

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



**“REMOCIÓN DE IONES SULFATOS DE AGUA DE RECHAZO
DE UNA PLANTA DE OSMOSIS INVERSA MEDIANTE
PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y MICROFILTRACIÓN”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUÍMICO

AUTORES:

ROJAS CUELLAR, LUIS FELIPE
VALDIVIA GONZALES, SERGIO ERICSON
VÍLCHEZ ROJAS, CHRISTIAN RAÚL

CALLAO, FEBRERO 2017

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Expuesto por los Bachilleres **ROJAS CUELLAR LUIS FELIPE, VALDIVIA GONZALES SERGIO ERICSON y VILCHEZ ROJAS CHRISTIAN**, ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios :

ING° SANEZ FALCON LIDA CARMEN PRESIDENTE

ING° TOLEDO PALOMINO MARÍA ESTELA SECRETARIO

ING° CHAMPA HENRIQUEZ OSCAR MANUEL VOCAL

ING° RANGEL MORALES FABIO MANUEL ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 1 Folio N° 10 y Acta N° 009 de Sustentación por la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de fecha **27 DE FEBRERO 2017**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expresamos nuestro profundo agradecimiento a Dios por iluminar nuestros caminos y por darnos perseverancia para alcanzar nuestras metas.

En segundo lugar agradecemos a todo el personal que labora en la Universidad Nacional del Callao, quienes nos recibieron con amabilidad y cordialidad para realizar nuestros trabajos en el laboratorio durante nuestra investigación

En tercer lugar y no menos importante a nuestros padres por todo el apoyo que nos brindaron durante nuestra formación universitaria y por motivarnos a perseverar en el logro de nuestras metas profesionales.

Finalmente agradecemos a quien lee nuestra tesis, por permitir que nuestras experiencias, investigaciones y conocimientos ayude a su formación profesional.

DEDICATORIA

A nuestros padres por habernos forjado como las personas que somos en la actualidad; mucho de nuestros logros se los debemos a ustedes entre los que se incluye este. nos formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, nos motivaron constantemente para alcanzar nuestros anhelos.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Determinación del problema	3
1.2. Formulación del problema.....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos.....	4
1.3. Objetivos de la investigación	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación de la investigación.....	5
1.4.1. Teórico	5
1.4.2. Tecnológico	5
1.4.3. Ambiental.....	5
1.4.4. Importancia	5
II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.2. Bases Teóricas.....	9
2.2.1. Precipitación química.....	9
2.2.2. Solubilidad.....	10
2.2.3. Factores que dependen de la solubilidad de un compuesto poco soluble.....	11
2.2.4. Reacción de formación de etringita	14
2.2.5. Filtración por membranas.....	16
2.3. Marco conceptual	23
2.3.1. Iones Sulfatos (SO ₄ -2).....	23

2.3.2.	Descripción del Proceso	25
2.3.3.	Operación de sistemas de microfiltración	28
2.4.	Definición de términos.....	30
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS	32
3.1.	Variables de la investigación.....	32
3.1.1.	Variable independiente.....	32
3.1.2.	Variable dependiente.....	32
a.	Operacionalización de variables	33
b.	Hipótesis General e Hipótesis específicas.....	34
IV.	METODOLOGÍA	35
4.1.	Tipo de investigación	35
4.2.	Diseño de la investigación.....	35
4.3.	Población y muestra.....	36
4.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	37
4.4.1.	Método de análisis.....	37
4.4.2.	Metodología experimental	38
4.5.1.	Materiales y métodos	42
4.5.2.	Procedimiento experimental	44
4.6.	Procedimiento estadístico y análisis de datos	54
V.	RESULTADOS.....	55
5.1.	Características Físico-Químicas del agua de rechazo de Planta de Osmosis Inversa .	55
5.2.	Resultados Experimentales.....	56
5.3.	Estimación del modelo matemático y análisis de las curvas de contorno	58
5.4.	Parámetros óptimos	66
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	67
6.1.	Contrastación de hipótesis con los resultados	67
6.2.	Contrastación de resultados con otros estudios similares	68
6.2.1	Análisis de las características Físico-Químicas del agua de rechazo de una planta de Osmosis Inversa	68

VII.	CONCLUSIONES.....	71
VIII.	RECOMENDACIONES.....	72
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
	ANEXOS.....	76

INDICE DE CUADROS

CUADRO N° 4.1	CANTIDAD DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	39
CUADRO N° 4.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	51
CUADRO N° 4.3	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	53
CUADRO N° 5.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA DE RECHAZO	55
CUADRO N° 5.2	RESULTADOS DE REMOCIÓN DE SULFATOS EN EL AGUA DE RECHAZO	57
CUADRO N° 5.3	PÁRAMETROS ÓPTIMOS	66

INDICE DE TABLAS

TABLA N° 2.1	PRINCIPALES PROCESOS DE MEMBRANAS USADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA.....	17
--------------	------------------------------------------------------------------------------	----

INDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 2.1	CURVA DE SOLUBILIDAD CaSO_4 VS TEMPERATURA.....	10
FIGURA N° 2.2	PRECIPITACIÓN DE CARBONATOS.....	13
FIGURA N° 2.3	PRODUCTO DE SOLUBILIDAD.....	14
FIGURA N° 2.4	ESPECIES DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN ACUOSA A DIFERENTES PH.....	15
FIGURA N° 2.5	ESPECTRO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS.....	16
FIGURA N° 2.6	OSMOSIS INVERSA.....	19
FIGURA N° 2.7	MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA.....	20
FIGURA N° 2.8	ESPECTRO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS.....	21
FIGURA N° 2.9	MICROFILTRACIÓN POR FLUJO CRUZADO.....	23
FIGURA N° 2.10	PROCESO MULTIFLOW PARA LA PRECIPITACIÓN DE SULFATOS.....	27
FIGURA N° 2.11	FLUJO DEL PROCESO COMBINADO DE ELIMINACIÓN DE SULFATOS...	27
FIGURA N° 2.12	SISTEMA DE REDUCCIÓN DE SÓLIDOS EN FILTRO DE MEMBRANA TUBULAR.....	29
FIGURA N° 4.1	REACTOR PARA REMOCIÓN DE SULFATOS.....	41
FIGURA N° 4.2	ANÁLISIS PARA DETERMINACIÓN DE SULFATOS.....	45
FIGURA N° 4.3	ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE RECHAZO.....	48
FIGURA N° 4.4	PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	49
FIGURA N° 4.5	MICROFILTRACIÓN 0.45 MICRONES.....	50
FIGURA N° 4.6	MUESTRAS DE AGUA TRATADA A DISTINTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	51
FIGURA N° 5.1	DIAGRAMA DE PARETO DE LOS EFECTOS.....	58
FIGURA N° 5.2	DIAGRAMA DE PARETO DE LOS EFECTOS ESTANDARIZADOS.....	59
FIGURA N° 5.3	PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DE LOS COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE REGRESIÓN FACTORIAL PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS.....	60
FIGURA N° 5.4	EFECTOS PRINCIPALES PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS.....	61
FIGURA N° 5.5	EFECTOS DE LA INTERACCIÓN DE VARIABLES PARA REMOCIÓN DE SULFATOS.....	62
FIGURA N° 5.6	CURVAS DE CONTORNO PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS	64
FIGURA N° 5.7	OPTIMIZACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS	65

INDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO N° 4.1	PROCEDIMIENTO PARA REMOCIÓN DE SULFATOS.....	47
----------------	----------------------------------------------	----

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad la remoción de sulfatos de agua de rechazo (alto contenido de sales disueltas) de una planta de osmosis inversa mediante precipitación química y microfiltración, se propuso la precipitación con agentes químicos hidróxido de calcio e hidróxido de aluminio y posterior microfiltración.

El hidróxido de aluminio permite la formación de la etringita, como sulfoaluminato de calcio para remover la mayor cantidad de sulfatos, pero previamente se eliminó los bicarbonatos/carbonatos que interferían en la precipitación de etringita, ya que estos, tienen mayor afinidad con el calcio presente en la disolución. Para conseguir este objetivo se acondiciona el valor de pH, se añadiendo NaOH a la disolución.

Las pruebas experimentales se realizaron en un reactor con distintos valores de velocidad de rotación a distintos tiempos; y se reportó 35.4% de remoción de sulfatos y para comprobar la exactitud de nuestros resultados se realizó el análisis de varianza (ANOVA).

ABSTRACT

The aim of the present work is the removal of rejection water sulphates (high dissolved salt content) of a reverse osmosis plant by chemical precipitation and microfiltration, precipitation was proposed with chemical agents hydroxide of calcium and aluminum hydroxide and subsequent microfiltration.

Aluminum hydroxide allows the formation of ettringite, such as calcium sulfoaluminate to remove the largest amount of sulfates, but previously the bicarbonates / carbonates that interfered in the precipitation of ettringite were eliminated, as these have a greater affinity with the present calcium in the solution. To achieve this objective, the pH value is conditioned by adding NaOH to the solution.

The experimental tests were carried out in a reactor with different speed values at different times; and 35.4% sulphate removal was reported and an analysis of variance (ANOVA) was performed to verify the accuracy of our results.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Determinación del problema

Actualmente la plantas desaladoras por osmosis inversa representa a nivel mundial una de las tecnologías más importantes para la purificación de agua salobre, este proceso permite obtener como producto agua de alta calidad y un subproducto como rechazo que presenta un alto contenido de sales y otros contaminantes.

