasio

Es un sólido grumoso que es inodoro y blanco o ligeramente amarillo altamente soluble en agua, también es conocido como potasa cáustica. (19)

Electrodiálisis

Es un proceso de separación electroquímica que utiliza energía de CC para mover los iones a través de membranas de intercambio iónico selectivas para eliminar la sal de un flujo de alimentación en un flujo de concentrado, dejando un producto con valor agregado. (22)

Membrana aniónica

Es la membrana que permite el paso de aniones. (2)

Membrana catiónica

Membranas que permiten el paso de los cationes de una solución electrolítica mientras que excluyen el paso de los aniones. (31)

Membrana bipolar

Es la membrana compuesta por dos capas unidas entre sí, que permite el paso de aniones y cationes en dirección opuesta. (2)

Cromatografía iónica

Es una de las principales técnicas utilizadas en la determinación de iones en extractos acuosos. Sus ventajas radican en su alta selectividad, bajos límites de detección y gran precisión y exactitud. (32)

Eluyente

Es el medio de transporte de la muestra para su determinación de analitos en cromatografía iónica. (33)

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

Hipótesis general

Aplicando la electrodiálisis con membrana bipolar en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica, podremos recuperar el hidróxido de potasio entre un 60 a 80%.

Hipótesis específicas

La composición química inicial del agua residual tiene una concentración menor a 30 mEq/L de hidróxido de potasio.

Los parámetros óptimos para producir hidróxido de potasio son a un flujo de 75 mL/min, un voltaje continuo de 10 v y con 60 min de tiempo de operación.

3.1.1 Operacionalización de variable

La operacionalización de las variables se muestra en la tabla 5.

Tabla 5

Operacionalización de las variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Métodos	Técnica
I. Dependiente						
Y= Rendimiento de recuperación del hidróxido de potasio	Expresión cuantitativa de la eficiencia de un determinado procedimiento experimental. (34)	Relación porcentual entre la concentración de recuperación final en base a la inicial.	<p>Y_{1.1} Cálculo rendimiento.</p> <p>Y_{1.2} Concentración de recuperación final de hidróxido de potasio.</p>	<p>%</p> <p>Eq/L</p>	<p>Fórmula</p> <p>Ensayo experimental</p>	<p><i>Rendimiento</i> $= \frac{\text{Conc. recup. final KOH}}{\text{Conc. inicial KOH (AR)}} \times 100\%$</p> <p>Volumétrica/Instrumental</p>
II. Independientes						
X ₁ = Composición química inicial del agua residual	Refiere al número preciso de elementos por molécula en una sustancia. (35)	Característica fisicoquímica del agua residual.	X_{1.1} Concentración inicial de hidróxido de potasio residual	Eq/L	Ensayo experimental	Volumétrica/Instrumental
X ₂ = Parámetros de operación de EDMB	Dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación. (36)	Valores de voltaje de celda, tiempo de operación y flujo de alimentación.	<p>X_{2.1} Voltaje de celda.</p> <p>X_{2.2} Tiempo de operación.</p> <p>X_{2.3} Flujo de alimentación.</p>	<p>v min</p> <p>mL/min</p>	<p>Observacional</p> <p>Observacional</p> <p>Observacional</p>	<p>Multiparámetro</p> <p>Cronometría</p> <p>Regulación de rpm</p>

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1 Diseño metodológico

4.1.1 Tipo de investigación

La propuesta de investigación que se desarrolló, corresponde:

A. Por su naturaleza de datos y la información. fue del tipo *cuantitativo*, porque consiste en recolectar y analizar datos numéricos.

B. Por su función del propósito. fue del tipo *aplicada*, porque es una forma directa de encontrar soluciones a problemas o cuestiones específicas.

C. Por su tipo de inferencia. fue de tipo *analítico*, porque requiere el uso de la capacidad de pensamiento crítico, la evaluación de los datos y la información pertinentes para la investigación.

D. Por el tiempo en que se efectúa. fue del tipo *sincrónica*, porque se desarrolló en un espacio de tiempo corto.

E. Por su nivel. fue **explicativo**, establecer relaciones de causa y efecto que permiten hacer generalizaciones a realidades similares.

4.1.2 Diseño experimental

Se empleó el diseño experimental propuesto por Taguchi, que involucra emplear arreglos ortogonales para organizar los parámetros que afectan el proceso y los niveles a los cuales estos deben variarse. Los arreglos se seleccionan de acuerdo al número de parámetros (variables) y al número de niveles (estados).

El nombre del adecuado arreglo se puede encontrar mirando la columna y fila correspondientes al número de parámetros y al número de niveles, según muestra la tabla 6. Una vez determinado el nombre (el subíndice representa el número de experimentos que deben ser realizados).

Los arreglos son creados empleando un algoritmo desarrollado por Taguchi y permite que cada variable y conjunto sean ensayados equitativamente. Por ejemplo, si se tienen tres parámetros (potencial eléctrico, tiempo operación y flujo de alimentación) y tres niveles (alto, medio, bajo), se puede concluir que el arreglo adecuado es L9.

Tabla 6*Diseño experimental taguchi*

		Número de parámetros				
		2	3	4	6	7
Número	2	L4	L4	L8	L8	L8
de	3	L9	L9	L18	L18	L18
niveles	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32

Se seleccionó un arreglo ortogonal L9, permitiéndonos estudiar 3 factores a 3 niveles diferentes, en la tabla 7 se observa los factores estudiados y sus respectivos niveles.

Tabla 7*Arreglo ortogonal L9*

Factores	Notación	Unidad	Niveles		
			Bajo	Medio	Alto
Potencial eléctrico	$X_{2.1}$	v	5	10	15
Tiempo de operación	$X_{2.2}$	min	60	90	120
Flujo de alimentación	$X_{2.3}$	mL/min	50	75	100

4.1.3 Matriz de experimentos

Según el arreglo ortogonal L9 de taguchi, se tienen los experimentos que se muestran en la tabla 8, donde $Y_{1,2}$ es la recuperación del hidróxido de potasio.

Tabla 8*Matriz de experimentos*

Nº	X _{2.1} (v)	X _{2.2} (min)	X _{2.3} (mL/min)	Y _{1.2} (Eq/L)	Y _{1.1} (%)
1	5	60	50	Y _{1.2}	Y _{1.1}
2	5	90	75	Y _{1.2}	Y _{1.1}
3	5	120	100	Y _{1.2}	Y _{1.1}
4	10	60	75	Y _{1.2}	Y _{1.1}
5	10	90	100	Y _{1.2}	Y _{1.1}
6	10	120	50	Y _{1.2}	Y _{1.1}
7	15	60	100	Y _{1.2}	Y _{1.1}
8	15	90	50	Y _{1.2}	Y _{1.1}
9	15	120	75	Y _{1.2}	Y _{1.1}

4.2 Método de investigación

Esta investigación se basó en 4 etapas (Ver figura 7):

Primera etapa

Recolección y pre-tratamiento, en esta etapa se hizo una mezcla y homogenización de las aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica del segundo trimestre del año 2023 y se procedió a filtrar para eliminar cualquier sólido en suspensión con un filtro membrana de 45 micras. La muestra para cada experimento fue de 500 mL para cada batch.

Segunda etapa

Caracterización de la composición química inicial del AR, en la tabla 9 se identificó los siguientes parámetros:

Tabla 9*Parámetros y técnicas*

Parámetro	Técnica
pH	Electrométrico
Conductividad	Electrométrico
Hidróxido	Volumétrico
Cationes	ICP
Aniones inorgánicos	Cromatografía iónica

Tercera etapa

Parámetros de operación y pruebas experimentales, procedimos a armar el equipo y con la bibliografía existente se procedió a realizar la prueba experimental de curva de polarización y se definió los parámetros de voltaje, tiempo y flujo, de operación y se dio marcha a las corridas experimentales para la recuperación del hidróxido de potasio.

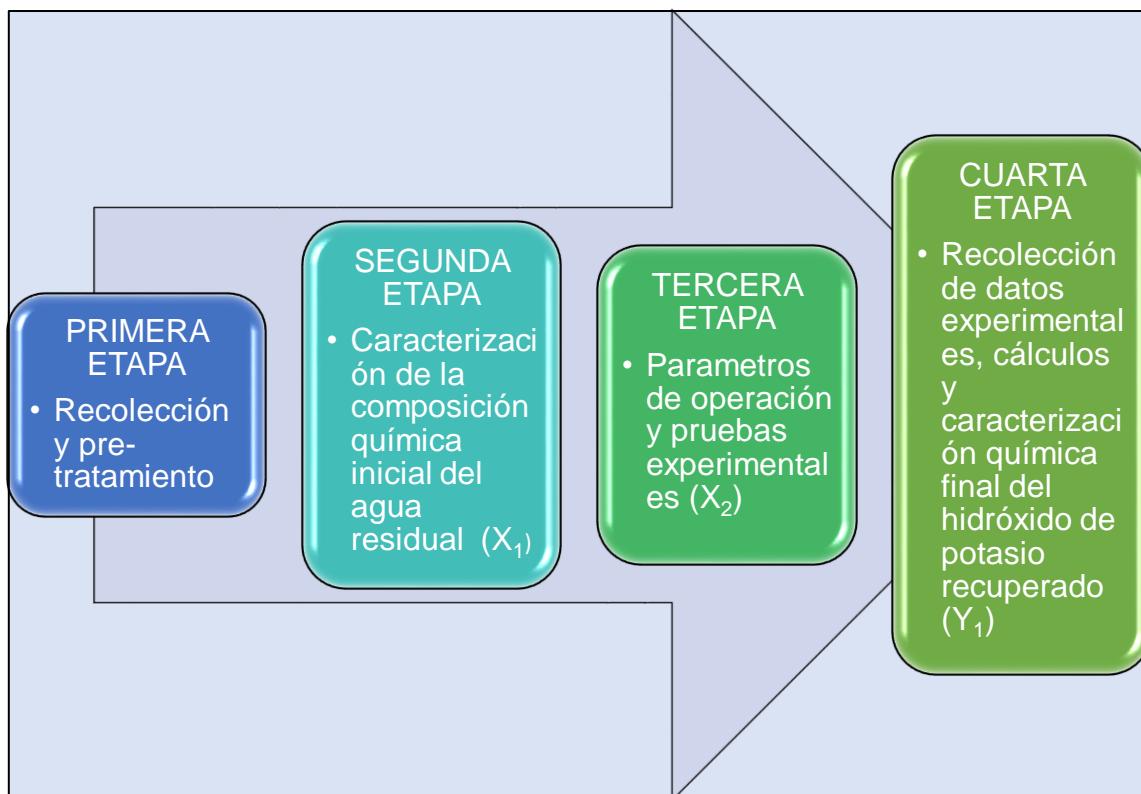
Los parámetros de evaluación fueron obtenidos y recolectados mediante grabación y así recolectar los datos de potencial eléctrico e intensidad de corriente para la obtención de nuestra curva de polarización, la cual nos permitirá obtener el máximo voltaje de operación de la celda de electrodiálisis.

Cuarta etapa

Recolección de datos experimentales, cálculos y caracterización final del hidróxido de potasio recuperado, en esta etapa recolectamos los datos de conductividad, corriente, cálculo de la cantidad de hidróxido en función a intervalos de tiempo.

Figura 7

Diseño de investigación por etapas



Nota. Diseño de investigación por etapas del proceso de identificación de las variables

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

La población estuvo representada por las aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica del segundo trimestre del 2023, que requiere la recuperación del hidróxido de potasio por EDMB.

4.3.2 Muestra

Nuestro criterio muestral abarco casi la totalidad de la población, por lo que no se requirió de un muestreo estadístico.

Nuestra muestra se trabajó con una unidad de análisis que consiste en 500 mL de muestra de agua residual de la mezcla de aguas residuales

producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica del segundo trimestre del 2023, que requiere la recuperación del hidróxido de potasio por EDMB.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

4.4.1 Lugar de estudio

Las pruebas experimentales se desarrollaron en el laboratorio de análisis medioambientales - Servicios Analíticos Generales S.A.C. ubicada en el distrito de Cercado de Lima.

4.4.2 Periodo desarrollado

La presente investigación se desarrolló en un tiempo no mayor a siete meses la cual culminó en noviembre del 2023.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1 Técnicas para la recolección de la información

A. Para la cuantificación por la técnica de cromatografía iónica, se basó con el método EPA 300 Rev. 2.1 (1), para la determinación de aniones inorgánicos por cromatografía iónica.

B. Para la cuantificación de cationes, se basó con el método EPA 200.7 Rev. 4.4 (37), para la determinación de metales por el plasma de acoplamiento inductivo (ICP).

C. Para las mediciones de pH y conductividad, se procedió hacer por mediciones electrométricas.

D. Para la cuantificación de hidróxido por la técnica volumétrica se basó en la valoración ácido-base para neutralizar el biftalato de potasio (BHK) siguiendo los siguientes pasos:

- Preparar una solución de BHK 0.019N (ver tabla 21).
- Determinar la concentración del KOH siguiendo la fórmula 1:

$$N_{BHK} \cdot V_{g_{BHK}} = N_{KOH} \cdot V_{KOH} \dots \dots \dots \text{fórmula (1)}$$

Donde:

N_{BHK} : es la normalidad de la solución de biftalato de potasio

$V_{g_{BHK}}$: es el volumen gastado de biftalato de potasio en la titulación

V_{KOH} : es el volumen tomado del agua residual (1mL)

N_{KOH} : es la normalidad obtenida del hidróxido de potasio del agua residual.

Obteniéndose a partir de los volúmenes gastados (ver anexo 2 parte A), las concentraciones cada corrida experimental (ver anexo 2 parte B).

E. Para determinar la concentración del hidróxido de potasio recuperado " $N_{KOH\ recuper.}$ ", se hizo una resta del valor KOH final menos el valor del KOH preparado (fiola) ver formula (2).

$$N_{KOH\ recuper.} = N_{KOH\ (final)} - N_{KOH\ (fiola)} \dots \dots \dots \text{fórmula (2)}$$

F. Para calcular el rendimiento se procedió a calcular valor inicial del hidróxido de potasio del agua residual " $N_{KOH(Ar_0)}$ ", a partir del resultado de ICP (el cual será constante para todos los resultados) mediante la fórmula (3), para luego calcular el rendimiento mediante la fórmula (4).

$$N_{KOH(Ar_0)} = \left(\frac{mg}{L}\right)_{K(ICP)} \times \frac{1mol\ K}{39g} \times \frac{1mol\ KOH}{1mol\ K} \times \frac{1g}{1000mg} \dots \dots \dots \text{fórmula (3)}$$

$$Rendimiento = \frac{N_{KOH\ recuper.}}{N_{KOH\ (Ar_0)}} \times 100\% \dots \dots \dots \text{fórmula (4)}$$

4.5.2 **Determinación de las variables de diseño**

Se trabajó con 3 contenedores de medio litro de capacidad en un sistema batch con recirculación y agitación para homogenizar el contenido durante la electrodiálisis. Los parámetros considerados como variables fueron: potencial eléctrico, tiempo de operación y flujo de circulación, con tres niveles cada uno.

Para el potencial eléctrico: mediante la curva de polarización, que indica el máximo valor de potencial eléctrico a trabajar fue de 15v. Se tomó los valores de 5v, 10v y 15v.