En el Perú la mayoría de las empresas que carecen de agua para sus diversas actividades productivas se han visto obligadas a tratar aguas salobres subterráneas, explotados de pozos e inclusive agua de mar mediante plantas de osmosis inversa con la finalidad de cubrir estas demandas hídricas.

Empresas de Paracas tratan el agua de pozo mediante osmosis inversa, pero presentan inconvenientes en el agua de la línea de rechazo, debido a la presencia de alto contenido de iones sulfatos y como solución se plantea la precipitación química y microfiltración.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo debe ser el proceso de remoción de iones sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa?
- ¿Cuáles son las condiciones fisicoquímicas que determinan la remoción de iones sulfatos presentes en el agua de rechazo empleando la precipitación química y la microfiltración?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Remover los iones sulfatos de agua de rechazo de una planta de osmosis inversa mediante precipitación química y microfiltración.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.
- Determinar las condiciones fisicoquímicas para remover los iones sulfatos presentes en el agua de rechazo empleando la precipitación química y la microfiltración.

1.4. Justificación de la investigación

Las razones por la que desarrolla la presente investigación son:

1.4.1. Teórico

Contribuirá al desarrollo de conocimientos en tratamiento de agua de rechazo de una planta de osmosis que contiene alta concentración de iones sulfatos.

1.4.2. Tecnológico

Permitirá aplicar las condiciones óptimas de los procesos de la precipitación química y la microfiltración

1.4.3. Ambiental

Permitir disminuir el impacto que pueda generar al sistema hídrico del alcantarillado.

1.4.4. Importancia

El presente trabajo de investigación radica en su importancia como alternativa tecnológica para el tratamiento y remoción de iones sulfato presentes en el flujo de rechazo de las Plantas de Osmosis Inversa, y tiene mayor relevancia debido a la obligación que tienen las actividades industriales en cumplir con los Valores Máximos Admisibles (VMA) en la descarga de sus efluentes.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Para el presente trabajo de investigación se considera los siguientes antecedentes:

✓ Sanz, 2015 desarrolló una investigación **“Eliminación de Sulfatos en Agua de Mina Mediante Procesos de Precipitación en Serie y Nanofiltración”**, cuyo objetivo fue de reducir sulfatos presentes en agua de mina para ello emplearon la tecnología de nanofiltración que genera agua de calidad y un rechazo con alto contenido de iones sulfatos, este rechazo con iones sulfatos se trató mediante la reacción combinada de precipitación de sulfato de calcio y un segundo paso con la adición de sal de aluminio formando la etringita insoluble (sulfoaluminato de calcio hidratado). Los resultados reportaron valores de iones sulfatos inferiores a 50 mg/L que es lo ideal según la norma para descarga de efluentes.

✓ Moreno, 2014, desarrollo una investigación **“Estudio del Proceso de Precipitación de Etringita para la Eliminación de Sulfatos en los Efluentes Generados en Industrias Químicas del Ebro”** con el objetivo de aumentar el porcentaje de sulfatos que se eliminan de los vertidos actualmente (2%), mediante tratamientos con los que cuentan en industrias químicas del Ebro. Para ello desarrolló el siguiente procedimiento para los efluentes aportantes de este ión (descalcificadoras y osmosis inversa): Mantiene la relación estequiometria de los iones calcio, aluminio y sulfatos a valores de pH próximos 12.5, agitación continua de la mezcla, tiempo de

residencia y temperatura ambiente. Los resultados reportaron un rango de remoción desde 25%, 32% y 40% concentración de iones sulfatos.

✓ Primitivo, et al. (2013), desarrollaron **“Remoción de Sulfatos del Drenaje de una Mina Abandonada por Electrocoagulación. Influencia de la Hidrodinámica y Densidad de Corriente”** con el objetivo de aplicar la electrocoagulación usando aluminio como ánodo de sacrificio, los parámetros iniciales de la muestra fueron pH 8.5, 24 μgL^{-1} As, 3567 mgL^{-1} SO_4^{2-} y la conductividad 3.56 mS cm^{-1} . Las pruebas pilotos se ensayaron en el rango de 1.82 a 9.11 cm s^{-1} , pH a 7 y con dos intensidades de corriente de 4 a 6 mA cm^{-2} .

Los resultados reportaron una remoción de 91.6% y 92.5% para arsénico ensayados con densidades de corriente 5 y 6 mA cm^{-2} . En cuanto a sulfatos se obtuvo una remoción 52.73% a 4 mA cm^{-2} y 1.82 mA cm^{-2} . El incremento de la densidad de corriente no mejora los resultados debido a la generación de gases electrolíticos.

✓ Hurtado (2012), **“Desarrollo de una Tecnología para Disminuir la Concentración de Sulfatos en Drenajes Ácidos de Minas y Agua Contaminadas usando un Consorcio Microbiano Reductor de Sulfato”**; cuyo objetivo fue de encontrar una alternativa más rentable para la eliminación de sulfatos presentes en el agua mediante el cultivo de un consorcio microbiano reductor de sulfato halotolerante para ello se utilizaron un biorreactor en operación semicontinua, consorcio microbiano y sustratos complejos como el almidón industrial, sus hallazgos

reportaron que el pH, NaCl Cu y Zn disminuyen la capacidad del consorcio microbiano de reducir sulfato.

✓ **Bowell (2004)**, desarrolló un investigación titulada **“Una revisión de las opciones de eliminación de sulfato para las aguas de mina”** con el objetivo de estudiar y comparar las distintas técnicas para la remoción de sulfatos empleando membranas e intercambio iónico, precipitación química y remoción biológica de sulfatos. Los distintos enfoques se basan en compilaciones anteriores de **Bowell (2000)** y **Lorax (2003)** y discuten bajo dos enfoques; remoción por membranas y precipitación de sulfatos. La investigación concluye que la precipitación química es generalmente la menos costosa pero produce altos subproductos residuales. El proceso SAVMIN, es el proceso más eficiente para efluentes con alto sulfatos por métodos de precipitación química. Las membranas y el proceso de intercambio iónico, con excepción de SPARRO y GYP-CIX, no son adecuados para tratamiento de agua de mina, a menos que se apliquen pretratamientos lo cual encarece el sistema. La reducción biológica de sulfatos es una alternativa versátil, reportaron las pruebas piloto.

✓ **Smit (1999)**, desarrolló un estudio titulado **“Tratamiento de agua de mina contaminada”**, el objetivo de esta investigación consiste en disminuir la concentración de sulfatos presentes en el agua de mina contaminada. Respecto a la metodología emplea el proceso SAVMIN, este proceso utiliza cinco etapas; Precipitación de metales pesados y magnesio, Super saturación de yeso, Precipitación de etringita, Carbonatación y Recirculación de hidróxido de aluminio. Los resultados

fueron, la remoción de sulfatos en 90% (agua de mina) y 98% (agua de una planta química), también fue posible la remoción de metales pesados a niveles aceptables por la normativa ambiental.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Precipitación química

Sanz 1989, La precipitación se basa en la diferencia de solubilidad entre los componentes de la mezcla y se emplea en el caso de sólidos disueltos en líquidos. Cuando el sólido (sóluto) no es muy soluble en el líquido (solvente), puede evaporarse un poco del líquido hasta que el sólido precipite. Si el sólido es muy soluble, se le agrega a la mezcla (disolución) un compuesto que reaccione con él y forme un precipitado, por lo general, esta técnica se complementa con los procesos de centrifugación, decantación o filtración.

La precipitación química consiste en añadir ciertos productos químicos al agua residual para conseguir que estos alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación.

La precipitación química implica la adición de productos químicos que cambian el estado físico de los sólidos disueltos convirtiéndolos en insolubles facilitando la remoción. El grado de remoción que se obtenga depende de la cantidad y calidad de la sustancia química que se agrega; estas sustancias interactúan con las partículas presentes en el agua mediante diversas reacciones químicas.

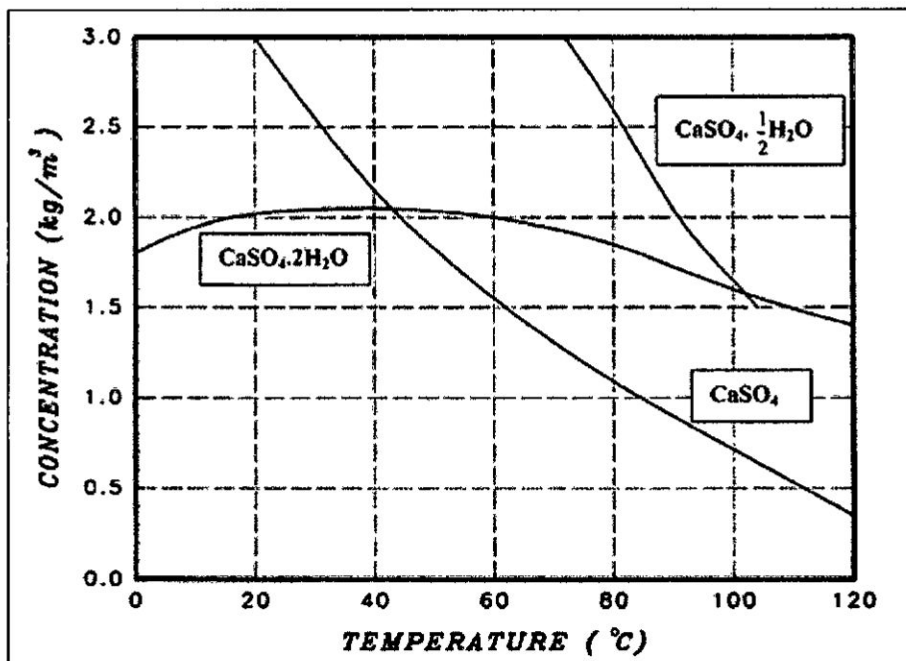
2.2.2. Solubilidad

Picado 2008, La solubilidad "S" es la capacidad de una sustancia de disolverse en otra. Se expresa en términos de la masa de una sustancia (denominada el soluto) que puede disolverse en una masa de otra (denominada el disolvente)

$$S = \frac{m_{\text{soluto}}}{m_{\text{disolvente}}}$$

La solubilidad depende de la naturaleza química de ambas sustancias (mientras más afines sean, más solubles será el soluto en el solvente).