Para el tiempo de operación se tomó como criterio: 60, 90 y 120 minutos.

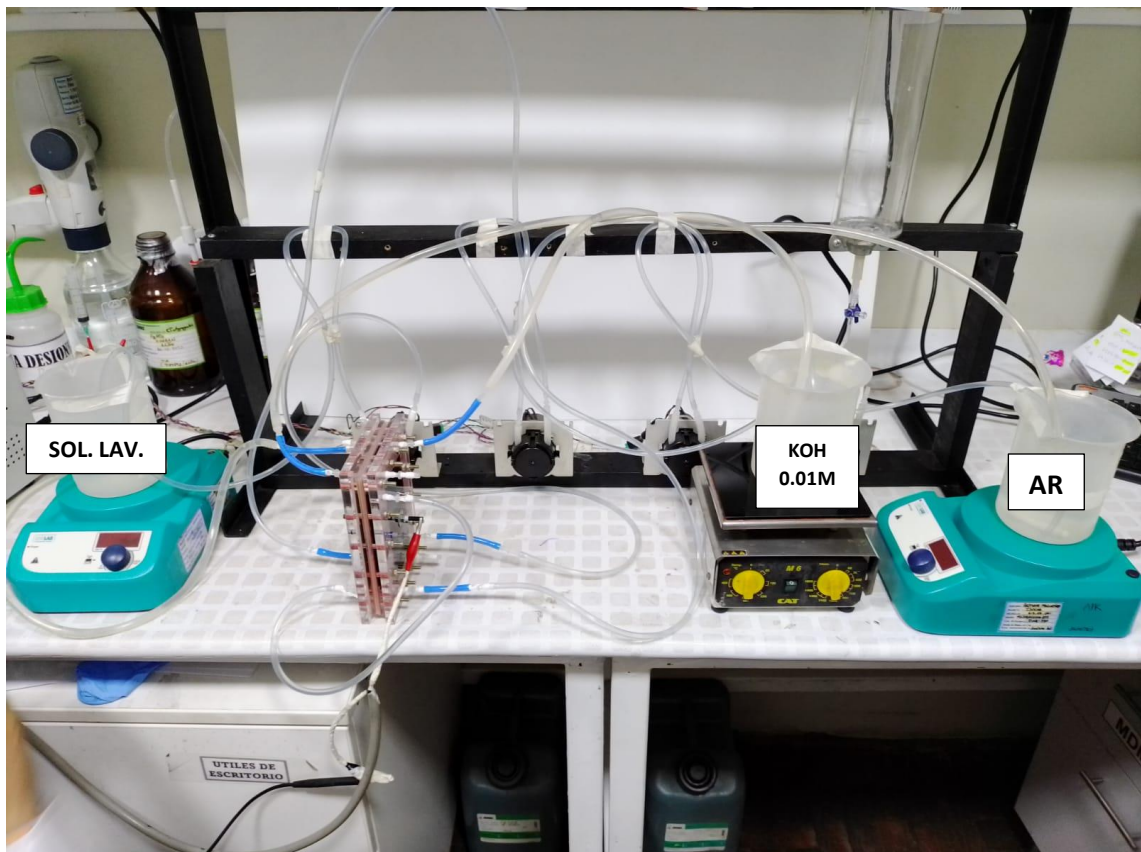
Para los flujos de recirculación, se tomó como criterio y según la capacidad del equipo de flujo, los valores de 50, 75 y 100 mL/min.

4.5.3 Procedimiento y desarrollo de las corridas experimentales

A. **Armado y puesta en marcha del equipo de electrodiálisis.** Para el armado del equipo se dispuso de 3 contenedores de capacidad de medio litro que van a contener: *El agua residual* “**contenedor del diluido**”, procedente del segundo trimestre del año 2023 del análisis de aniones por cromatografía iónica, previamente homogenizada y filtrada, *el hidróxido de potasio* “**contenedor del concentrado**”, preparado a una normalidad inicial de 0.01N a partir de una solución al 47% de hidróxido de potasio, para facilitar la transferencia de iones en el equipo de electrodiálisis y *una solución de sulfato de sodio* “**contenedor del lavado**”, que circula en los compartimientos de los electrodos para mantenerlos con flujo de iones, el cual no se va a ver alterado en su concentración durante las corridas experimentales (solución de lavado), ver figura 8.

Figura 8

Equipo de electrodiálisis



B. Codificación de corridas experimentales. A partir de la matriz de experimentos, determinamos las concentraciones en los recipientes de KOH diluido y del agua residual de cada corrida, seguidamente codificamos tal como muestra la tabla 10.

Tabla 10

Codificación de corridas experimentales

Nº	X _{2.1} (v)	X _{2.2} (min)	X _{2.3} (mL/min)	Código de corrida para el KOH diluido	Código de corrida para el AR
1	5	60	50	K05060050	AR05060050
2	5	90	75	K05090075	AR05090075
3	5	120	100	K05120100	AR05120100
4	10	60	75	K10060075	AR10060075
5	10	90	100	K10090100	AR10090100
6	10	120	50	K10120050	AR10120050
7	15	60	100	K15060100	AR15060100
8	15	90	50	K15090050	AR15090050
9	15	120	75	K15120075	AR15120075

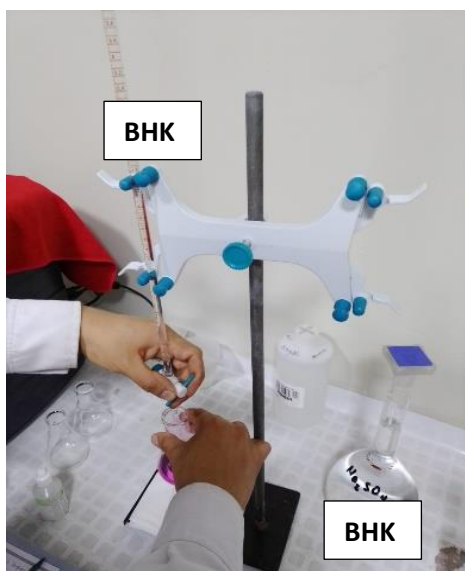
C. Elaboración de las corridas experimentales. Una vez iniciada las corridas experimentales se tomaron alícuotas de 1 mL en el tanque de hidróxido de potasio para saber la concentración en intervalos de 10 min. Para esto se tituló la alícuota con una solución de biftalato ácido de potasio (BHK) preparado a una normalidad de 0.0196N.

La alícuota de KOH se agregó un matraz y se adiciono 2 gotas de fenolftaleína y se tituló con el BHK contenida en una bureta graduada de 10 mL con una resolución de 0.02 mL, obteniéndose un volumen gastado (Vg) de BHK

(ver figura 9); el cual nos permitirá calcular la concentración de KOH al inicio, final y durante cada intervalo de tiempo.

Figura 9

Titulación de KOH con BHK



También se obtuvieron datos de conductividad y amperaje durante cada corrida experimental en el tanque de (AR) Y tanque de KOH, tal como se muestra en la figura 10:

Figura 10

Mediciones de conductividad en los tanques de AR y KOH



4.5.4 Instrumentos para la recolección de información

Para la presente investigación, se utilizó equipos, materiales y reactivos e insumos que se detalla a continuación:

A. Equipos:

- a. Agitadores magnéticos ISOLAB.
- b. Balanza analítica OHAUS de 0.0001 g de precisión.
- c. Cromatógrafo iónico Dionex ICS 3000.
- d. Cronómetro digital BOECO
- e. Estufa
- f. ICP Óptico - iCAP 6500
- g. Multímetro digital Sanwa CD772
- h. Multiparámetros WTW de ph-metro y conductividad.

B. Materiales:

- a. Baguetas.
- b. Bandeja de plástico termo-resistente.
- c. Bureta calibrada 10 +/- 0.02 mL.
- d. Filtro jeringa de 45 micras.
- e. Filtro membrana de 45 micras.
- f. Fiolas calibradas 500 mL.
- g. Frascos de 1000 mL de plástico.
- h. Matraz Erlenmeyer 50 mL.
- i. Micro pipetas 1000 uL, 5000 uL.
- j. Papel aluminio.
- k. Pastillas imantadas,
- l. Picetas.
- m. Vasos precipitados 100 mL, 500 mL.
- n. Viales 2 mL.

C. Reactivos:

- a. Agua tipo II.
- b. Fenolftaleína.
- c. Hidróxido de potasio 47%.
- d. Sal de sulfato de sodio.

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Se utilizará el diseño experimental de Taguchi; así como el análisis de varianza ANOVA para los datos obtenidos.

4.7 Aspectos éticos en investigación

Los autores de esta investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente informe. Este trabajo cuenta con datos fidedignos y son originales, auténticos, los resultados experimentales fueron obtenidos en un laboratorio externo medioambiental y cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en la normativa vigente.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

5.1.1 *Determinación de las características fisicoquímica del agua residual*

En la tabla 11, se muestra las características fisicoquímicas del agua residual, para el análisis de cationes se determinó mediante la espectrometría de emisión óptica con plasma de acoplamiento Inductivo (ICP-OES, por sus siglas en inglés). Para determinar la concentración de aniones mediante la técnica de cromatografía iónica. Así como también obtuvimos el pH y conductividad.

Tabla 11

Caracterización de la composición química inicial del AR

Característica	Valor	Unidad
pH	12.45	-
Conductividad	4950	$\mu\text{S/cm}$
OH ⁻	0.0196	Eq/L
K	918.5297	mg/L
Na	4.4429	mg/L
Zn	1.38	mg/L
Ca	0.266	mg/L
Mg	0.3936	mg/L
Al	0.5428	mg/L
SiO ₂	0.5437	mg/L
F ⁻	<0.03	mg/L
Cl ⁻	1.1044	mg/L
CO ₃ ²⁻	707.87	mg/L
NO ₂ ⁻	<0.03	mg/L
SO ₄ ²⁻	0.7521	mg/L
Br ⁻	<0.03	mg/L
NO ₃ ⁻	0.1585	mg/L
PO ₄ ³⁻	<0.06	mg/L

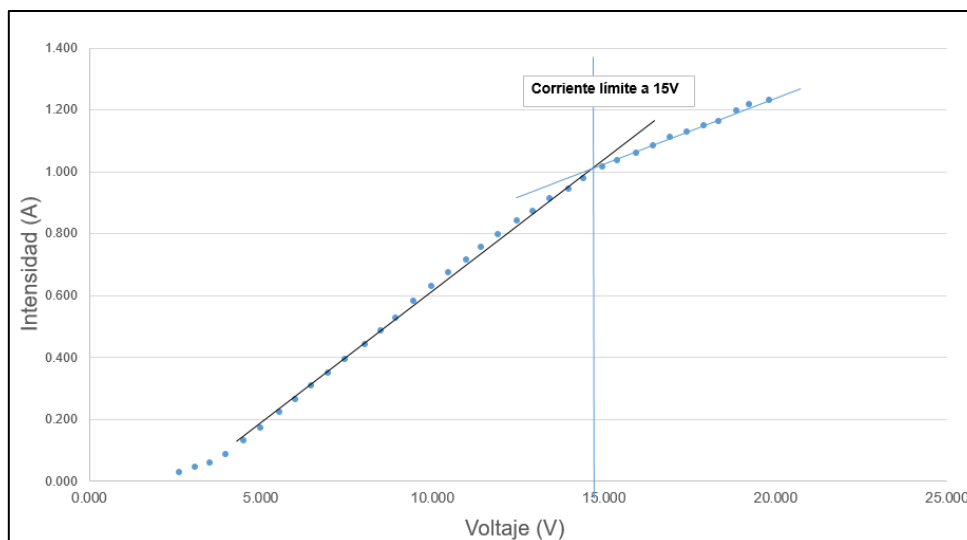
5.1.2 Resultados del procedimiento experimental

En la tabla 12 se muestra los valores de voltaje e intensidad para determinar, mediante la curva de polarización, el voltaje máximo a emplearse (ver figura 11).

Tabla 12

Voltaje e intensidad de corriente para la curva de polarización

Voltaje (v)	Intensidad (A)	Voltaje (v)	Intensidad (A)
2.623	0.028	11.920	0.798
3.094	0.045	12.470	0.841
3.518	0.059	12.935	0.874
3.985	0.086	13.420	0.914
4.517	0.130	13.965	0.946
4.995	0.172	14.420	0.980
5.540	0.223	14.950	1.015
6.010	0.266	15.385	1.037
6.470	0.308	15.960	1.061
6.980	0.351	16.450	1.083
7.460	0.393	16.920	1.111
8.030	0.442	17.430	1.129
8.490	0.487	17.910	1.148
8.940	0.529	18.350	1.164
9.470	0.582	18.880	1.196
9.975	0.631	19.240	1.219
10.485	0.674	19.820	1.233
10.983	0.715		
11.430	0.756		

Figura 11*Voltaje máximo de trabajo*

Tal como señalamos en la matriz experimental, realizamos 9 corridas, donde determinamos la recuperación ($Y_{1.2}$) y rendimiento ($Y_{1.1}$) de hidróxido de potasio “*contenedor concentrado*” a diferentes condiciones de operación, los resultados se muestran en la tabla 13.

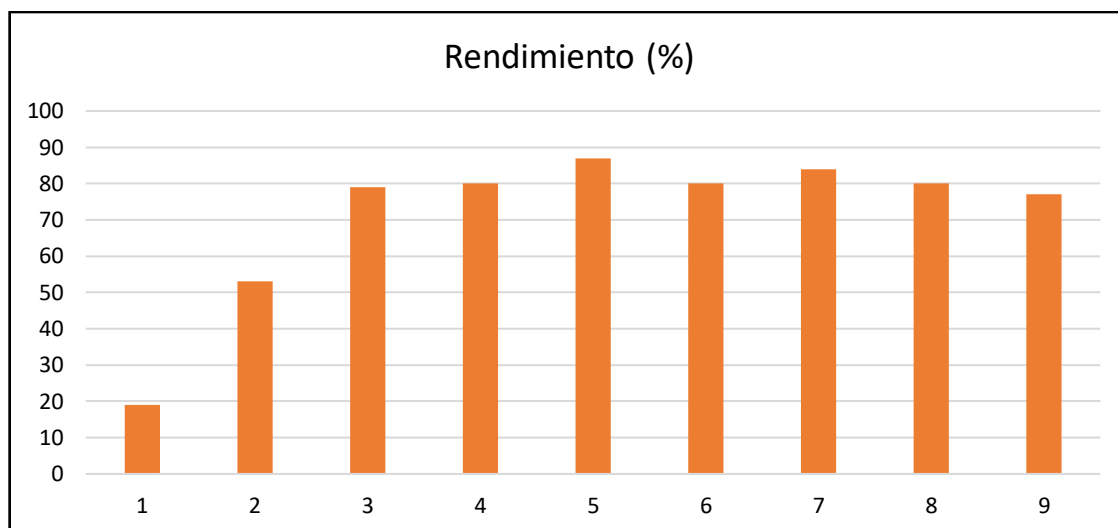
Tabla 13*Concentración de recuperación y rendimiento del KOH*

Nº	X _{2.1} (v)	X _{2.2} (min)	X _{2.3} (mL/min)	KOH inicial (fiola) (mg/L)	KOH final (mg/L)	Y _{1.2} (mg/L)	KOH inicial (fiola) (Eq/L)	KOH final (Eq/L)	Y _{1.2} (Eq/L)	Y _{1.1} (%)
1	5	60	50	560	817.6	257.6	0.0100	0.0146	0.0046	19
2	5	90	75	638.4	1338.4	700	0.0114	0.0239	0.0125	53
3	5	120	100	621.6	1663.2	1041.6	0.0111	0.0297	0.0186	79
4	10	60	75	638.4	1691.2	1052.8	0.0114	0.0302	0.0188	80
5	10	90	100	621.6	1775.2	1153.6	0.0111	0.0317	0.0206	87
6	10	120	50	560	1612.8	1052.8	0.0100	0.0288	0.0188	80
7	15	60	100	621.6	1730.4	1108.8	0.0111	0.0309	0.0198	84
8	15	90	50	560	1612.8	1052.8	0.0100	0.0288	0.0188	80
9	15	120	75	621.6	1640.8	1019.2	0.0111	0.0293	0.0182	77

En la figura 12 se muestra el histograma de rendimiento de recuperación del KOH para cada corrida experimental.