FIGURA 2.1
CURVA DE SOLUBILIDAD CaSO_4 VS TEMPERATURA



Fuente: www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/Tema09.htm

2.2.3. Factores que dependen de la solubilidad de un compuesto poco soluble

➤ Fuerza Iónica del medio

Si tenemos en cuenta la relación entre la verdadera constante (termodinámica) y el producto de solubilidad.

$$(M)^m(X)^x = \frac{K_s^{term}}{\gamma_M^m \gamma_X^x} = K_s$$

Se entiende que dado que al aumentar la fuerza iónica disminuyen los coeficientes de actividad (según Debye-Huckel), la presencia de sales inertes hace aumentar el producto de solubilidad, y por tanto la solubilidad de electrolitos.

La variación del producto de solubilidad cumple la siguiente relación, como se puede hacer ver fácilmente.

$$pK_s = pK_s^{term} - \frac{0.5\sqrt{u}}{(1 + \sqrt{u})(mz_M^2 + xz_X^2)}$$

➤ Efecto salino

la presencia de otras sales extrañas solubles en la disolución saturada de un compuesto poco soluble, produce un aumento en la solubilidad del precipitado.

➤ pH

En el caso de aguas oceánicas, donde el sistema de amortiguación de carbonato-bicarbonato opera efectivamente, el pH varía dentro de unos límites estrechos (8.1-8.3).

En aguas cercanas a la costa, el pH de agua de mar se puede alejar del valor promedio indicado por el efecto de la actividad fotosintética, la respiración celular y el efecto de descargas de origen antropogénico. En aguas interiores las variaciones en pH son grandes. El pH de lagos alcalinos puede tener valores mayores a 10 ó 11 unidades, mientras que el pH en algunas ciénagas o pantanos puede ser menores de 4.0. En términos generales, el pH de un cuerpo de agua puede variar a lo largo de un amplio rango de valores, dependiendo de factores intrínsecos y extrínsecos al ambiente acuático:

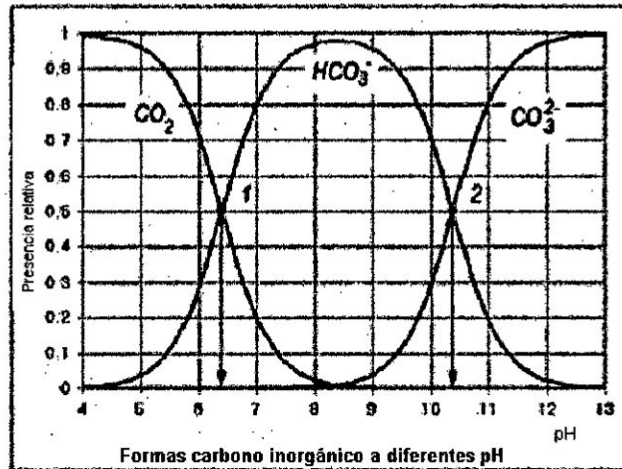
Factores intrínsecos

- ✓ Capacidad amortiguadora del sistema de alcalinidad carbonato-bicarbonato
- ✓ Estratificación y mezcla del sistema acuático
- ✓ Evaporación
- ✓ La intensidad de procesos biológicos tales como fotosíntesis, respiración y actividades de descomposición de materia orgánica
- ✓ La interacción de los factores arriba mencionados con el sistema de alcalinidad

Factores extrínsecos

- ✓ Composición de: suelos adyacentes, depósitos superficiales y lecho rocoso
- ✓ Fuentes de contaminación: drenaje ácido de minas, precipitación ácida
- ✓ Presión parcial de CO₂ en la atmósfera
- ✓ Temperatura

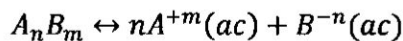
FIGURA 2.2
PRECIPITACIÓN DE CARBONATOS



Fuente: <http://www.elaguapotable.com/acondicionamiento.htm>

➤ **Producto de Solubilidad**

Picado 1986, el producto de solubilidad se define como la constante de equilibrio de la reacción química en la que aparece un sólido iónico como reactivo y sus correspondientes iones disueltos en agua como productos.



La disolución ha de estar saturada de iones, con el máximo de iones posibles disueltos en el equilibrio.

En el producto de solubilidad solo aparecen las concentraciones en moles por litro de los iones elevadas a sus coeficientes estequiométricos porque el sólido tiene actividad uno.

$$K_{ps} = (A^{+m})^n \cdot (B^{-n})^m = (ns)^n \cdot (ms)^m = n^n m^m \cdot s^{n+m}$$

FIGURA N° 2.3
PRODUCTO DE SOLUBILIDAD

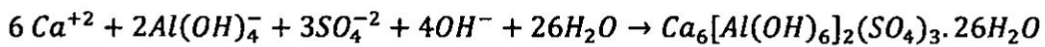
PRODUCTOS DE SOLUBILIDAD

Compuesto Kps	Compuesto Kps	Compuesto Kps	Compuesto Kps
Al(OH) ₃	3 x 10 ⁻³⁴	Mg(OH)	2,71 x 10 ⁻¹²
BaCO ₃	5 x 10 ⁻⁹	Mn(OH) ₂	2 x 10 ⁻¹³
BaCrO ₄	2,1 x 10 ⁻¹⁰	Hg ₂ Cl ₂	1,2 x 10 ⁻¹⁸
BaF ₂	1,7 x 10 ⁻⁶	AgBrO ₃	5,5 x 10 ⁻⁵
BaSO ₄	1,1 x 10 ⁻¹⁰	AgBr	5 x 10 ⁻¹³
CaCO ₃	4,5 x 10 ⁻⁹	AgCl	1,8 x 10 ⁻¹⁰
CaF ₂	3,9 x 10 ⁻¹¹	Ag ₂ CrO ₄	1,2 x 10 ⁻¹²
CaSO ₄	2,4 x 10 ⁻⁵	AgI	8,3 x 10 ⁻¹⁷
Cu(OH) ₂	4,8 x 10 ⁻²⁰	AgSCN	1,1 x 10 ⁻¹²
Cu(IO ₃) ₂	7,4 x 10 ⁻⁸	ZnCO ₃	1 x 10 ⁻¹⁰
La(OH) ₃	2 x 10 ⁻²¹	Zn(OH) ₂ amorfo	3 x 10 ⁻¹⁶
PbSO ₄	1,6 x 10 ⁻⁸	Zn(OH) ₂ cristalino	6 x 10 ⁻¹⁷

Fuente: <http://slideplayer.es/slide/10414312>

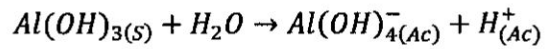
2.2.4. Reacción de formación de etringita

Se basa en la reacción del anión sulfato con las especies de Al⁺³ en medio básico, generando una sal insoluble del tipo sulfoaluminato de calcio de acuerdo a la siguiente reacción química:



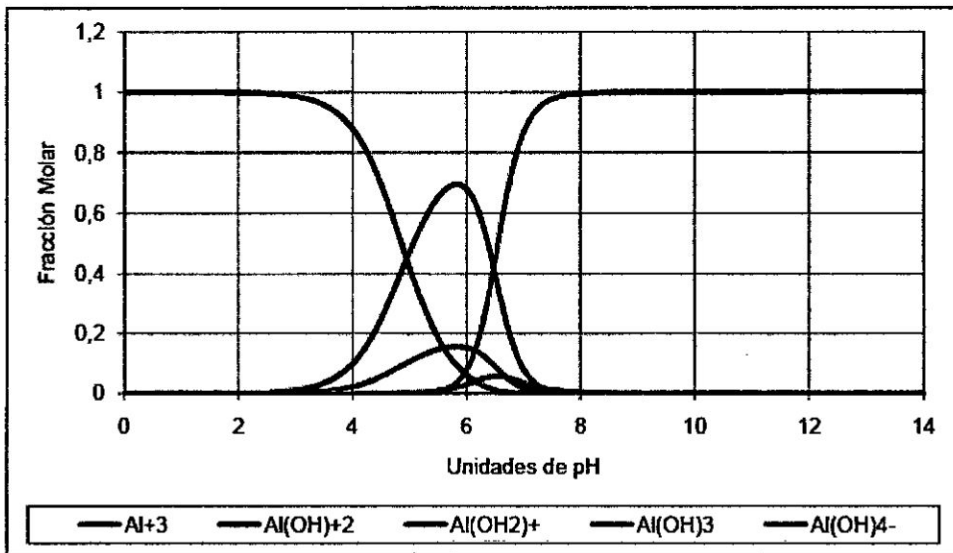
La especie $Ca_6[Al(OH)_6]_2(SO_4)_3 \cdot 26 H_2O$ corresponde a una sal básica muy insoluble, voluminosa de alto peso molecular, que precipita generando un sólido no tan coloidal, mas fácil de decantar y separar. En esta reacción el componente fundamental es el anión aluminato $Al(OH)_4^-$ derivado del policloruro de aluminio,

reactivo floculante empleado en este estudio y de amplio uso en tratamiento de aguas. La especie aniónica de aluminio se forma mediante la siguiente reacción de hidrólisis.