Figura 12

Histograma del rendimiento de recuperación del KOH



En la tabla 14 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente de KOH diluido con respecto al tiempo y para cada corrida experimental.

Tabla 14

Conductividad en el recipiente de KOH diluido

Nº	Corrida (min)	Conductividad (uS/cm2)												
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	K05060050	1882	2260	2670	3040	3410	3820	4180	-	-	-	-	-	-
2	K05090075	2290	2820	3300	3790	4180	4750	5210	5640	6070	6390	-	-	-
3	K05120100	2340	2810	3300	3810	4310	4820	5330	5800	6260	6670	7050	7370	7620
4	K10060075	2310	4150	5710	6820	7430	7690	7830	-	-	-	-	-	-
5	K10090100	2240	4130	5830	6910	7410	7670	7820	7910	7930	7970	-	-	-
6	K10120050	2140	3250	4390	5390	6080	6650	7070	7350	7550	7660	7740	7800	7830
7	K15060100	2240	5240	7110	7850	8080	8120	8150	-	-	-	-	-	-
8	K15090050	1878	3690	5200	6180	6780	7140	7330	7470	7540	7570	-	-	-
9	K15120075	2300	5110	6810	7570	7820	7910	7940	-	-	-	-	-	-

En la tabla 15 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del AR con respecto al tiempo y para cada corrida experimental.

Tabla 15

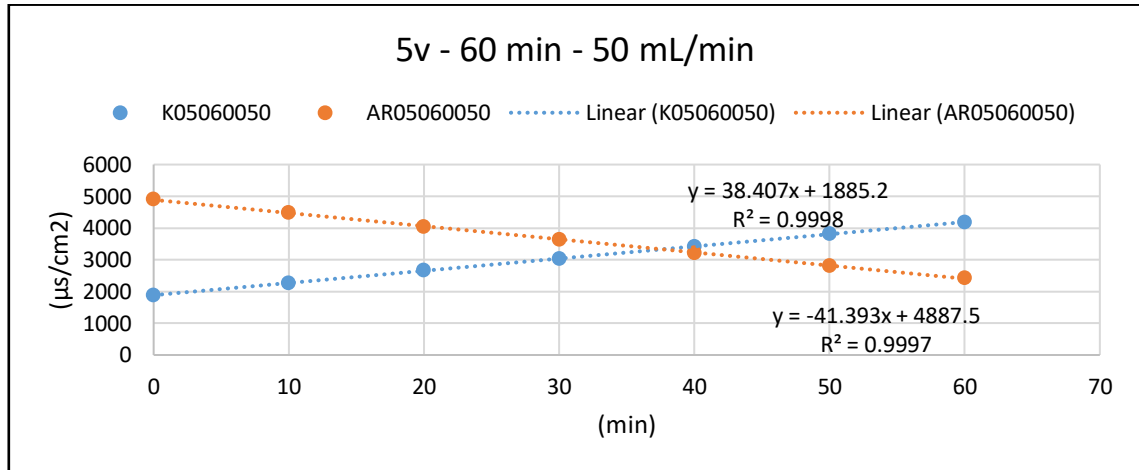
Conductividad en el recipiente del AR

Nº	Corrida	Conductividad (uS/cm ²)												
		(min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1	AR05060050	4900	4480	4050	3640	3210	2810	2430	-	-	-	-	-	-
2	AR05090075	4830	4250	3750	3240	2850	2280	1821	1404	1052	831	-	-	-
3	AR05120100	4950	4430	3920	3420	2900	2390	1885	1429	1046	771	546	382	268
4	AR10060075	4850	2850	1280	490	202	79.6	37.1	-	-	-	-	-	-
5	AR10090100	4660	2730	1142	450	248	135.2	69.6	37.5	43.9	59.4	-	-	-
6	AR10120050	4710	3610	2540	1594	987	604	363	240	158.1	107.1	63.4	39	25.1
7	AR15060100	4630	1812	441	135.4	42.3	41.7	49.1	-	-	-	-	-	-
8	AR15090050	4880	2960	1463	669	326	174.3	90	46.4	25.6	18.7	-	-	-
9	AR15120075	4560	1842	519	172	59	33.8	50.4	-	-	-	-	-	-

En la figura 13 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 1.

Figura 13

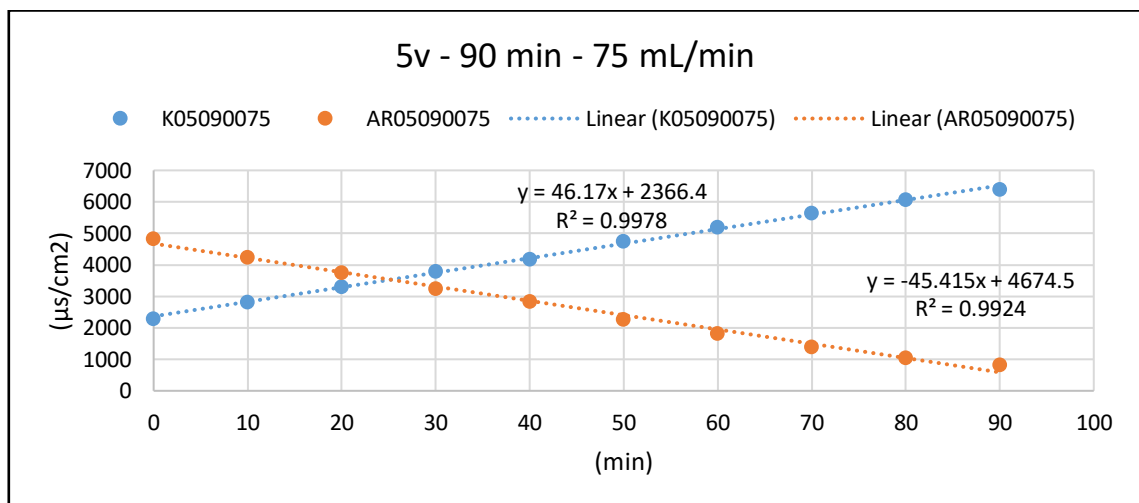
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 1



En la figura 14 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 2.

Figura 14

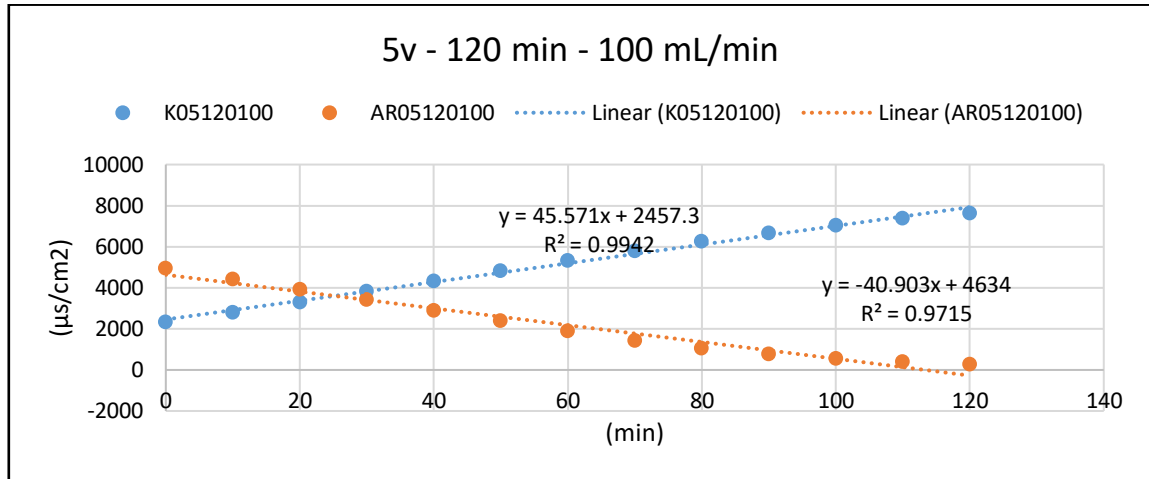
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 2



En la figura 15 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 3.

Figura 15

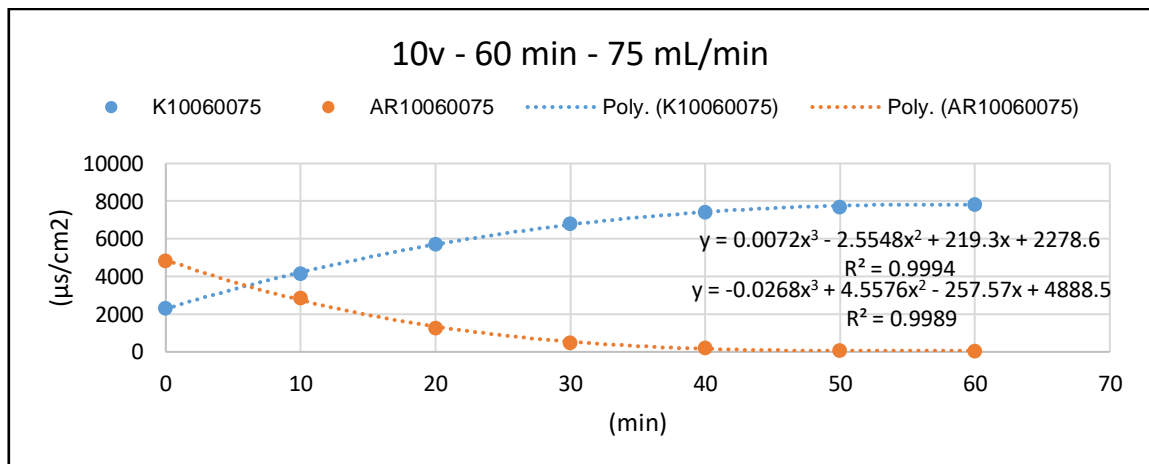
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 3



En la figura 16 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 4.

Figura 16

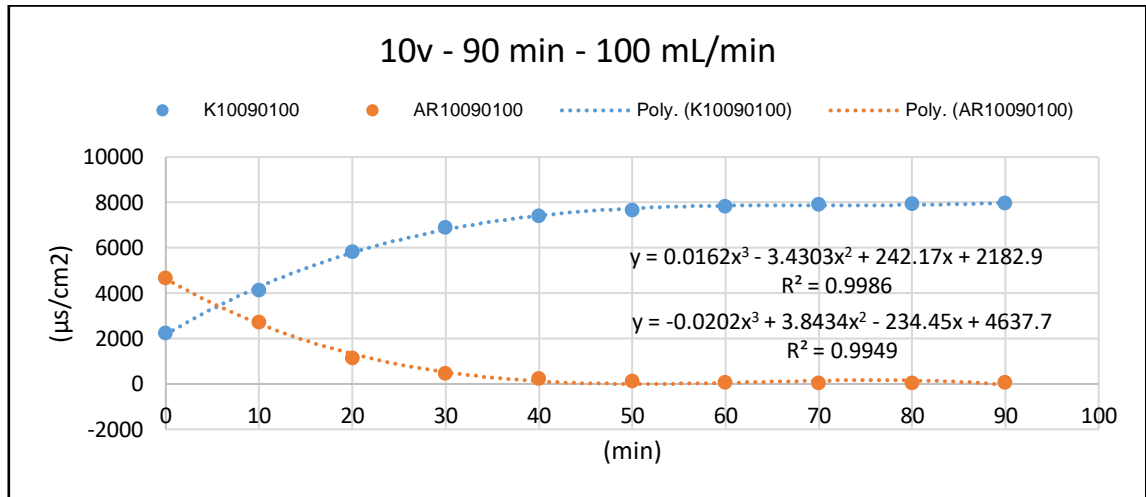
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 4



En la figura 17 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 5.

Figura 17

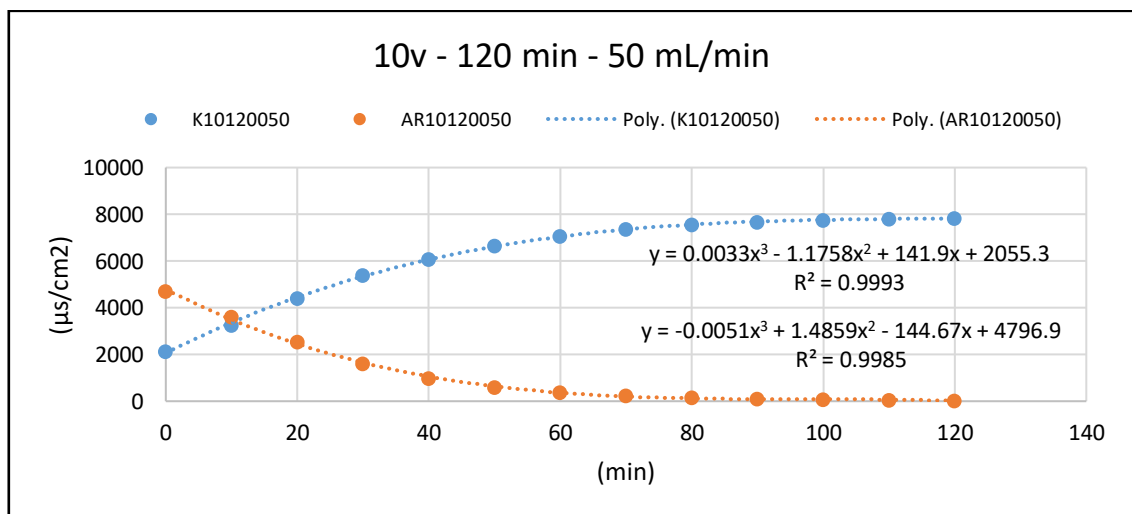
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 5



En la figura 18 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 6.