Con respecto a esta reacción de hidrólisis, es necesario destacar que la generación del anión aluminato está condicionada por el pH de la solución acuosa en la cual se forma, tal como se muestra en la figura.

FIGURA N° 2.4
ESPECIES DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN ACUOSA A DIFERENTES PH



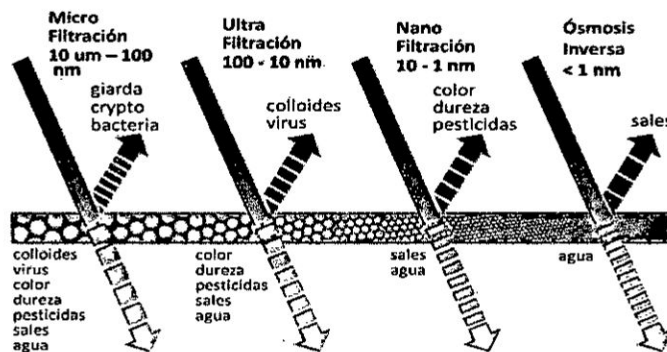
Fuente: Verdugo (2013)

En la figura 2.4 indica que la etringita se genera a un pH alto que permite la formación de la mayor cantidad del anión aluminato y que posibilite la presencia en el medio de una suficiente cantidad de iones hidroxilos OH^- que sean capaces de neutralizar los protones generados en la hidrólisis del hidróxidos de aluminio.

2.2.5. Filtración por membranas

La filtración a través de membranas bajo presión es un medio especialmente eficaz de eliminar sólidos e impurezas del agua. El agua purificada que pasa por una membrana es la fase permeada y la cantidad menor de material que no pasa por la membrana es la fase retenida. Las membranas normalmente operan por exclusión de tamaño. En la medida en que se usan membranas con aperturas menores, se excluyen partículas menores e incluso moléculas e iones, pero se requieren presiones superiores y se consume más energía.

FIGURA N° 2.5
ESPECTRO DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS



Fuente: www.google.com

TABLA N°2.1
PRINCIPALES PROCESOS DE MEMBRANAS USADOS PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUA.

Proceso	Presión, atm	Contaminantes removidos
Microfiltración	< 5	Sólidos suspendidos, componentes emulsionados, bacterias, protozoos.
Ultrafiltración	2 -8	Macromoléculas con masas molares entre 5,000 y 10,000 (en función del tamaño de poro)
Nanofiltración	5 – 15	Macromoléculas con masas molares entre 200 y 500 (en función del tamaño de poro).
Ósmosis inversa	15 - 100	La mayoría de los solutos e iones; el agua salobre requiere presiones de ósmosis inversa de hasta 15 bar; la desalinización del agua de mar requiere presiones de hasta 100 bar.

➤ **Ósmosis**

El fenómeno de la Ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio. Cuando se ponen en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Si estos fluidos están separados por una membrana permeable (la cual permite el paso de uno de los fluidos), el fluido

que se moverá a través de la membrana será el de menor concentración de tal forma que pasa al fluido de mayor concentración. (Binnie *et. al.* 2002)

Al cabo de un tiempo el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como Presión Osmótica.

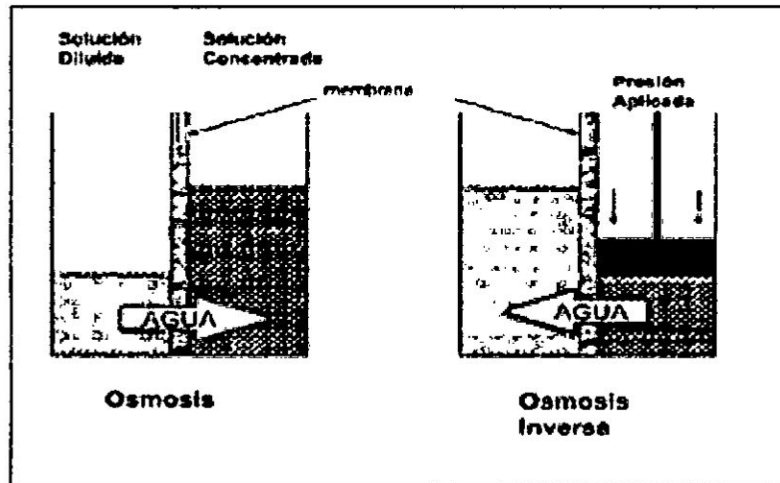
Osmosis Inversa

Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, se produce el efecto contrario. Los fluidos se presionan a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás.

Para poder purificar el agua necesitamos llevar a cabo el proceso contrario al de la ósmosis convencional, es lo que se conoce como Ósmosis Inversa. Se trata de un proceso con membranas. Para poder forzar el paso del agua que se encuentra en la corriente de salmuera a la corriente de agua con baja concentración de sal, es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica. Como consecuencia a este proceso, la salmuera se concentrará más que se descarga en forma de rechazo.

Por ejemplo, la presión de operación del agua de mar es de 60 bar.

FIGURA N° 2.6
OSMOSIS INVERSA

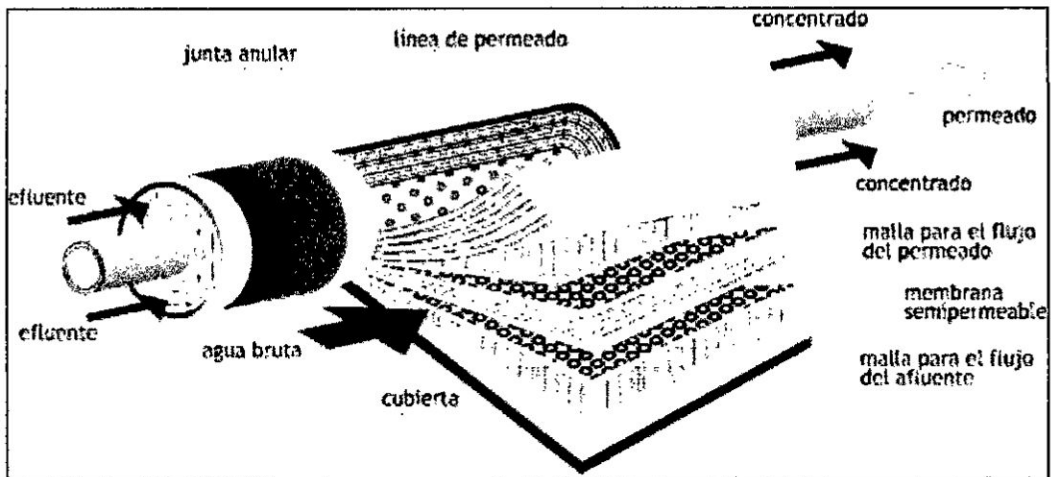


Fuente: <http://www.aquatecnia.com/osmosis-inversa/>

La Membrana de Ósmosis Inversa

Es una membrana que tiene un área "microporosa" que rechaza las impurezas y que no impide el paso del agua. La membrana rechaza las bacterias, pirógenos, y 85%-95% de sólidos inorgánicos. Los iones "polivalentes" son rechazados más fácilmente que los iones "monovalentes". Los sólidos orgánicos con un peso molecular superior a 300 son rechazados por la membrana, pero los gases pasan a través de ella. La ósmosis inversa es una tecnología de rechazo en porcentaje. La pureza del agua producida depende de la pureza del agua de alimentación. La pureza del agua producida por la ósmosis inversa es más grande que en el agua de alimentación.

FIGURA 2.7
MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA



Fuente: www.osmosisinversafiltroagua.com/la-membrana/

Un gran porcentaje (15-60%) del agua de alimentación no pasa por la membrana y es descargada en forma continua, drenando los iones inorgánicos y orgánicos. Esta línea de salida de las plantas de osmosis inversa se llama agua de rechazo.

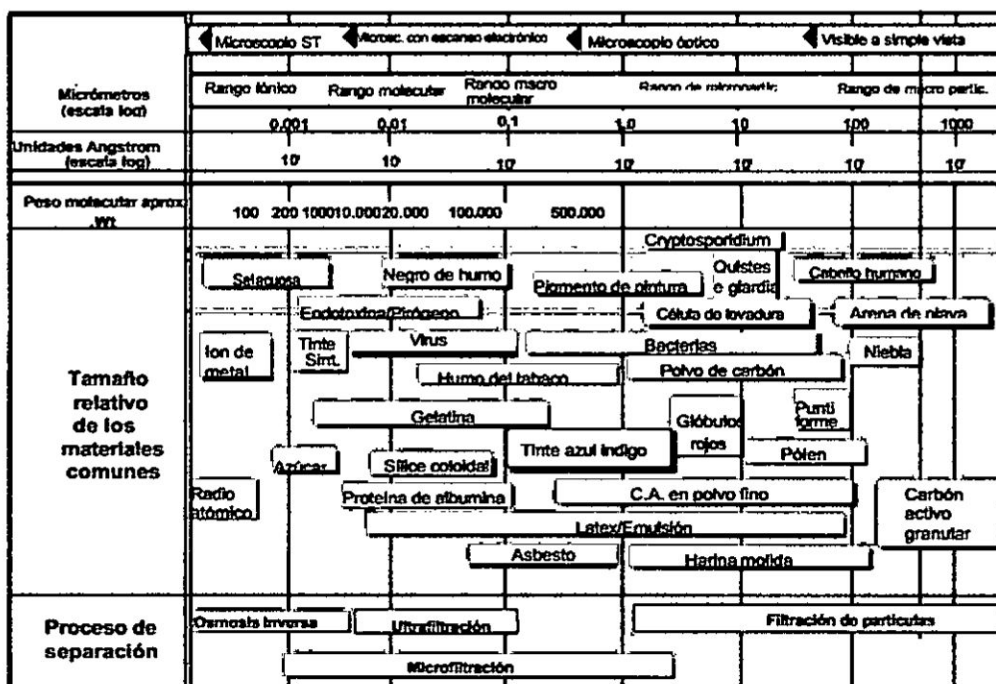
La Microfiltración por membranas

La filtración mediante membranas sigue el principio de la separación de partículas basada en el tamaño de los poros y en su distribución. Las membranas de microfiltración tienen tamaños de poro que varían de 0,075 micrones a 3 micrones. La microfiltración es un proceso de filtrado donde se opera con membranas semi-permeables de baja presión. El objetivo de este proceso es la eliminación de sólidos

en suspensión pero no retiene el paso de sales disueltas y macromoléculas. La microfiltración no altera las propiedades químicas de la solución

Las membranas empleadas en este proceso son de estructura simétrica y microporosa con tamaño de poro entre 0.1 μm a 10 μm . La diferencia de presión varía entre 0.1 y 2 atm. Esta operación unitaria es utilizada para la remoción de partículas, bacterias, coloides y las macromoléculas orgánicas de una solución acuosa en las plantas de tratamiento de aguas.

FIGURA N° 2.8
ESPECTRO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS



Fuente: procesosbio.wikispaces.com/Microfiltración

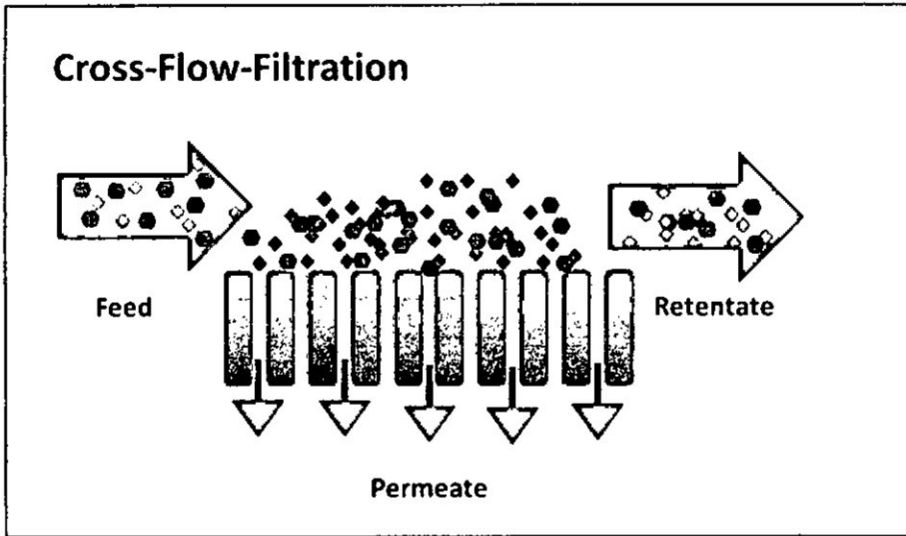
En este cuadro se da algunos ejemplos de los diferentes tamaños de las membranas y que materiales se pueden filtrar.

En la microfiltración se alcanzan grandes velocidades de fluido en flujo cruzado a través de la superficie del filtro mientras que la velocidad perpendicular a la superficie es relativamente pequeña. De esta manera se evita la formación de la torta filtrante y los problemas debido a la elevada resistencia de la torta. Este tipo de filtración es una alternativa debido que las levaduras y bacterias son mucho más difíciles de tratar por su pequeño tamaño. Por ejemplo Los micelios fúngicos se pueden filtrar relativamente bien por un proceso de filtración debido a que la torta filtrante tiene una porosidad superficial grande (Doran, 1998).

Una parte de la contaminación viral es atrapada en este proceso ya que, a pesar de que los virus son de menor tamaño que los poros de la membrana, éstos pueden acoplarse a las bacterias y por tanto ser eliminados.

La microfiltración puede ser aplicada a muchos tratamientos de agua cuando se necesita retirar de un líquido las partículas de un diámetro superior a 0.1 mm.

FIGURA N° 2.9
MICROFILTRACIÓN POR FLUJO CRUZADO



Fuente: <https://www.google.com.pe/search?q=flow+cross&rlz>

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Iones Sulfatos (SO_4^{2-})

El ion sulfato SO_4^{2-} , corresponde a sales de moderadamente solubles a muy solubles. Las aguas dulces contienen de 2 a 150 ppm, el agua del mar cerca de 3000 ppm. Aunque en agua pura se satura a unos 1500 ppm, como $\text{SO}_4^{2-} \text{Ca}$, la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

La determinación analítica por gravimetría con cloruro de bario es la más segura. Si se emplean métodos complexométricos hay que estar seguro de evitar las interferencias. No afecta especialmente al agua en cantidades moderadas. Algunos

centenares de ppm perjudican a resistencia del hormigón. Industrialmente es importante porque, en presencia de iones calcio, se combina para formar incrustaciones de sulfato cálcico.

Su eliminación se realiza por intercambio iónico.

Eliminación de Sulfatos en aguas de mina mediante precipitación en serie y nanofiltración

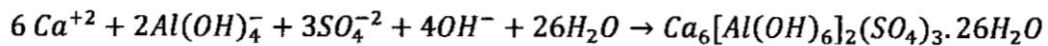
La compañía Veolia Water Technologies (2014) desarrolló una nueva solución tecnológica para la eliminación de los sulfatos de efluentes mineros, que combina la precipitación química y la nanofiltración, y está captando la atención en los cinco continentes. Un proyecto de demostración recientemente finalizado en América ha suscitado el interés de compañías mineras en búsqueda de soluciones avanzadas más rentables económicamente. Por ejemplo, en Europa, el empleo de la nanofiltración en minas de hierro lleva empleándose durante años y ha permitido aumentar el rendimiento, mejorar el mantenimiento y reducir costes respecto al diseño original. Y en África la capacidad de la tecnología para la reutilización de agua ha supuesto toda una revolución en países áridos o semiáridos. Las principales tecnologías de tratamiento de aguas de mina con sulfatos consideradas hasta ahora son la precipitación química, el tratamiento biológico, el intercambio iónico, los procesos de separación por membranas (nanofiltración u ósmosis inversa) y la evaporación-cristalización. De ellas la que presenta mayor interés con objeto de reciclar aguas es

la nanofiltración, pero la gestión de la corriente de rechazo es una dificultad a resolver de forma fiable y económica. El proceso para la eliminación de sulfatos, desarrollado por Veolia Water Technologies, permite dar respuesta a una normativa cada vez más restrictiva, que regula el contenido de sulfatos en el vertido de aguas superficiales, así como permite a las industrias la reutilización de agua para otros usos en la propia mina. El proceso ha conseguido reducir el contenido de sulfatos por debajo de 50 mg/L, obteniendo un efluente adecuado para su reutilización o vertido.

2.3.2. Descripción del Proceso

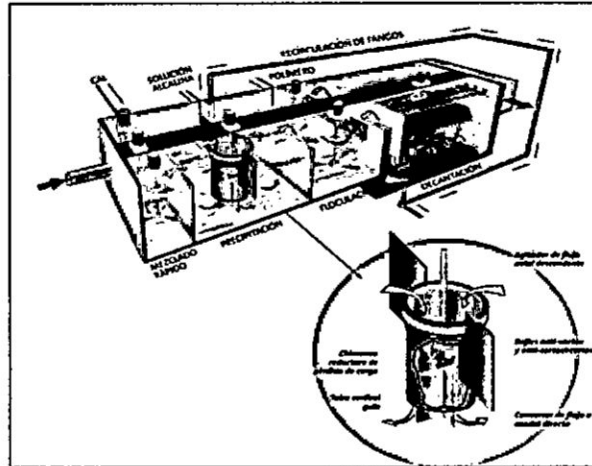
Entre las soluciones de tratamiento de aguas de mina con sulfatos el uso de membranas de nanofiltración (NF) genera un permeado de calidad y una solución con una corriente de rechazo de alta concentración de iones de sulfato. La adición subsiguiente de iones de calcio hace que la solución alcance la sobresaturación con respecto al sulfato de calcio, dando como resultado la precipitación de sulfato de calcio (yeso) y una reducción de la concentración a valores inferiores a 1500 mg/L-1800 mg/L. Con el objetivo de mejorar esta alternativa se ha desarrollado el proceso combinado con la finalidad de emplear la reacción de precipitación de sulfato de calcio en un primer paso y seguidamente generar en un segundo paso el precipitado de una sal combinada de calcio y aluminio con el sulfato (etringita, un sulfoaluminato de calcio hidratado), y obtener un sobrenadante con una concentración en sulfato inferior a 50 mg/L, susceptible de ser reutilizado. La formación del precipitado de etringita se hace reversible en un tercer proceso que permite recuperar tanto la sal de

aluminio como la solución saturada de sulfato de calcio que así puede reciclar en el primer paso.