Figura 18

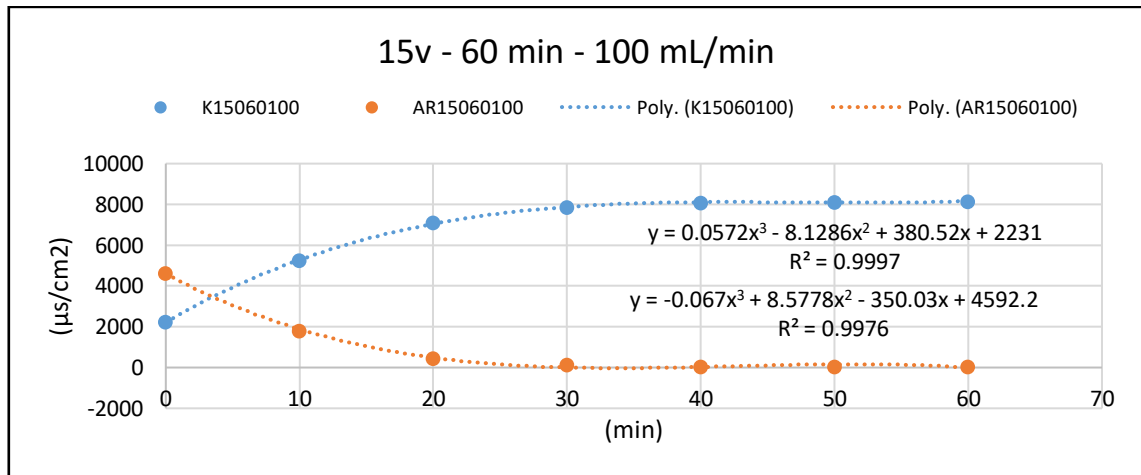
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 6



En la figura 19 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 7.

Figura 19

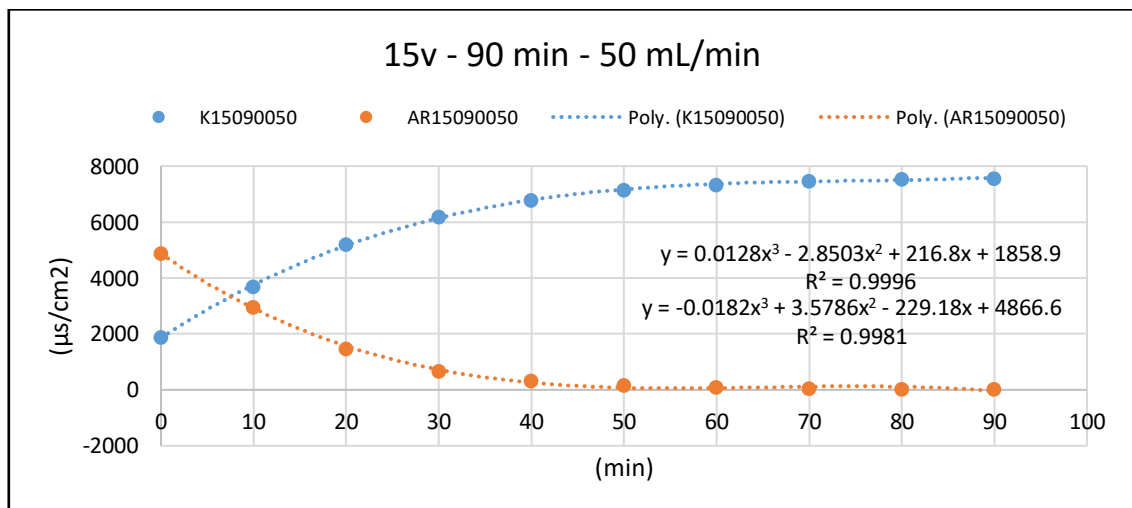
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 7



En la figura 20 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 8.

Figura 20

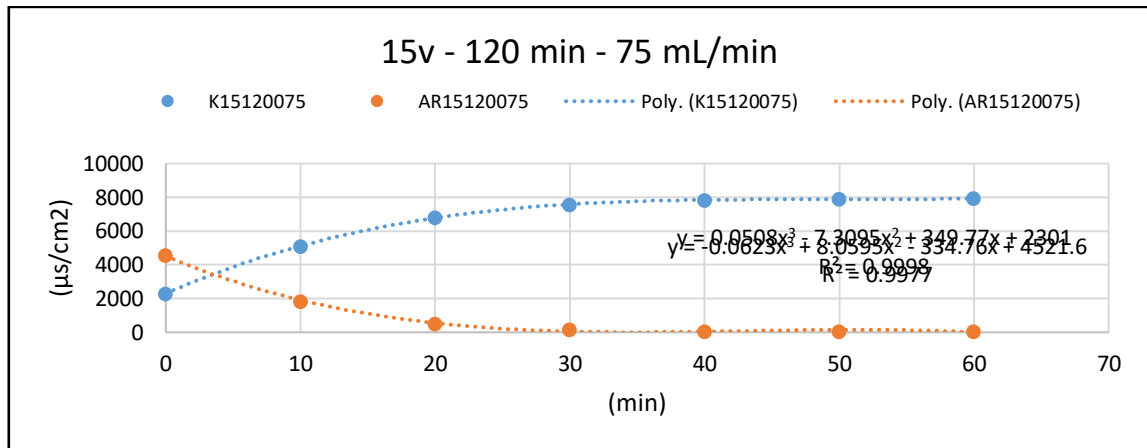
Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 8



En la figura 21 se muestra las variaciones de conductividad en el recipiente del KOH diluido y del AR con respecto al tiempo y para la corrida 9.

Figura 21

Conductividad vs tiempo del KOH diluido y AR de la corrida 9



5.2 Resultados inferenciales

Utilizando el Sofward Minitab 21, aplicamos el arreglo ortogonal L9 para 3 factores y 3 niveles obtendremos los siguientes datos que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16

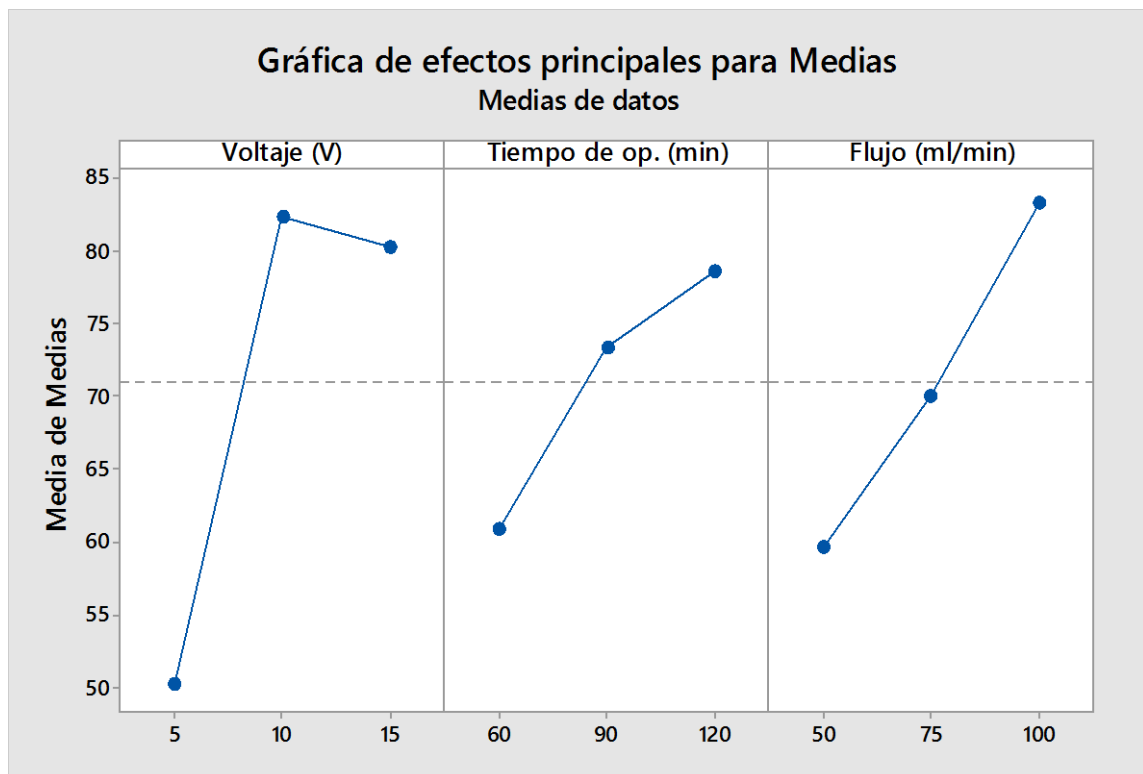
Tabla de respuestas para medias

Nivel	Potencial eléctrico (v)	Tiempo de operación (min)	Flujo de alimentación (mL/min)
1	50.33	61.00	59.67
2	82.33	73.33	70.00
3	80.33	78.67	83.33
Delta	32.00	17.67	23.67
Clasificar	1	3	2

En la tabla 16 se presenta los efectos principales de las variables de control sobre el rendimiento, donde “Clasificar” es la magnitud de influencia de la variable sobre el rendimiento de recuperación de KOH. Esto demuestra que la variable que más afecta es el Potencial eléctrico en primer lugar, seguido por el flujo de alimentación y por último el tiempo de operación. En la figura 20 se muestra la gráfica de efectos principales para medias del rendimiento de recuperación de KOH con respecto a los factores.

Figura 22

Efectos principales para medias



En la figura 22 presenta los valores medios del potencial eléctrico, flujo de alimentación y tiempo de operación con respecto al rendimiento de recuperación de KOH. En la figura, el eje “X” indica el valor de los parámetros mencionados y el eje “Y” indica el rendimiento. Se observa también los valores de medias más altos para cada parámetro, éstos son los valores que indican con que parámetros se puede operar el equipo para obtener un mayor rendimiento, los cuales son:

potencial eléctrico de 10 voltios, tiempo de operación de 120 min, y flujo de alimentación de 100 mL/min.

Realizamos la Regresión mediante el software Minitab 21 del Rendimiento vs. Potencial eléctrico, tiempo de operación y flujo de alimentación y obtenemos los datos de la tabla 17.

Tabla 17

Análisis de Varianza de Medias

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
voltaje (v)	2	1928.0	1928.0	964.0	3.63	0.216
tiempo (min)	2	492.7	492.7	246.3	0.93	0.519
flujo (mL/min)	2	844.7	844.7	422.3	1.59	0.386
Error residual	2	530.7	530.7	265.3		
Total	8	3796.0				

Ya que nuestros valores de p son mayores a 0.05 se planteó tomar como resultados las concentraciones recuperadas en los tiempos 20, 40 y 60 min del anexo 2 parte C, respetando el ordenamiento taguchi para las corridas experimentales tal como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18*Rendimiento de recuperación de KOH en 20-40-60 minutos*

N°	X _{2.1} (v)	X _{2.2} (min)	X _{2.3} (mL/min)	KOH inicial (fiola) (mg/L)	KOH final (mg/L)	Y _{1.2} (mg/L)	KOH inicial (fiola) (Eq/L)	KOH final (Eq/L)	Y _{1.2} (Eq/L)	Y _{1.1} (%)
1	5	20	50	560	582.4	22.4	0.0100	0.0104	0.0004	2
2	5	40	75	638.4	879.2	240.8	0.0114	0.0157	0.0043	18
3	5	60	100	621.6	1176	554.4	0.0111	0.0210	0.0099	42
4	10	20	75	638.4	1209.6	571.2	0.0114	0.0216	0.0102	43
5	10	40	100	621.6	1573.6	952	0.0111	0.0281	0.017	72
6	10	60	50	560	1461.6	901.6	0.0100	0.0261	0.0161	68
7	15	20	100	621.6	1596	974.4	0.0111	0.0285	0.0174	74
8	15	40	50	560	1377.6	817.6	0.0100	0.0246	0.0146	62
9	15	60	75	621.6	1640.8	1019.2	0.0111	0.0293	0.0182	77

Con estos resultados obtenemos un $p < 0.05$ en todos los factores, siendo el potencial eléctrico, el más significativo, luego el tiempo de operación y por último el flujo de alimentación, tal como se muestra en el análisis de varianza para medias en la tabla 19.

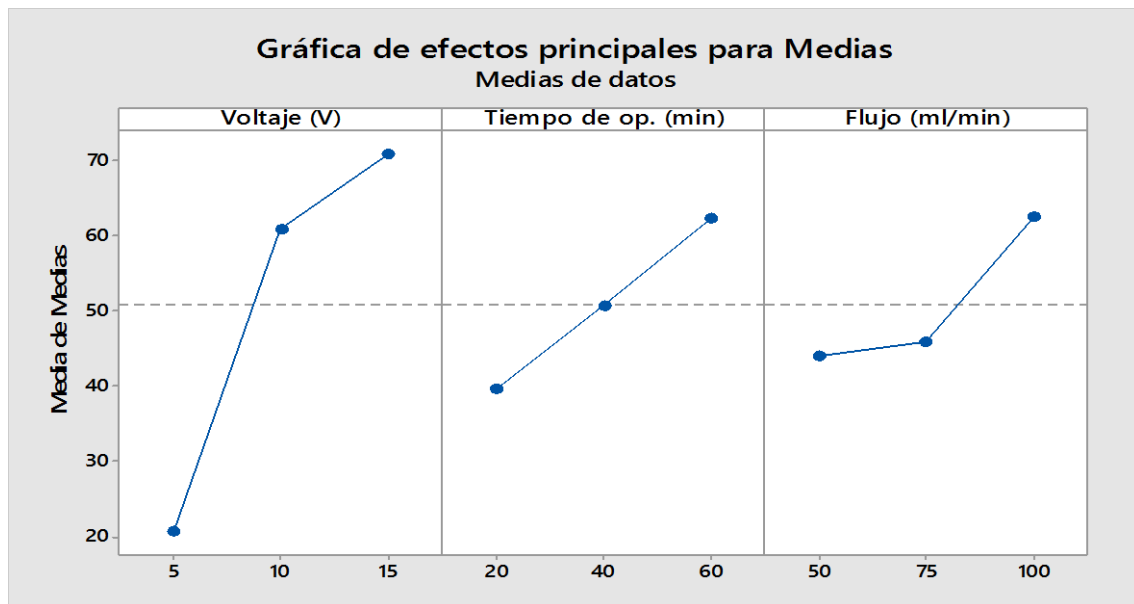
Tabla 19*Análisis de Varianza de Medias*

Fuente	unidad	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Voltaje	v	2	4260.22	4260.22	2130.11	144.14	0.007
Tiempo Op.	min	2	770.86	770.86	385.44	26.08	0.037
Flujo de alimentación	mL/min	2	630.22	630.22	315.11	21.32	0.045
Error residual		2	29.56	29.56	14.78		
Total		8	5690.89				

En la figura 23 se muestra los efectos principales para medias calculados en base a 20, 40, 60min.

Figura 23

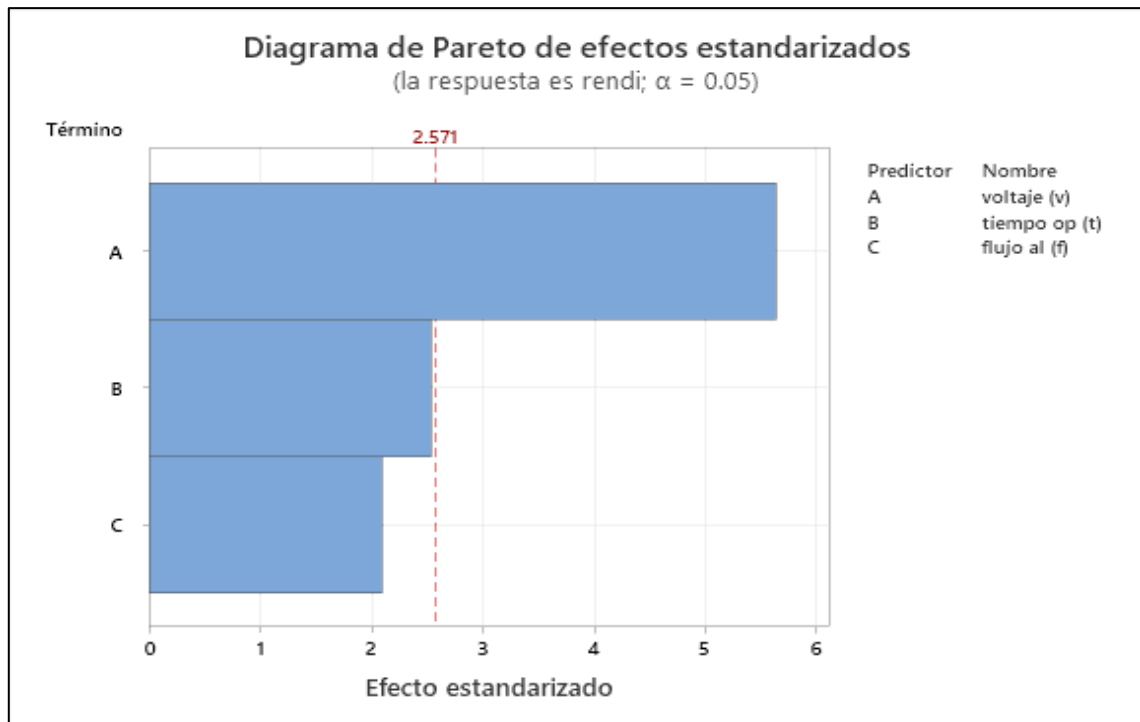
Efectos principales para medias en 20-40-60 minutos



En la figura 24 se observa el diagrama de Pareto para efectos estandarizados donde nos muestra que la variable de voltaje es el de más influencia en la electrodiálisis del agua residual

Figura 24

Diagrama de Pareto para efectos estandarizados



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados.

La hipótesis específica 1 establece determinar la composición química del agua residual proveniente del análisis de aniones por cromatografía iónica el cual permitirá conocer la composición inicial del KOH del agua residual, el cual se puede visualizar en la tabla 11; contrastando que la concentración del KOH del agua residual es menor que 30mEq/L o 1680mg/L

La hipótesis específica 2 establece que los parámetros de potencial eléctrico, tiempo de operación y flujo de alimentación, influyen en el proceso de electrodiálisis, obteniendo un mayor rendimiento de recuperación de KOH en el agua residual proveniente del análisis de aniones por cromatografía iónica, el cual se demuestra en el análisis estadístico de la tabla 19; analizando los rendimientos a tiempos de 20, 40 y 60min y se puede visualizar en la figura 23 de efectos para medias y de la figura 24 del diagrama de Pareto. Siendo el voltaje el más relevantes y que nos indica una combinación de parámetros óptimos de 15v, 60min y 75 mL/min

Del análisis estadístico ANOVA de los parámetros de (potencial eléctrico) y (flujo de alimentación) se pudo observar en la tabla 20 y 21 que el valor de p es menor a 0.05 en la variable potencial eléctrico, por ello se rechaza la hipótesis nula, resultando el potencial eléctrico factor significativo, el tiempo de operación y flujo de alimentación factores de menor significancia en el tratamiento del agua residual.

Tabla 20*Anova del rendimiento de recuperación de KOH para voltaje-tiempo*

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Voltaje (v)	2	4266.0	4266.0	2133.0	11.83	0.021
Tiempo Op. (min)	2	450.7	450.7	225.3	1.25	0.379
Error residual	4	721.3	721.3	180.3		
Total	8	5438.0				

Tabla 21*Anova del rendimiento de recuperación de KOH para voltaje-flujo*

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Voltaje (v)	2	4266.0	4266.0	2133.0	15.82	0.013
Flujo de alimentación (mL/min)	2	632.7	632.7	316.3	2.35	0.212
Error residual	4	539.3	539.3	134.8		
Total	8	5438.0				

La hipótesis general plantea el rendimiento de recuperación de KOH del agua residual procedente del análisis de aniones por cromatografía iónica mediante la electrodiálisis con membranas bipolares el cual permitirá resultados entre 60 y 80%, de acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 18, obtenemos en la corrida 9 el mayor porcentaje de rendimiento 77% el cual representa dentro del rango que se planteó, demostrándose la hipótesis general.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.

En la investigación (2) los resultados muestran claramente cuando el voltaje de operación de la celda es 15V, flujo volumétrico del ácido y base es de 400mL / min, y la concentración inicial del ácido y base de 0,05N, la concentración del ácido alcanza a 0,16N y 0,132 N de la base, por lo que, de los cuatro parámetros de operación del equipo de electrodiálisis bipolar en estudio, el de mayor influencia es el potencial eléctrico. En comparación al agua residual proveniente del análisis de aniones por cromatografía iónica se obtuvo un potencial eléctrico de 15 voltios similar al del estudio mencionado.

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis; de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N° 060-2019-CU. Este trabajo cumple con todos los requisitos y responsabilidades señaladas en los ítems mencionados.

VII. CONCLUSIONES

- Se logró recuperar el hidróxido de potasio de las aguas residuales provenientes del análisis de aniones por IC, mediante la electrodiálisis con membrana bipolar. El rendimiento obtenido fue del 77%.
- Se determinó que, la concentración inicial del hidróxido de potasio del agua residual como resultado de la conversión del potasio inicial, fue de 0.0236N.
- Se determinó que los parámetros óptimos de operación para la recuperación del KOH fue de un potencial eléctrico 15 voltios un tiempo de operación de 60 min y un flujo de alimentación de 75 mL/min.

VIII. RECOMENDACIONES

- Diseñar módulos de electrodiálisis con membrana bipolar semejantes y realizar el estudio con mayor cantidad de membranas y determinar el efecto de estas para lograr un proceso más eficiente, así mismo considerar el efecto de otros parámetros como temperatura, pH, según el tipo de solución a tratar.
- Implementar un sistema hermético continuo con agitación del tanque de recuperación del hidróxido para evitar la carbonatación del recuperado.
- Configurar el sistema de MB/MA/MB para la purificación del hidróxido de potasio luego de haberse recuperado con las condiciones óptimas de operación y luego de haberse concentrado hasta la molaridad deseada.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1). EPA-300. Determination of inorganic anions by ion chromatography. [En línea] 1993.
https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_300-0_rev_2-1_1993.pdf.
- (2). MEDINA, Juan. Influencia de parámetros operacionales en la concentración de ácido base producido a partir de salmuera procedente de ósmosis inversa vía electrodiálisis bipolar. [En línea] 19 de 10 de 2017. [Citado el: 09 de Julio de 2023.] <https://hdl.handle.net/20.500.13084/1668>.
- (3). OSIBANJO, OLADELE, y otros. www2.congreso.gob.pe. [En línea] [Citado el: 13 de 07 de 2023.]
[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/A45BA3B665C15A0B05257BBE00772749/\\$FILE/Parte1_cap-6.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/A45BA3B665C15A0B05257BBE00772749/$FILE/Parte1_cap-6.pdf).
- (4). SONG, Kyungsun, SOO-CHUN Chae Y JUN-HWAN Bang. Separation of sodium hydroxide from post-carbonation brines by bipolar membrane electro dialysis (BMED). [En línea] Noviembre de 2021. [Citado el: 23 de Setiembre de 2023.] <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130179>. 1385-8947.
- (5). MARIAM, Mohammadi. Separación de amoníaco mediante electrodiálisis de membrana bipolar en digestión anaerobica de residuos orgánicos. McMaster University. Ontario : s.n., 2021. pág. 48, Tesis de Maestría.
- (6). KROUPA, Jan. Estudio de electrodiálisis con membrana bipolar. UNIVERSITY OF PARDUBICE. 2019. pág. 117, Tesis doctoral .
- (7). VALVERDE, Edgar. Obtención de ácidos y bases a partir de disoluciones salinas concentradas mediante electrodiálisis con membranas bipolares. Proyecto/Trabajo final de carrera. [En línea] 2014. [Citado el: 09 de Julio de 2023.] <http://hdl.handle.net/2099.1/25052>.
- (8). QING-BAI Chen, YONG Xu, PENG-FEI Li, JIN Wang, LIN Dong, JINLI Zhao, JIANYOU Wang. An emerging pilot-scale electro dialysis system for desalination of SWNF permeate: Evaluating the role of typical factors. [En línea] 15 de noviembre de 2022.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916422005197>. 0011-9164.
- (9). CHUNXIAO Lei, ZICHAO Li, QI Gao, RONGQIANG Fu, WEI Wang, QUN Li, ZHAOMING Liu. Comparative study on the production of gluconic acid by electro dialysis and bipolar membrane electro dialysis: Effects of cell configurations. [En línea] 1 de Agosto de 2020.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738820307705>. 0376-7388.

- (10). CASTILLO, Alberto, LUCAS, Luis. Evaluación de los parámetros operacionales en un equipo de electrodiálisis para recuperación de iones níquel a partir de efluentes galvánicos. [En línea] 2015. [Citado el: 09 de Julio de 2023.] <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3624>.
- (11). MAMANI, Sonia y ZARATE, Rolando. Evaluación de los parámetros de operación de un módulo de electrodiálisis para la desmineralización de aguas subterráneas del parque industrial de Arequipa para alimentación de calderas. Arequipa : Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2017.
- (12). CIENTEC. Cientec Instrumentos. [En línea] 2023. [Citado el: 18 de 09 de 2023.]
<https://cientecinstrumentos.cl/que-es-cromatografia/#:~:text=La%20cromatograf%C3%ADa%20es%20un%20procedimiento,compuestos%20de%20una%20manera%20muy>.
- (13). ALICANTE, UNIVERSIDAD DE. Servicios Técnicos de Investigación. Cromatografía iónica. [En línea] 2023. [Citado el: 17 de setiembre de 2023.] <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis/cromatografia-ionica.html>.
- (14). QUIMITUBE. ¿Cómo se determinan los iones en una muestra de agua? Wuimitube: clases de química de Bachillerato y Selectividad (PAU). [En línea] 5 de abril de 2017. [Citado el: 17 de setiembre de 2023.] <https://www.quimitube.com/como-se-determinan-los-iones-en-una-muestra-de-agua-la-cromatografia-ionica/>.
- (15). METROHM. Cromatografía iónica. [En línea] 2023. [Citado el: 17 de setiembre de 2023.] https://www.metrohm.com/es_es/products/ion-chromatography.html.
- (16). B. Paull, P.N. Nesterenko. Chapter 8 - Ion Chromatography. [En línea] 2013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124158078000080>
- (17). OEFA. Fiscalización ambiental en aguas residuales. OEFA. [En línea] Abril de 2014. https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827.
- (18). INDUSTRY, INCOM CHEMICAL. Qi. Incom Chemical Industry. [En línea] <https://quimicaindustrial.cl/hidroxido-de-potasio/>.
- (19). NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH. Hazardous Substance Fact Sheet. [En línea] NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH, ENERO de 2010. [Citado el: 09 de JULIO de 2023.]

<https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1571.pdf>.

- (20). MERK-GROUP. Merck. [En línea] 2023. [Citado el: 09 de Julio de 2023.] https://www.merckmillipore.com/PE/es/product/Potassium-hydroxide,MDA_CHEM-105029#anchor_PDP_OverviewTab_Product_Information_F%C3%B3rmula%20qu%C3%ADmica.
- (21). LAPEÑA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales : aguas de proceso y residuales. [aut. libro] Miguel Rigola Lapeña. TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES : AGUAS DE PROCESO Y RESIDUALES. Barcelona : Marcombo, 1989.
- (22). VEOLIA. Veolia Water Technologies & Solutions. [En línea] Veolia Water Technologies & Solutions, 2023. <https://www.watertechnologies.mx/products/electrodialysis-ed#:~:text=Esta%20tecnolog%C3%ADa%20se%20emplea%20en,y%20la%20desacidificaci%C3%B3n%20de%20jugos>.
- (23). LTM. Laboratorio de Tecnologías de Membranas . [En línea] Comunicaweb, 2021. [https://grupo.us.es/tecnomem/2021/06/28/electrodialisis/#:~:text=La%20electrodi%C3%A1lisis%20presenta%20diferentes%20desarrollos,la%20electrodi%C3%A1lisis%20met%C3%A1tesis%20\(EDM\)](https://grupo.us.es/tecnomem/2021/06/28/electrodialisis/#:~:text=La%20electrodi%C3%A1lisis%20presenta%20diferentes%20desarrollos,la%20electrodi%C3%A1lisis%20met%C3%A1tesis%20(EDM)).
- (24). MONSERRAT, Carlos. Evaluación de procesos de electrodiálisis para la valorización de efluentes industriales. Trabajo final de grado. [En línea] 2015. <http://hdl.handle.net/2117/84186>.
- (25). LÓPEZ, Ulises. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. CONACYT. [En línea] 2005. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua..pdf>.
- (26). FERNÁNDEZ, Antonio, y otros. Aplicaciones medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica. [aut. libro] Antonio Jesús Fernández Romero, y otros. Aplicaciones medioambientales y energéticas de la tecnología electroquímica. Barcelona : Reverté, 2021.
- (27). GARCÍA, Xavier. Aplicación de la técnica de electrodiálisis bipolar para la producción de ácido clorhídrico a partir de agua residual de regeneración de resinas de intercambio iónico Enace - Carabayllo 2015. Lima : Universidad César Vallejo, 2015.
- (28). Industriapedia. Industriapedia.com. [En línea] [Citado el: 03 de Octubre de 2023.] https://industriapedia.com/que-es-curva-de-polarizacion/#google_vignette.

- (29). TORRES, Luz, y otros. Uso de curvas de polarización para entender el transporte de iones a través de una membrana de intercambio iónico. *Revistas unam*. [En línea] 30 de Octubre de 2019.
<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.4.67333>.
- (30). ZARZA, Laura F. *iagua*. [En línea] Laura F. Zarza, 2023.
<https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-residuales>.
- (31). ZUTA, Leví y PILCO, Alex. *www.scielo.org.pe*. [En línea] Setiembre de 2018. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2018000300003. 1810-634X.
- (32). LÓPEZ, Marina. Servicios centrales de investigación. [En línea] 2023.
<https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/stecnicos/analisis-elemental/cromatografia-ionica>.
- (33). INGENIERIA, REAL ACADEMIA DE. Diccionario Español de Ingeniería. [En línea] Real Academia de Ingeniería, 2023.
<https://diccionario.raing.es/es/lema/eluyente>.
- (34). VALENCIA, UNIVERSIDAD DE. Laboratorio de química orgánica. Grado en Farmacia. [En línea] 2017-2018.
https://www.uv.es/organica/CUADERNOS%20LABORATORIOS/2017-2018/GFarmacia_QUIMICA_ORGANICA.pdf.
- (35). ONISSIPHOROU, Kate. ReAgent. What is chemical composition in chemistry? [En línea] 31 de Marzo de 2022.
<https://www.reagent.co.uk/blog/what-is-chemical-composition-in-chemistry/>.
- (36). ESPAÑOLA, REAL ACADÉMICA. Real Académica Española. Real Academia Española. [En línea] RAE, 2023.
<https://dle.rae.es/par%C3%A1metro>.
- (37). EPA-200.7. Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. [En línea] 1994.
<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-200.7.pdf>.
- (38). XIAOYUN Wu, HANQUAN Zhu, YAOXING Liu, RIYAO Chen, QINGRONG Qian, BART VAN Der Bruggen. Cr(III) Recovery in form of Na₂CrO₄ from aqueous solution using improved bipolar membrane electrodialysis. [En línea] 01 de Junio de 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037673882030675X>. 0376-7388.