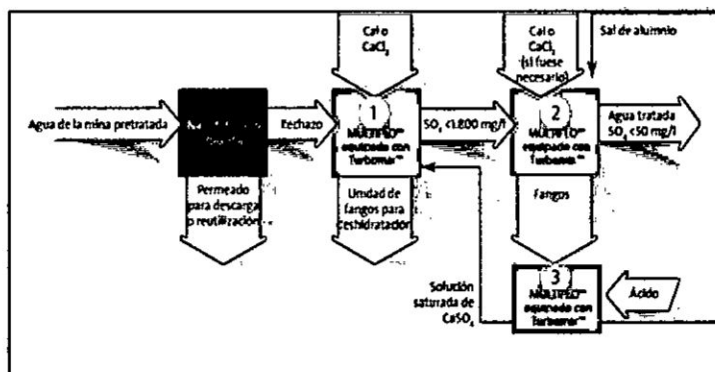
Desde el punto de vista de la tecnología, la primera etapa de este proceso se realiza mediante el sistema multiflo (Figura 2.10) que puede ser alimentado con el rechazo de la nanofiltración previa o bien directamente con las aguas a tratar. Este sistema va equipado con el reactor turbomix para conseguir reducir los sulfatos por debajo de 1.800-1.500 mg/L. A continuación el agua es tratada con una sal de calcio si es necesario y sal de aluminio en un segundo sistema multiflo. Esta segunda etapa permite precipitar los sulfatos como un mineral sulfoaluminato de calcio muy insoluble conocido como etringita, consiguiendo reducir los sulfatos disueltos por debajo de 50 mg/L. El fango en exceso de la segunda etapa es bombeado a un tercer sistema multiflo más compacto que sirve como tanque de regeneración de la sal de aluminio y del sulfato de calcio. Esta tercera etapa permite recuperar más del 95% de la sal de aluminio del fango para su reutilización en el proceso, siendo este punto clave para conseguir la reducción de costes de operación, ya que la reutilización del aluminio en el proceso en lugar de usar aluminio fresco reduce el coste de los reactivos químicos en seis veces respecto al esquema de tratamiento sin regeneración. La Figura 2.11 muestra el diagrama de flujo de todo el proceso combinado de eliminación de sulfatos con las tres etapas de tratamiento por precipitación y separación sólido-líquido.

FIGURA N° 2.10
PROCESO MULTIFLOW PARA LA PRECIPITACIÓN DE SULFATOS



Fuente: www.outotec.com

FIGURA N°2.11
FLUJO DEL PROCESO COMBINADO DE ELIMINACIÓN DE SULFATOS.



Fuente: www.outotec.com

2.3.3. Operación de sistemas de microfiltración

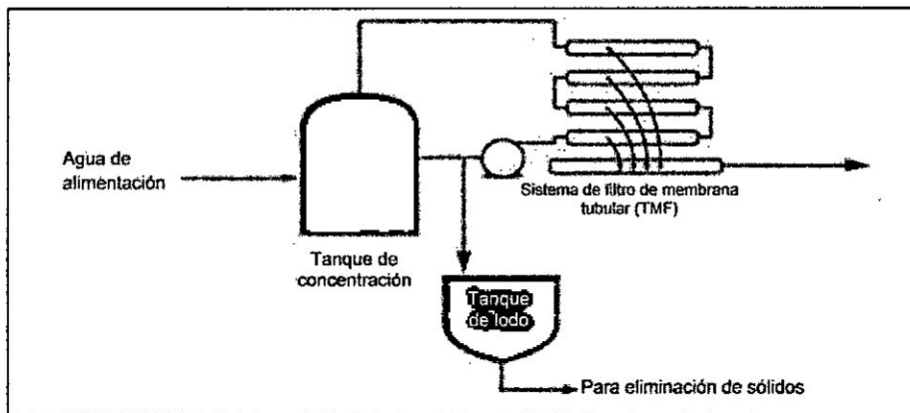
Las dos (2) tecnologías principales que se utilizan para la reducción de sólidos suspendidos son la aclaración y los medios de filtración. Los clarificadores requieren un alto nivel de control y supervisión para evitar el paso de grandes cantidades de sólidos debido a la alteración química y de la temperatura. Además, los polímeros orgánicos utilizados en los clarificadores (para desarrollar la floculación), también pueden causar problemas. Un exceso de estos polímeros ensuciaría los equipos de filtración de flujo de agua, como las membranas de ósmosis inversa (OI) o nanofiltros. Dado que estos polímeros son orgánicos, presentan una fuente de alimentación potencial para las bacterias que produce el crecimiento biológico y la contaminación biológica de las tuberías y el equipo de flujo de agua. Los sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración requieren protección contra las partículas y en muchos casos hay dispersiones de partículas en el rango de tamaño submicrónico o bajo que no se manejaron adecuadamente mediante filtración por bolsa, cartucho o multimedia.

En el caso de filtración por bolsa o cartucho, los cambios frecuentes pueden llegar a tener un costo exorbitante y requerir mucho trabajo al momento de tratar de reducir el índice de densidad de sedimentos (Silt Density Index, SDI) a un nivel adecuado. Si no se reduce el nivel del SDI, esto dará como resultado un rendimiento deficiente del sistema, taponamiento y suciedad de la membrana de OI, aumento de la frecuencia de limpieza y, por lo tanto, la reducción de la vida útil de los módulos de OI. Estas

situaciones se traducen en mayores costos operativos. En la mayoría de los casos en que se producen estas difíciles condiciones de prefiltración, el problema se puede tratar con un sistema de microfiltración utilizando los módulos de filtro de membrana tubular (TMF) de Porex.

FIGURA 2.12

SISTEMA DE REDUCCIÓN DE SÓLIDOS EN FILTRO DE MEMBRANA TUBULAR



Fuente: Porex

Los sistemas de TMF de Porex son muy similares a los sistemas de ósmosis inversa, donde una bomba de refuerzo, las tuberías, las válvulas y los elementos de TMF están montados en un marco de acero. El diagrama anterior proporciona un ejemplo típico de un sistema de TMF y el flujo de proceso.

Por lo general, entre el 75 y 95% del agua fluye mientras es permeado y se envía al sistema de OI o nanofiltro. El concentrado se recicla corriente arriba del módulo de TMF, en el tanque de concentración, para volver a diluirlo. La concentración de sólidos se mantiene de 3 a 5% con sólidos en exceso enviados a un filtro prensa para su desaguado o su desecho. El número de módulos de filtro de membrana tubular requerido depende del requerimiento de caudal de flujo total del sistema. Los módulos suelen disponerse en una serie o en un tren de hasta 12 módulos; los sistemas suelen diseñarse de modo de permitir que al menos un tren pueda retirarse de la línea en forma independiente para realizarle una limpieza de mantenimiento de rutina. Para dar apoyo al diseño del sistema, puede usarse un sistema de prueba piloto a fin de determinar la capacidad e identificar cualquier problema, como coloides, que pueden requerir mayor limpieza de módulo.

2.4. Definición de términos

Osmosis inversa: Tecnología de purificación del agua que utiliza una membrana semipermeable para eliminar iones, moléculas, bacterias y partículas presentes en el agua que se desea potabilizar.

Permeado (producto de osmosis inversa): Agua permeada a través de la membrana la cual es baja en sales y microorganismos.

Rechazo (concentrado de osmosis inversa): Agua de arrastre a la salida del sistema, que contiene alto contenido de sales y microorganismos que han sido separadas por las membranas.

Precipitación química: Proceso que consiste en la adición de reactivos a cierta disolución con la finalidad de lograr que ciertos contaminantes solubles se transformen en formas insolubles o de una menor solubilidad. La eliminación de la disolución será tanto más completa (cuantitativa) cuanto más insoluble sea el compuesto formado.

Potencial de Hidrogeno (pH): Tiene importancia en el control de los procesos de precipitación de sales en el tratamiento de agua y aguas residuales

Etringita: es un sulfoaluminato de calcio hidratado que se forma durante las primeras etapas de hidratación del cemento Portland a partir de la reacción de la fase aluminato del clinker ((CaO)₃Al₂O₃) con el yeso (CaSO₄·2H₂O) empleado para retardar el fraguado.