- (39). NÚÑEZ, Alex, y otros. Remoción de cromo de efluentes de la industria curtiembre mediante electrodiálisis. [En línea] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2018.
<https://www.redalyc.org/journal/816/81658059004/html/>. 1810-9993.
- (40). Electromat . <https://www.watertechnologies.mx/products/electrodialysis-ed>. [En línea] [Citado el: 21 de 08 de 2023.]
- (41). nj.gov. <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1571sp.pdf>. [En línea] Enero de 2010.
- (42). PCC-Grupo. Fabricante de especialidades químicas. Reactivos químicos. [En línea] 2020. <https://www.products.pcc.eu/es/k/reactivos-quimicos/>.
- (43). ORTEGA, Emma, GARCÍA, Montserrat y CASELLS, Alba. Proyecto de recuperación electrodiálítica de Cr(VI) mediante el uso de reactores electroquímicos en presencia de membranas cerámicas modificadas con óxidos de zirconio. Valencia : Universitat Politècnica de València, 2015.
- (44). LIU, Yaoxing, y otros. Recuperación de níquel de lodos de galvanoplastia mediante electrodiálisis de membrana bipolar. [En línea] Mayo de 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979723001352?via%3Dihub>. 0021-9797.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Aplicación de electrodiálisis con membrana bipolar para la recuperación de hidróxido de potasio en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores
¿Cuál será el rendimiento del hidróxido de potasio recuperado con la aplicación de la electrodiálisis con membrana bipolar en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica?	Determinar el rendimiento del hidróxido de potasio recuperado con la aplicación de la electrodiálisis con membrana bipolar en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica.	Aplicando la electrodiálisis con membrana bipolar en aguas residuales producidas en el análisis de aniones por cromatografía iónica, podremos recuperar el hidróxido de potasio entre un 60 a 80 %	Y_1 = Rendimiento de recuperación del hidróxido de potasio	$Y_{1,1}$ Cálculo de rendimiento. $Y_{1,2}$ Concentración de recuperación final de hidróxido de potasio.	% Eq/L
Problemas Específicos	Objetivo Específicos	Hipótesis Específicos	Variables Independientes	Dimensiones	Indicadores
a. ¿Cuál será la composición química inicial del agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica?	1. Determinar la composición química inicial del agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica.	1. La composición química inicial del agua residual tiene una concentración menor a 30mEq/L de hidróxido de potasio.	X_1 = Composición química inicial del agua residual	$X_{1,1}$ Concentración inicial de hidróxido de potasio residual	Eq/L
b. ¿Cuáles serán los parámetros óptimos para recuperar el hidróxido de potasio mediante electrodiálisis con membrana bipolar?	2. Determinar los parámetros óptimos para recuperar el hidróxido de potasio mediante electrodiálisis con membrana bipolar.	2. Los parámetros óptimos para producir hidróxido de potasio son un voltaje continuo de 10 v un tiempo de operación de 60 min y un flujo de 75 mL/min.	X_2 = Parámetros	$X_{2,1}$ Voltaje de la celda. $X_{2,2}$ Tiempo de operación $X_{2,3}$ Flujo de corriente de alimentación.	v min mL/min

Anexo 2: Resultados de ensayos volumétricos

A: Volúmenes gastados de BHK en la valorización del KOH vs tiempo

Nº	Corrida	Vg-BHK (mL)														Normalidad del BHK preparado
		Fiola preparada (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
1	K05060050	0.52	0.28	0.42	0.54	0.58	0.64	0.7	0.76							0.0192
2	K05090075	0.58	0.36	0.54	0.62	0.7	0.8	0.9	0.96	1.06	1.2	1.22				0.0196
3	K05120100	0.56	0.42	0.54	0.66	0.76	0.84	0.96	1.06	1.18	1.26	1.32	1.38	1.42	1.5	0.0198
4	K10060075	0.58	0.38	0.78	1.1	1.3	1.48	1.5	1.54							0.0196
5	K10090100	0.56	0.4	0.82	1.1	1.34	1.42	1.54	1.66	1.56	1.58	1.6				0.0198
6	K10120050	0.52	0.36	0.64	0.8	0.96	1.2	1.33	1.36	1.38	1.44	1.48	1.5	1.5	1.5	0.0192
7	K15060100	0.56	0.42	1.14	1.44	1.52	1.58	1.6	1.56							0.0198
8	K15090050	0.52	0.34	0.74	0.98	1.16	1.28	1.38	1.4	1.42	1.44	1.5				0.0192
9	K15120075	0.56	0.4	1.02	1.34	1.4	1.44	1.48	1.48	-	-	-	-	-	-	0.0198

B: Concentración del KOH en el contenedor concentrado en función al tiempo

Nº	Corrida	KOH (Eq/L)													
		Fiola	Contenedor del concentrado												
	(min)	preparada	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	K05060050	0.0100	0.0054	0.0081	0.0104	0.0111	0.0123	0.0134	0.0146						
2	K05090075	0.0114	0.0071	0.0106	0.0121	0.0137	0.0157	0.0176	0.0188	0.0208	0.0235	0.0239			
3	K05120100	0.0111	0.0083	0.0107	0.0131	0.0151	0.0166	0.019	0.021	0.0234	0.025	0.0262	0.0273	0.0281	0.0297
4	K10060075	0.0114	0.0074	0.0153	0.0216	0.0255	0.029	0.0294	0.0302						
5	K10090100	0.0111	0.0079	0.0162	0.0218	0.0265	0.0281	0.0305	0.0329	0.0309	0.0313	0.0317			
6	K10120050	0.0100	0.0069	0.0123	0.0153	0.0184	0.023	0.0255	0.0261	0.0265	0.0276	0.0284	0.0288	0.0288	0.0288
7	K15060100	0.0111	0.0083	0.0226	0.0285	0.0301	0.0313	0.0317	0.0309						
8	K15090050	0.0100	0.0065	0.0142	0.0188	0.0223	0.0246	0.0265	0.0269	0.0272	0.0276	0.0288			
9	K15120075	0.0111	0.0079	0.0202	0.0265	0.0277	0.0285	0.0293	0.0293						

C: Concentración de KOH recuperado en función al tiempo

Nº	Corrida (min)	KOH (Eq/L)												
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	K05060050	s.r ^(a)	s.r	0.0004	0.0011	0.0023	0.0034	0.0046						
2	K05090075	s.r	s.r	0.0007	0.0023	0.0043	0.0062	0.0074	0.0094	0.0121	0.0125			
3	K05120100	s.r	s.r	0.002	0.004	0.0055	0.0079	0.0099	0.0123	0.0139	0.0151	0.0162	0.017	0.0186
4	K10060075	s.r	0.0039	0.0102	0.0141	0.0176	0.018	0.0188						
5	K10090100	s.r	0.0051	0.0107	0.0154	0.017	0.0194	0.0218	0.0198	0.0202	0.0206			
6	K10120050	s.r	0.0023	0.0053	0.0084	0.013	0.0155	0.0161	0.0165	0.0176	0.0184	0.0188	0.0188	0.0188
7	K15060100	s.r	0.0115	0.0174	0.019	0.0202	0.0206	0.0198						
8	K15090050	s.r	0.0042	0.0088	0.0123	0.0146	0.0165	0.0169	0.0172	0.0176	0.0188			
9	K15120075	s.r	0.0091	0.0154	0.0166	0.0174	0.0182	0.0182						

Nota: (a) "s.r" significa sin recuperación

D: Concentración de K aportado por el KOH recuperado vs tiempo

Nº	Corrida (min)	K (mg/l)												
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	K05060050	s.r ^(a)	s.r	15.6	42.9	89.7	132.6	179.4						
2	K05090075	s.r	s.r	27.3	89.7	167.7	241.8	288.6	366.6	471.9	487.5			
3	K05120100	s.r	s.r	78.0	156.0	214.5	308.1	386.1	479.7	542.1	588.9	631.8	663	725.4
4	K10060075	s.r	152.1	397.8	549.9	686.4	702.0	733.2						
5	K10090100	s.r	198.9	417.3	600.6	663.0	756.6	850.2	772.2	787.8	803.4			
6	K10120050	s.r	89.7	206.7	327.6	507.0	604.5	627.9	643.5	686.4	717.6	733.2	733.2	733.2
7	K15060100	s.r	448.5	678.6	741.0	787.8	803.4	772.2						
8	K15090050	s.r	163.8	343.2	479.7	569.4	643.5	659.1	670.8	686.4	733.2			
9	K15120075	s.r	354.9	600.6	647.4	678.6	709.8	709.8						

Nota: (a) "s.r" significa sin recuperación

Anexo 3: Resultados de mediciones amperométricas

Nº	Corrida (min)	Amperaje (A)													
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
1	K05060050	0.151	0.147	0.147	0.145	0.141	0.137	0.13							
2	K05090075	0.178	0.171	0.168	0.168	0.167	0.164	0.158	0.148	0.14	0.13				
3	K05120100	0.179	0.177	0.18	0.181	0.183	0.185	0.173	0.172	0.158	0.144	0.128	0.109	0.087	
4	K10060075	0.739	0.641	0.486	0.302	0.165	0.099	0.086							
5	K10090100	0.725	0.674	0.506	0.317	0.149	0.104	0.071	0.093	0.094	0.115				
6	K10120050	0.527	0.441	0.37	0.298	0.231	0.176	0.131	0.098	0.075	0.059	0.046	0.038	0.033	
7	K15060100	1.315	0.898	0.46	0.241	0.187	0.194	0.196							
8	K15090050	0.915	0.645	0.459	0.301	0.2	0.137	0.101	0.079	0.07	0.066				
9	K15120075	1.308	0.792	0.435	0.241	0.185	0.176	0.196	-	-	-	-	-	-	-

Anexo 4: Resultados por ICP-OES

A: Concentración de potasio en el agua residual inicial (ARGAL X5)



FL-156_3
Version:06
F.E. 08/2022

REPORTE DE ANALISIS DE MUESTRAS POR ICP (AGUAS)

Parametro: Metales por ICP
Metodologia: EPA 200.7 Rev. 4.4
Marca/Modelo: THERMO FISHER SCIENTIFIC 6500 DUO
Código del equipo: ELAB-202
Código Laboratorio: ARGAL X5
Fecha de Inicio: 2023-10-26
Fecha de Lectura: 2023-10-27
Fecha de Terminó: 2023-10-30

ELEMENTO	Límite de Detección (mg/L)	Muestra (mg/L)	Bk (mg/L)	Factor de dilución (Fd)	Concentración (mg/L)	Conc. Reportada (mg/L)
		ARGAL X5	BK			
Ag	0.0006	0.00031	0.00064	5	-0.0017	<0.0006
Al	0.014	0.10856	-0.02079	5	0.5428	0.5428
As	0.0017	-0.00162	-0.00143	5	-0.0081	<0.0017
B	0.0020	0.01101	0.00122	5	0.0490	0.0490
Ba	0.0023	0.00051	0.00003	5	0.0024	0.0024
Be	0.00021	-0.00017	-0.00016	5	-0.0009	<0.00021
Ca	0.024	0.1005	0.04730	5	0.2660	0.2660
Cd	0.0003	-0.00036	-0.00023	5	-0.0018	<0.0003
Ce	0.003	0.0008	-0.00096	5	0.0040	0.0040
Co	0.0005	-0.00029	-0.00043	5	-0.0015	<0.0005
Cr	0.0005	-0.0004	-0.00064	5	-0.0020	<0.0005
Cu	0.0007	0.00032	-0.00037	5	0.0016	0.0016
Fe	0.0024	0.0048	-0.00560	5	0.0240	0.0240
Hg	0.0010	0.00199	0.00063	5	0.0068	0.0068
K	0.04	183.78	0.07406	5	918.5297	918.5297
Li	0.003	-0.00022	-0.00031	5	-0.0011	<0.003
Mg	0.04	0.0828	0.00409	5	0.3936	0.3936
Mn	0.0008	-0.00045	-0.00072	5	-0.0023	<0.0008
Mo	0.0014	-0.00309	-0.00276	5	-0.0155	<0.0014
Na	0.04	0.902	0.01343	5	4.4429	4.4429
Ni	0.0006	-0.00048	-0.00043	5	-0.0024	<0.0006
P	0.003	0.00007	-0.00309	5	0.0004	<0.003
Pb	0.0008	-0.00067	0.00036	5	-0.0052	<0.0008
Sb	0.0022	-0.0108	-0.00919	5	-0.0540	<0.0022
Se	0.004	0.00113	-0.00096	5	0.0057	0.0057
SiO2	0.017	0.10873	-0.00574	5	0.5437	0.5437
Sn	0.0010	-0.0009	-0.00092	5	-0.0045	<0.001
Sr	0.0007	0.00065	-0.00018	5	0.0033	0.0033
Ti	0.0003	-0.00345	-0.00350	5	-0.0173	<0.0003
Tl	0.004	0.00159	0.00368	5	-0.0105	<0.004
V	0.0005	-0.00021	0.00000	5	-0.0011	<0.0005
Zn	0.0023	0.27703	0.00104	5	1.3800	1.3800

JV
Nivel de Supervisión 1

DM
Nivel de Supervisión 2

Nivel de Supervisión 1: Analista que efectúa el ensayo
Nivel de Supervisión 2: Supervisor de Instrumentación y/o Jefe de Laboratorio Químico

B: Resultados de muestras finales del concentrado por ICP-OES

Nº	Muestra	K (mg/L)	Na (mg/L)
1	K05060050	759.4	100.3
2	K05090075	904.8	40.9
3	K05120100	1070.3	10.8
4	K10060075	1156.4	12.8
5	K10090100	1212.8	9.4
6	K10120050	1243.9	90.7
7	K15060100	1218.1	8.5
8	K15090050	1235.8	68
9	K15120075	1237	8.8

C: Resultados de muestras finales del diluido por ICP-OES

Nº	Muestra	K (mg/L)	Na (mg/L)
1	AR05060050	368.1	53.7
2	AR05090075	213.5	95.4
3	AR05120100	76.9	8.5
4	AR10060075	8	1.1
5	AR10090100	2.1	0.7
6	AR10120050	8.1	36.3
7	AR15060100	1.7	0.4
8	AR15090050	4.1	7.3
9	AR15120075	2	0.3

Anexo 5: Resultados por IC de muestras finales del KOH recuperado

Nº	Muestra	Aniones (mg/L)							
		Fluoruro	Cloruro	Carbonato	Nitrito	Sulfato	Bromuro	Nitrato	Fosfato
1	K05060050	< 0.03	5.2	9.98	< 0.03	0.48	0.18	< 0.03	< 0.1
2	K05090075	< 0.03	26.64	23.52	< 0.03	0.36	0.34	< 0.03	< 0.1
3	K05120100	< 0.03	8.19	8.09	< 0.03	0.1	0.22	< 0.03	< 0.1
4	K10060075	< 0.03	2.76	38.42	< 0.03	0.33	0.19	< 0.03	< 0.1
5	K10090100	< 0.03	1.22	130.63	< 0.03	0.53	0.15	< 0.03	< 0.1
6	K10120050	< 0.03	0.88	46.74	< 0.03	1.37	0.13	< 0.03	< 0.1
7	K15060100	< 0.03	0.62	133.67	< 0.03	0.72	0.11	< 0.03	< 0.1
8	K15090050	< 0.03	1.33	35.21	< 0.03	0.82	0.12	< 0.03	< 0.1
9	K15120075	< 0.03	0.4	73.91	< 0.03	0.67	0.08	< 0.03	< 0.1

Anexo 6: Autorización para la realización de la tesis.

Lima, 04 de setiembre del 2023

Solicito: Uso del laboratorio e Instalaciones de Servicios Analíticos Generales S.A.C.

Quím. César Poma Pando

Gerente de Servicios Analíticos Generales S.A.C.

José Manuel Vilchez Escudero con DNI 44702562 y **Roberto Carlos Cangalaya Sanchez** con DNI 46312950, bachilleres de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, nos presentamos ante usted con el debido respeto y exponemos los siguiente:

Que estando en el desarrollo de la tesis para obtener nuestro título profesional, es que solicitamos el uso del laboratorio e instalaciones de Servicios Analíticos Generales S.A.C. para tomar: como nuestra "unidad de análisis" el agua residual producida en el análisis de aniones por cromatografía iónica, como lugar de ejecución "**Laboratorio de Análisis Medioambientales · Servicios Analíticos Generales S.A.C.**"; así como también, hacer uso de los equipos, reactivos y sus certificados pertinentes para realizar nuestras corridas experimentales y demostrar la validez de nuestros resultados, para los meses de setiembre y octubre del 2023.

Por lo expuesto, agradecemos de antemano la atención solicitada.



José Manuel Vilchez Escudero



Roberto Carlos Cangalaya Sanchez

Solicitamos la firma de usted, como evidencia de aprobación de la solicitud.



Quím. César Poma Pando

Anexo 7: Certificado de equipos utilizados

Equipo	Marca	Código de certificación	Empresa certificadora	Año
Multiparámetro (pH)	WTW	MA-202303105	Métrica Analítica	2023
Multiparámetro (conductímetro)	WTW	MA-202303060	Métrica Analítica	2023
Bureta 10 mL	WITEG	CCP-0101-002-22	Elicrom	2023
Balanza digital	OHAUS	LM-0483-2023	SAT	2023
Fiola 500 mL	ELAB	CCP-0722-004-22	Elicrom	2022

Anexo 7: Certificados de reactivos

A: Sulfato de sodio

Q-100-4

Sulfato de Sodio, Anhidro, Polvo
Baker Analyzed ACS Reactivo

avantor



No. de Producto : 3898
No. de Lote : E02W04
Fecha de Manufactura:
2022/01/10

Certificado de Análisis

PRUEBAS	ESPECIFICACIONES	RESULTADOS
Especificaciones ACS		
Ensayo (Na ₂ SO ₄)	Min. 99.0%	99.93000 %
Materia Insoluble	Máx. 0.01%	0.00200 %
Pérdida por Ignición	Máx. 0.5%	0.50000 %
pH de la Solución al 5% a 25°C	5.2-9.2	6.400000
Cloruro (Cl)	Máx. 0.001%	0.00050 %
Fosfato (PO ₄)	Máx. 0.001%	0.00020 %
Calcio (Ca)	Máx. 0.01%	0.00150 %
Magnesio (Mg)	Máx. 0.005%	0.00020 %
Potasio (K)	Máx. 0.01%	0.00090 %
Trazas de Impurezas (ppm)		
Compuestos Nitrogenados (Como N)	Máx. 5.00 ppm	4.000 ppm
Metales Pesados (como Pb)	Máx. 5.00 ppm	1.000 ppm
Hierro (Fe)	Máx. 0.001%	0.00020 %
Color a Solución (20% w/v) (APHA)	Máx. 20	4.0

País de Origen: MÉXICO
Fecha de caducidad: 2029/01/10

James Ethier
Jamie Ethier
Vice President Global Quality

B: Hidróxido de potasio 47%



Certificate of Analysis

1.05545.1000 Potassium hydroxide solution 47% for analysis EMSURE®
Batch B1877345

	Batch Values	
Assay (acidimetric)	47.6	%
Carbonate (as K ₂ CO ₃)	0.1	%
Chloride (Cl)	≤ 0.004	%
Phosphate (PO ₄)	≤ 0.0005	%
Sulfate (SO ₄)	≤ 0.002	%
Total nitrogen (N)	≤ 0.0003	%
Heavy metals (as Pb)	≤ 0.0005	%
Al (Aluminium)	≤ 0.001	%
As (Arsenic)	≤ 0.0001	%
Ca (Calcium)	≤ 0.0005	%
Cu (Copper)	≤ 0.0005	%
Fe (Iron)	≤ 0.0005	%
Mg (Magnesium)	≤ 0.0005	%
Ni (Nickel)	≤ 0.0005	%
Pb (Lead)	≤ 0.0005	%
Zn (Zinc)	≤ 0.0005	%

Date of release (DD.MM.YYYY) 22.10.2020
Minimum shelf life (DD.MM.YYYY) 31.10.2025

Dr. Dimitrij Ryvlin
Responsible laboratory manager quality control

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

Anexo 8: Característica del cromatógrafo iónico

**REPORTE DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y VERIFICACION
OPERACIONAL DEL ICS3000**

Lima, jueves 19 de enero de 2023

Señores:
SERVICIOS ANALITICOS GENERALES IT23002

Presente:
Atte.: Quím. Julio Molina

Equipamiento Instalado:		
	Modelo	N° de serie
Bomba Gradiente	SP	7020206
Compartimiento de Columna	DC	09091109
Autosampler	AS	07090322
Software de Control: Chromleon	V.7.3	138510

I.- Acciones Generales: OK

1.- Verificación del voltaje de entrada al equipo:

Línea- neutro (220v +/- 10%)	<u>220V</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
Línea -tierra (220v +/- 10%)	<u>220V</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
Neutro-tierra (entre 0 a 1v)	<u>100mV</u>	<input checked="" type="checkbox"/>

2.- El equipo utiliza:

Estabilizador	<input checked="" type="checkbox"/>
UPS	<input checked="" type="checkbox"/>

3.- Verificación de las condiciones Ambientales en el área de trabajo:

Temperatura (entre 14 y 40 °C)	<u>20.0 °C</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
Humedad (entre 20 y 80 %)	<u>65%</u>	<input checked="" type="checkbox"/>

Anexo 9: Característica del ICP

1. INFORMACIÓN DEL CLIENTE

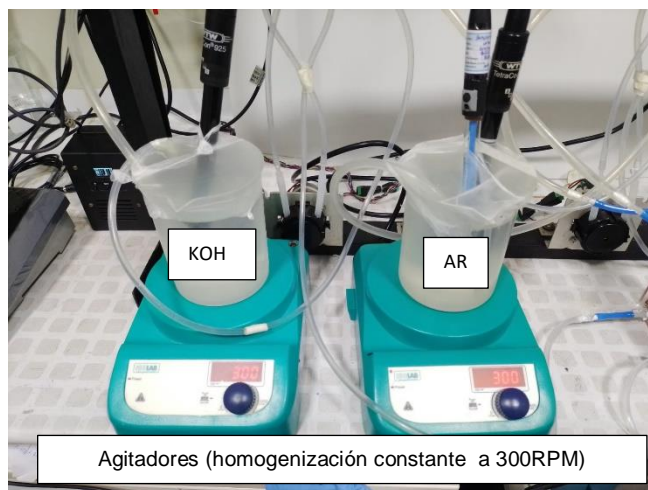
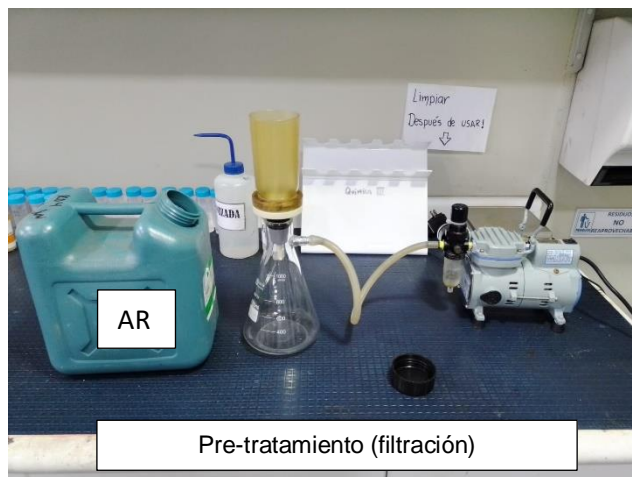
COMPañÍA	Servicios Analíticos Generales S.A.C.
CONTACTO PRINCIPAL	Digna Méndez
DIRECCIÓN	Av. Naciones Unidas 1565, Cercado de Lima 15082
TELÉFONO	4256885
CORREO ELECTRÓNICO	química6@sagperu.com

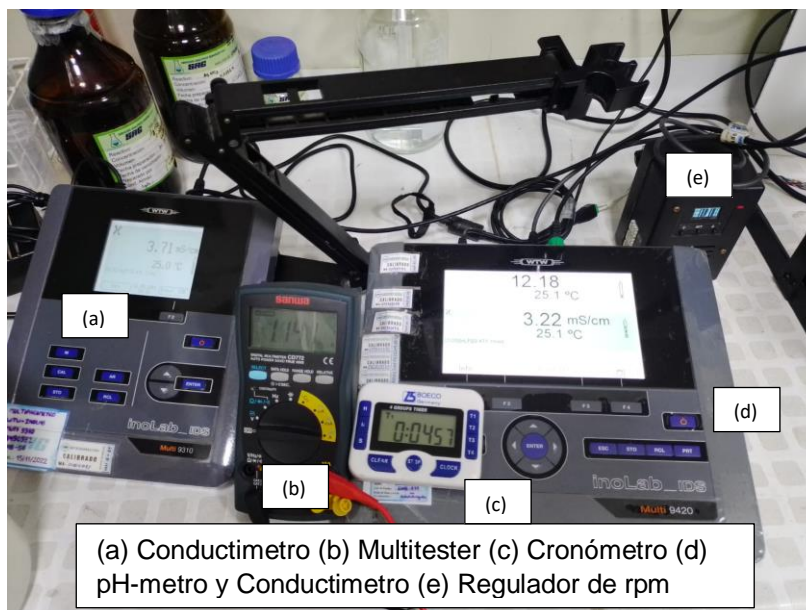
2. INFORMACIÓN DEL EQUIPO (incluye accesorios opcionales)

INSTRUMENTO / ACCESORIO	NÚMERO DE SERIE
ICAP 6500 DUO	20112806
CETAC ASX 520	051135A520
Neslab Thermoflex	111167082

ITEVA VERSIÓN	9.8
Qtegra VERSIÓN	---
TIPO DE COMPUTADORA	Tag Number: N.A.
SISTEMA OPERATIVO	Windows
VERSIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO	Windows 7 Pro

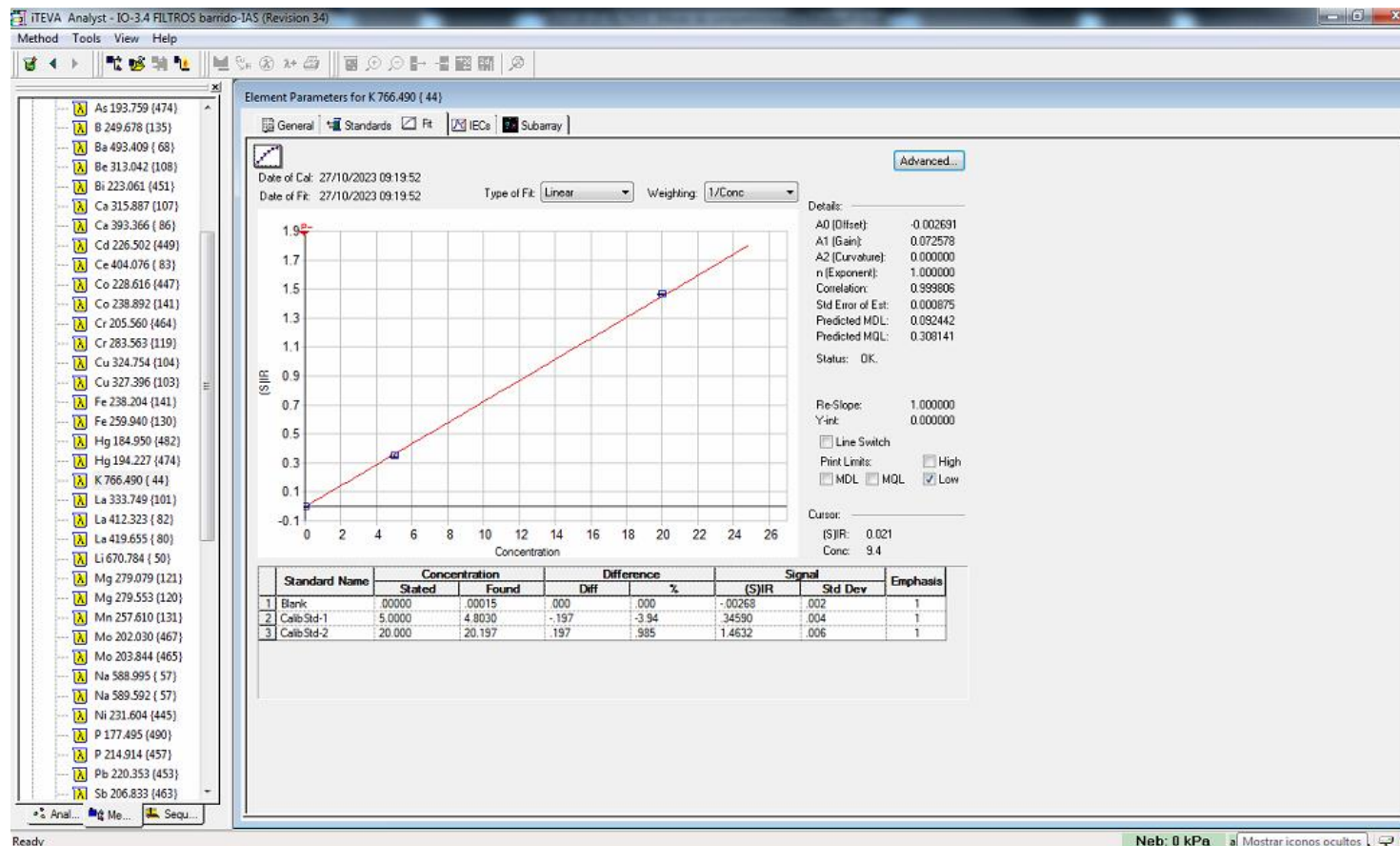
Anexo 10: Fotografías de los experimentos





Anexo 11: Capturas de pantalla del software de resultados del ICP y el IC

A. Curva de calibración del potasio



B. Resultado del agua residual inicial (ARGAL X5)

ITEVA Analyst - IO-3.4 FILTROS barrido-IAS (Revision 34)