Microfiltración: Tipo de filtración que utiliza membranas especiales con poros microscópicos que varían en tamaño desde unos 0,1 micrómetros a unos 10 micrómetros. El tamaño de los poros es lo que le da su nombre de microfiltración. Se utiliza para eliminar todas las partículas que son mayores de aproximadamente 1 micrómetro de una solución.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Variables de la investigación

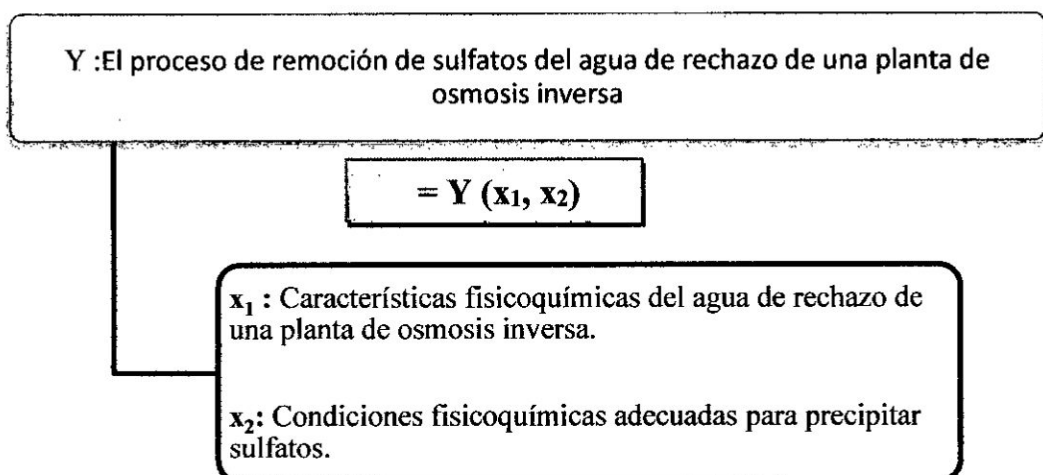
3.1.1. Variable independiente

X1: Características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.

X2: Condiciones fisicoquímicas adecuadas para precipitar sulfatos.

3.1.2. Variable dependiente

Y : El proceso de remoción de sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.



a. Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODO
Y: El proceso de remoción de sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.	Ensayo fisicoquímico	Y1: Porcentaje de remoción de sulfatos.	Experimental
x ₁ : características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.	Ensayos fisicoquímicos	* pH * Contenido de iones presentes en el agua * Concentración de Sulfatos	Lectura directa Análisis de Laboratorio Análisis de Laboratorio
x ₂ : Condiciones fisicoquímicas adecuadas para precipitar sulfatos.	Ensayos fisicoquímicos	*Hidróxido de calcio (g/L) *Hidróxido de Aluminio(g/L) *Tiempo de acondicionamiento *Velocidad de rotación	Lectura directa Lectura directa Lectura directa Lectura Directa

b. Hipótesis General e Hipótesis específicas

Hipótesis General

Estableciendo las condiciones fisicoquímicas favorables para la precipitación química y microfiltración, entonces se podrá remover entre 30% y 40% de remoción de sulfatos presentes en el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.

Hipótesis específicas

- **Hipótesis específica N°1**

Las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa superan los Valores Máximos Admisibles D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

- **Hipótesis específica N°2**

Condiciones fisicoquímicas adecuadas para remover los iones sulfatos del agua de rechazo de una planta de ósmosis inversa son 20 g/L de cal, 5.0 g/L Hidróxido de aluminio, 900 RPM agitación continua y un tiempo de reacción de 80 minutos.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación

La investigación desarrollada es de tipo experimental y aplicada porque se estudió el efecto que pueda tener los parámetros que influyen en la remoción de sulfatos de agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.

4.2. Diseño de la investigación

Se desarrolló la tecnología seleccionada para la remoción de iones sulfatos presentes en el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa mediante precipitación química en forma experimental para la obtención de los datos y variables de diseño del reactor.

Las variables cuantitativas de importancia que se controlan son: cantidad de cal (g), cantidad de hidróxido de aluminio (g), tiempo de rotación (min) y velocidad de rotación (rpm) y como variable independiente el porcentaje de remoción de sulfatos del rechazo de una planta de osmosis inversa.

Los experimentos se realizaron a nivel de laboratorio para determinar los efectos de las variables mencionadas sobre el porcentaje de remoción de sulfatos. Mediante un modelo de ajuste nos permitirá maximizar el porcentaje de remoción de sulfatos de una planta de osmosis inversa.

VARIABLES

- **VARIABLES A CONTROLAR**

VARIABLES CONTROLABLES	NIVELES DE ESTUDIO
X ₁ : Cantidad de Hidróxido de Calcio (g)	15 y 30
X ₂ : Cantidad de hidróxido de Aluminio (g)	4.5 y 6.0
X ₃ : Velocidad de agitación (rpm)	800 y 1000
X ₄ : Tiempo de agitación (min)	60 y 90

- **VARIABLE DEPENDIENTE**

VARIABLE DEPENDIENTE	Porcentaje de remoción de sulfatos de una planta de osmosis inversa.
-----------------------------	-----------------------------------------------------------------------------

4.3. Población y muestra

La Población: Agua de rechazo de plantas de ósmosis inversa en el Perú.

La muestra: El tamaño de muestra será el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa con alto contenido de sulfatos.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Estructurada y sistemática: para la recopilación de los datos sobre los hechos abordados como objeto de la investigación se empleará los análisis fisicoquímicos y los cálculos matemáticos a las muestras evaluadas.

4.4.1. Método de análisis

A. Análisis fisicoquímico

- pH, se usó un potenciómetro digital (HANNA), previa calibración.
- Sólidos Disueltos Totales,
- Cantidad de sulfatos en el agua, espectrometría de absorción atómica electrotérmica.

B. Análisis de cálculos matemáticos

Para la determinación de los iones sulfatos se usaron los cálculos matemáticos siguientes:

Cantidad de iones sulfatos,

$$\text{Iones Sulfatos (mg/L)} = \frac{m_{\text{sólido}} \times \frac{PM_{SO_4}}{PM_{BaSO_4}}}{100 \text{ mL}}$$

Porcentaje de remoción de sulfatos,

$$\% \text{ Remoción} = \frac{\text{mg/L } SO_4(\text{inicio}) - \text{mg/L } SO_4(\text{final})}{\text{ppm } SO_4(\text{inicio})}$$

Donde:

PM_{SO_4} (g/mol): Peso molecular del ión sulfato.

PM_{BaSO_4} (g/mol): Peso molecular del sulfato de bario.

4.4.2. Metodología experimental

A. Bases de diseño

Para esta parte del proceso usaremos el diseño factorial de dos niveles 2^n que nos permita obtener el máximo de su información con el mínimo de corridas experimentales, donde 2^n nos indica el número de experiencias que deben efectuarse para distintos valores de las n variables, si cada variable es continua, los dos niveles son el superior (+) y el inferior (-).

Las variables cuantitativas de importancia que se controlan son:

X_1 : Cantidad de hidróxido de Calcio (g) [15 y 30]

X_2 : Cantidad de hidróxido de Aluminio (g) [4.5 y 6]

X_3 : Velocidad de Rotación (rpm) [800 y 1000]

X_4 : Tiempo de agitación (min) [60 y 90]

Con $2^4 = 16$ experiencias

CUADRO N° 4.1
CANTIDAD DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

N° Experiencias	Variables				Niveles			
	A	B	C	D	Niveles			
1	15	4.5	800	60	-	-	-	-
2	15	4.5	800	90	-	-	-	+
3	15	4.5	1000	60	-	-	+	-
4	15	4.5	1000	90	-	-	+	+
5	15	6.0	800	60	-	+	-	-
6	15	6.0	800	90	-	+	-	+
7	15	6.0	1000	60	-	+	+	-
8	15	6.0	1000	90	-	+	+	+
9	30	4.5	800	60	+	-	-	-
10	30	4.5	800	90	+	-	-	+
11	30	4.5	1000	60	+	-	+	-

12	30	4.5	1000	90	+	-	+	+
13	30	6.0	800	60	+	+	-	-
14	30	6.0	800	90	+	+	-	+
15	30	6.0	1000	60	+	+	+	-
16	30	6.0	1000	90	+	+	-	+

B. Diseño del equipo de laboratorio

Después de realizar la micro-filtración, tomamos como alícuota 100mL para proceder con la determinación de sulfatos presentes en el filtrado.

La determinación de sulfatos se realizó por triplicado: $100\text{mL} \times 3 = 300\text{mL}$

Por confiabilidad hemos realizado la toma con un excedente de 200mL,

$$300\text{mL} + 200\text{mL} = 500\text{mL}$$

Determinamos el volumen del reactor,

$$500\text{mL} \times 2 = 1000\text{mL}$$

$$\text{Volumen del Reactor} = 1000\text{mL}$$

FIGURA N° 4.1
REACTOR PARA REMOCIÓN DE SULFATOS



4.5. Procedimiento de recolección de datos

Para la recopilación de datos sobre los hechos abordados como objeto de investigación se empleó los análisis fisicoquímicos y los cálculos matemáticos a las muestras evaluadas.

Para la recolección de datos se tomó muestras por triplicado de 100mL aproximadamente de cada tratamiento para los análisis fisicoquímicos y cálculos matemáticos correspondientes.