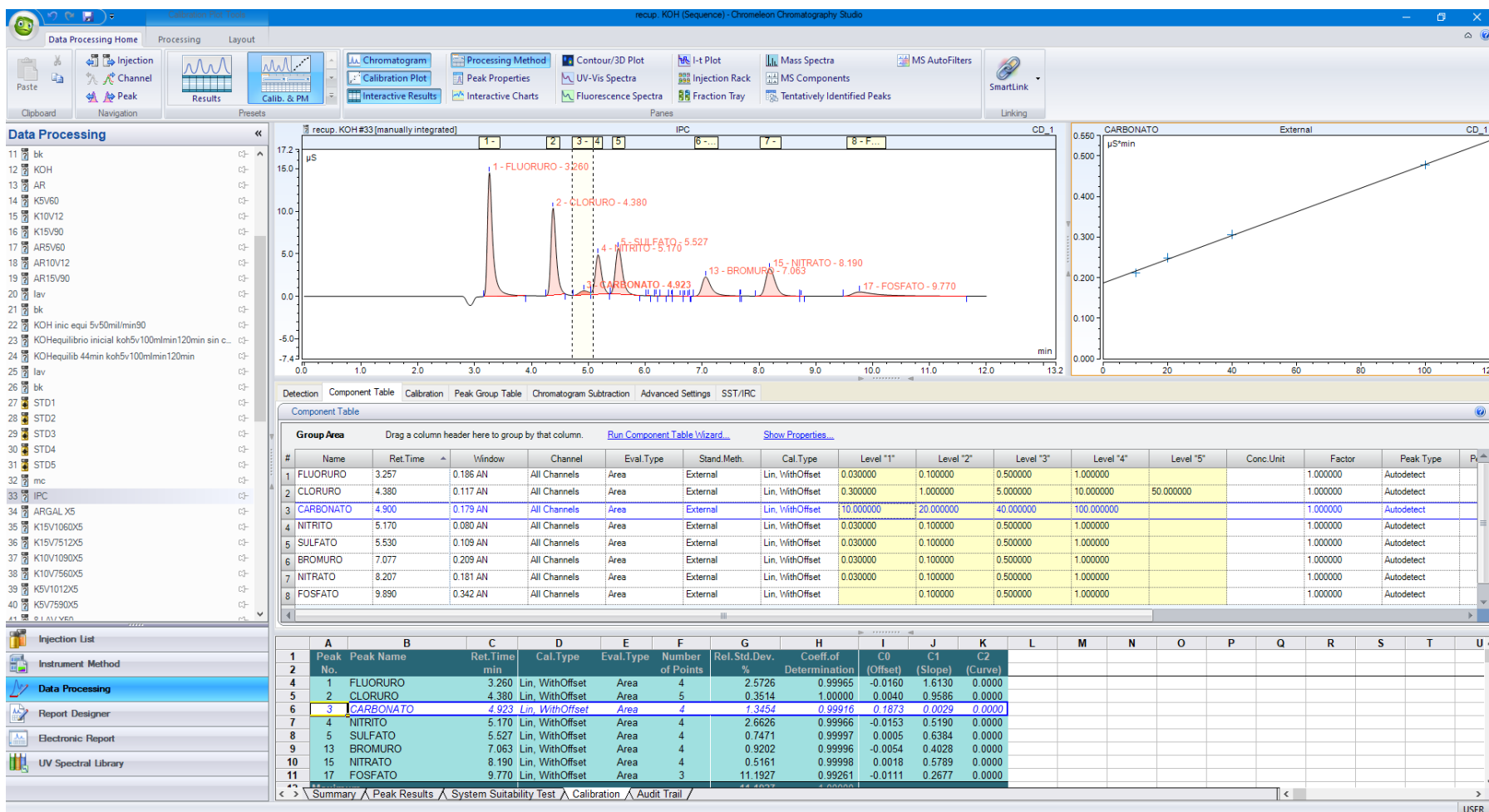
Method Run Results Instrument Tools View Help

Unk: ARGAL X5 27/10/2023 11:11:00 CONC

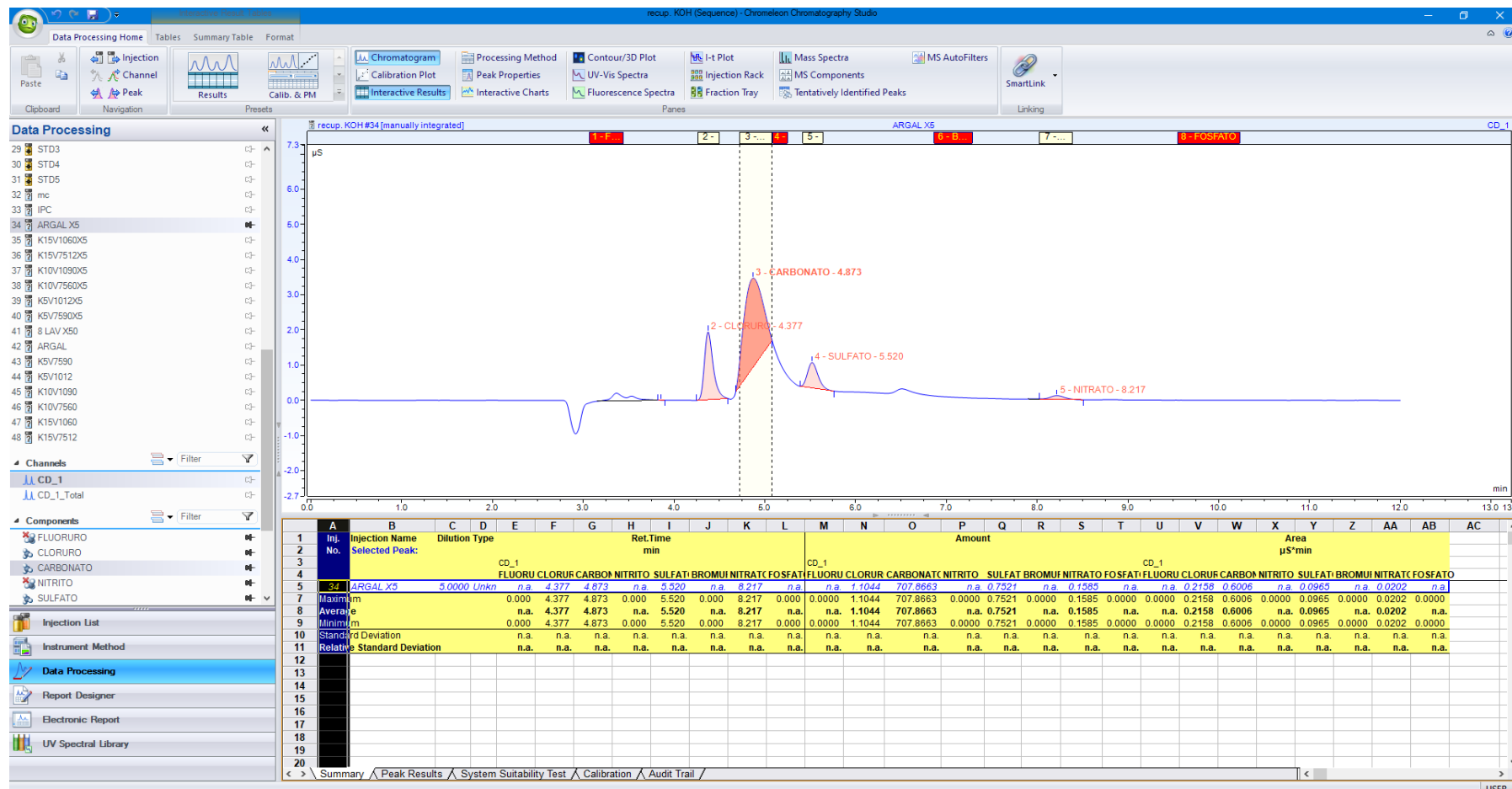
Elem	Ag3280	Al3082	As1890	As1937	B_2496	Ba4934	Be3130	Bi2230	Ca3158	Ca3933	Cd2265	Ce4040	Co2286	Co2388
Units	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Avg	.00031	10856	-0.00162	-0.00362	0.11101	0.00051	-0.00017	-0.0022	10050	0.7465	-0.00036	0.00080	-0.00029	-0.00004
Stddev	.00048	0.7357	0.0163	0.0139	0.0051	0.0004	0.0001	0.010	0.0268	0.0091	0.0017	0.0230	0.0019	0.0087
%RSD	156.14	67.774	100.70	38.345	4.6349	7.3222	4.6091	43.84	2.6659	1.2243	48.226	289.33	63.808	1994.6
#1	.00053	0.2418	-0.00298	-0.00452	0.1134	0.00051	-0.00017	-0.0031	10337	0.7537	-0.00042	0.00069	-0.00022	-0.00068
#2	-0.00024	14220	0.0019	-0.00202	0.1042	0.0047	-0.00018	-0.0023	0.9806	0.7496	-0.00050	0.00315	-0.00015	0.0094
#3	0.00064	15930	-0.00206	-0.00433	0.1127	0.00054	-0.00016	-0.0012	1.0008	0.7362	-0.00016	-0.00145	-0.00051	-0.00039
Elem	Cr2055	Cr2835	Cu3247	Cu3273	Fe2382	Fe2599	Hg1849	Hg1942	K_7664	La3337	La4123	La4196	Li6707	Mg2790
Units	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Avg	-0.00040	-0.00119	0.00032	-0.00010	0.0048	0.01108	0.00199	0.00035	183.78	-0.0001	-0.0001	-0.0000	-0.00022	0.8280
Stddev	0.00026	0.00019	0.00034	0.00063	0.0155	0.02403	0.00052	0.00068	1.06	0.0006	0.0001	0.0011	0.0002	10.459
%RSD	66.476	16.111	107.68	632.15	324.7	216.82	26.197	191.50	0.57846	414.8	47.72	2560.	8.3164	126.32
#1	-0.00069	-0.00102	0.00060	0.00062	-0.0101	0.0180	0.0143	0.0109	183.31	0.0005	-0.0001	0.0012	-0.00023	0.3850
#2	-0.00031	-0.00140	0.00040	-0.00036	0.0036	0.00692	0.00206	-0.00024	185.00	-0.0004	-0.0002	-0.0010	-0.00020	0.0785
#3	-0.00018	-0.00116	-0.00006	-0.00056	0.0208	0.03837	0.00247	0.00020	183.03	-0.0005	-0.0001	-0.0004	-0.00024	20226
Elem	Mg2795	Mn2576	Mo2020	Mo2038	Na5889	Na5895	Ni2316	P_1774	P_2149	Pb2203	Sb2068	Se1960	Se2039	Si2516
Units	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Avg	0.00694	-0.00045	-0.00309	-0.00340	7.4019	9.0200	-0.00048	0.00007	0.0132	-0.00067	-0.01080	0.0113	-0.00152	108.73
Stddev	0.00019	0.00003	0.00073	0.00155	0.2111	0.00525	0.00005	0.0139	0.0093	0.0101	0.0106	0.00817	0.00264	0.0085
%RSD	2.7845	7.3691	23.614	45.776	2.8519	58.239	10.618	2038.5	70.703	150.49	9.7815	725.53	173.50	7.7869
#1	0.00679	-0.00049	-0.00393	-0.00202	7.5973	8.9598	-0.00043	0.0158	0.0078	-0.00078	-0.01202	-0.00682	0.00152	10.948
#2	0.00687	-0.00045	-0.00264	-0.00308	7.1780	9.0563	-0.00048	-0.00023	0.0078	-0.00162	-0.01017	0.00069	-0.00281	10.889
#3	0.00716	-0.00042	-0.00269	-0.00508	7.4305	9.0439	-0.00053	-0.00115	0.0240	0.00039	-0.01020	0.00950	-0.00328	10.781
Elem	Sn1899	Sr4077	Sr4215	Te2002	Te2142	Ti3349	Ti1908	U_3670	U_3859	V_2924	V_3093	W_2079	W_2189	W_2397
Units	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Cts/S	Cts/S	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Avg	-0.00090	0.00065	0.00066	0.0015	0.0029	-0.00345	0.00159	z *****	z *****	-0.00021	-0.00107	0.0148	0.0036	-0.0170
Stddev	0.00068	0.00001	0.00001	0.0013	0.0014	0.00006	0.00102	-----	-----	0.00071	0.00007	0.0065	0.0006	0.0344
%RSD	75.579	1.3998	1.1028	88.13	47.77	1.8270	64.179	-----	-----	337.27	6.2923	44.03	17.79	202.2
#1	-0.00097	0.00065	0.00067	0.0031	0.0032	-0.00350	0.00274	z 722.5	z 1021.	0.00059	-0.00115	0.0178	0.0032	-0.0386
#2	-0.00019	0.00064	0.00066	0.0007	0.0014	-0.00338	0.00125	z 723.5	z 1023.	-0.00045	-0.00104	0.0193	0.0031	-0.0351
#3	-0.00155	0.00065	0.00066	0.0009	0.0041	-0.00347	0.00078	z 725.1	z 1027.	-0.00077	-0.00103	0.0073	0.0043	0.0226
Elem	Zn2062	Zn2138	Zr2568	Zr2742	Zr3391									
Units	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm									
Avg	2.7703	2.8374	-0.0011	-0.0025	-0.0002									
Stddev	0.00298	0.00103	0.0004	0.0064	0.0002									
%RSD	1.0756	36.186	36.14	257.3	87.57									

Ready Neb: 0 kPa admin

C. Curva de calibración de aniones



D. Resultado de aniones del agua residual inicial (ARGAL X5)



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
1	Inj.	Injection Name	Dilution Type	Ret.Time										Amount										Area				
2	No.	Selected Peak:		min										µS*min										µS*min				
3				CD_1										CD_1										CD_1				
4				FLUORU	CLORUR	CARBON	NITRITO	SULFAT	BROMUJ	NITRAT	FOSFAT	FLUORU	CLORUR	CARBONAT	NITRITO	SULFAT	BROMUJ	NITRATO	FOSFAT	FLUORU	CLORUR	CARBON	NITRITO	SULFAT	BROMUJ	NITRAT	FOSFAT	
5	34	ARGAL X5	5.0000	Unkn	n.a.	4.377	4.873	n.a.	5.520	n.a.	8.217	n.a.	n.a.	1.1044	707.8663	n.a.	0.7521	n.a.	0.1585	n.a.	n.a.	0.2158	0.6006	n.a.	0.0965	n.a.	0.0202	n.a.
7	Maximum			0.000	4.377	4.873	0.000	5.520	0.000	8.217	0.000	0.0000	1.1044	707.8663	0.0000	0.7521	0.0000	0.1585	0.0000	0.0000	0.2158	0.6006	0.0000	0.0965	0.0000	0.0202	0.0000	
8	Average			n.a.	4.377	4.873	n.a.	5.520	n.a.	8.217	n.a.	n.a.	1.1044	707.8663	n.a.	0.7521	n.a.	0.1585	n.a.	n.a.	0.2158	0.6006	n.a.	0.0965	n.a.	0.0202	n.a.	
9	Minimum			0.000	4.377	4.873	0.000	5.520	0.000	8.217	0.000	0.0000	1.1044	707.8663	0.0000	0.7521	0.0000	0.1585	0.0000	0.0000	0.2158	0.6006	0.0000	0.0965	0.0000	0.0202	0.0000	
10	Standard Deviation			n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
11	Relative Standard Deviation			n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	