4.5.1. Materiales y métodos

A. Lugar de ejecución

La presente investigación se ejecutó en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

B. Materia prima

Se tomó el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa de Paracas, distrito de Pisco – departamento de Ica.

C. Equipos y materiales

Se utilizaron lo siguiente:

Equipos	Cantidad
Balanza Analítica BOECO, rango de medición 0 – 230 g, sensibilidad 0.1 mg	1
Mufla, LABTECH	1
Mechero	1
Baño Maria	1
Potenciómetro digital, HANNA	1
Tanque reactor	1
Cronometro	1

Materiales	Cantidad
Bagueta	4
Vasos precipitados 500 mL,	6
Vasos precipitados 250 mL	2
Papel Filtro, und	100
Embudo	2
Probeta 100 MI	2
Soporte Universal	2
Piceta	1
Balon	1

D. Cantidad de insumos y reactivos

INSUMOS Y REACTIVOS	CANTIDAD
Hidróxido de Calcio	360 g
Hidróxido de Aluminio	24 g
	1000 mL

4.5.2. Procedimiento experimental

A. Determinación de iones sulfatos en el agua de rechazo de una osmosis inversa.

Para una muestra de 100mL se adicionó 20mL de sulfato de bario, luego se realizó la digestión del precipitado por 30min en baño maría a temperatura de 100 °C. Después se procedió a filtrar en papel whatman 0.45 micrones y lavados con agua destilada para eliminar los cloruros. Luego se calcinó la muestra a 550 °C pero previamente se calcinó en un mechero de bunsen.

FIGURA N° 4.2
ANALISIS PARA DETERMINACIÓN DE SULFATOS



Se determinó el porcentaje de remoción de iones sulfatos de la muestra a tratar:

$$m_{\text{crisol}} = 41.3775$$

$$m_{\text{crisol+sólido}} = 41.6191$$

$$m_{\text{sólido}} = 0.2416$$

$$\text{Iones Sulfatos} = \frac{m_{\text{solido}} \times \frac{PM_{SO_4}}{PM_{BaSO_4}}}{100 \text{ mL}}$$

$$\text{Iones Sulfatos} = \frac{0.2416 \times \frac{92}{152}}{100 \text{ mL}}$$

$$\text{Iones Sulfatos} = 1,526 \text{ ppm}$$

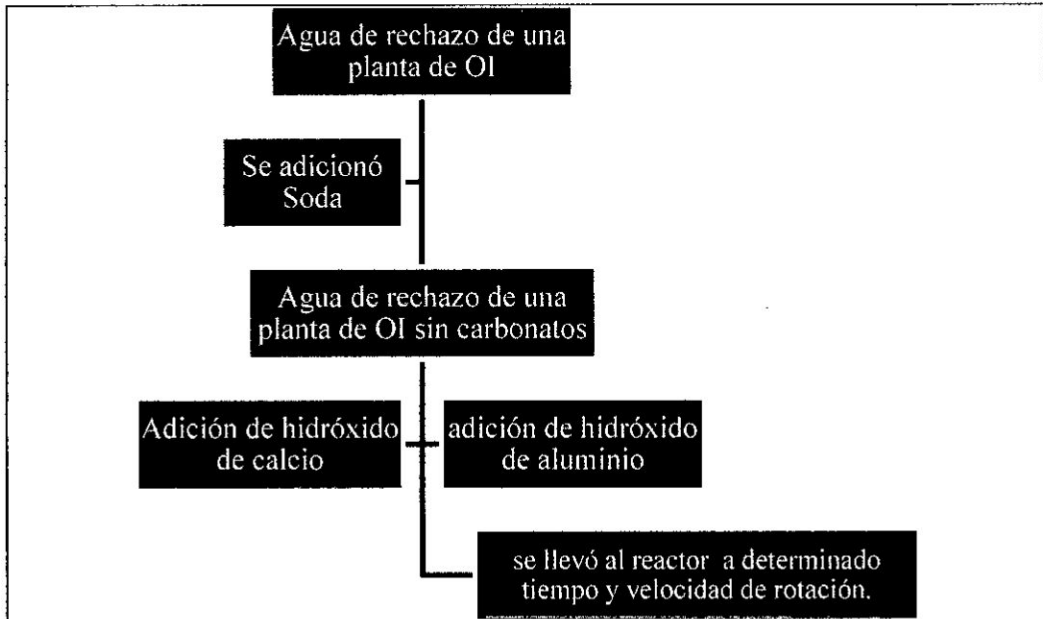
B. Operación para el proceso de remoción de sulfatos

El procedimiento experimental utilizado para la remoción de sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa se presenta en el gráfico N° 4.2

Las operaciones realizadas se describen a continuación:

- Para materia prima se utilizó el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa de Paracas, distrito de Pisco – departamento de Ica.

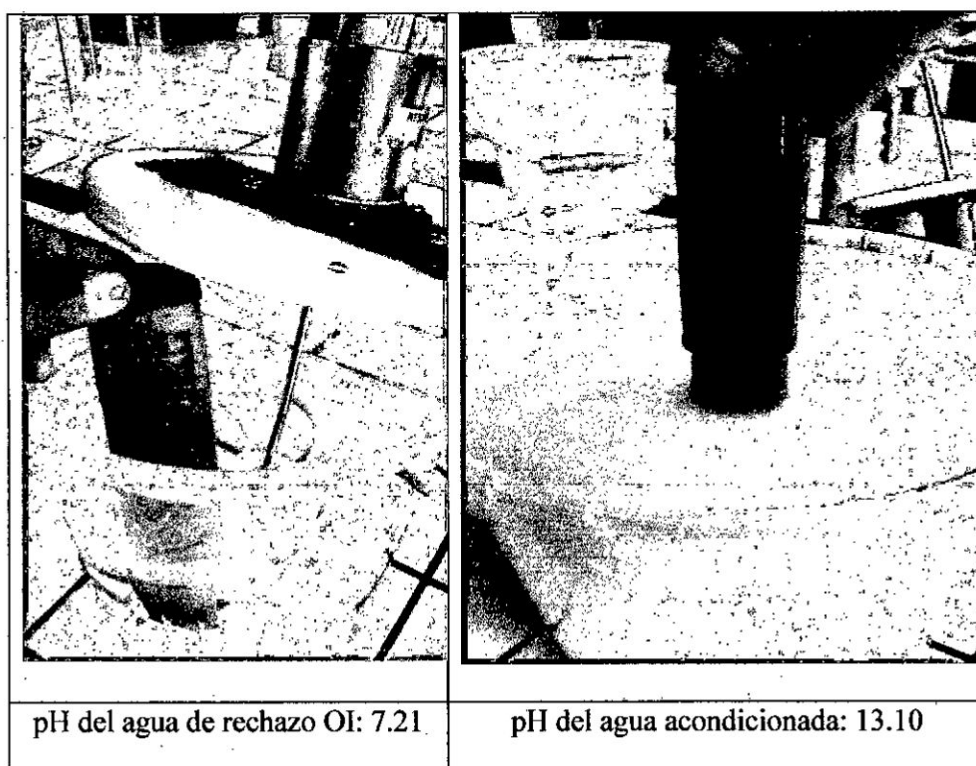
GRÁFICO N° 4.1
PROCEDIMIENTO PARA REMOCIÓN DE SULFATOS



- **Acondicionamiento del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa**

El agua de rechazo de una planta de osmosis inversa fue acondicionada a pH 13 usando NaOH con el fin de reducir la alcalinidad del agua a tratar.

FIGURA N° 4.3
ACONDICIONAMIENTO DEL AGUA DE RECHAZO



La reducción de alcalinidad se logra en un pH entre 11 – 13, por lo que optamos llevar el pH a 13 para reducir alcalinidad remanente en el agua.

C. Procedimiento para la obtención de datos experimentales

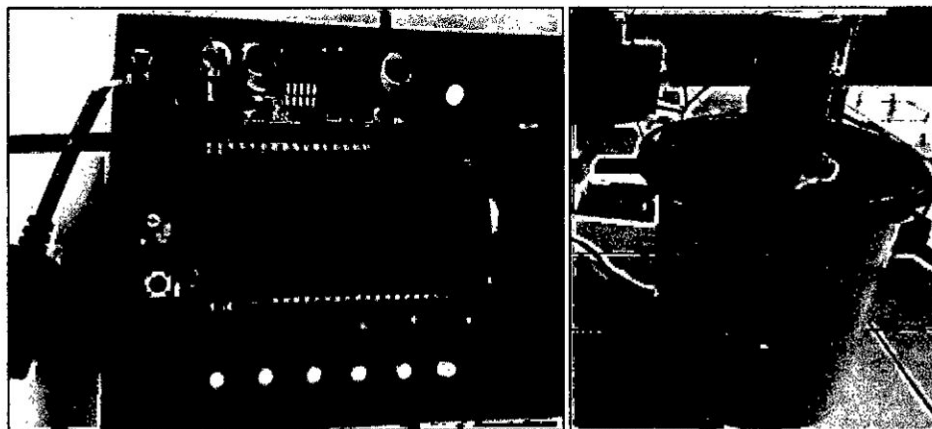
Estos procedimientos fueron realizados para cada una de las pruebas experimentales.

a) Obtención del producto final

Las pruebas experimentales se realizaron con 1000mL de agua de rechazo de la planta de osmosis inversa previamente acondicionada en el reactor con su respectivo sistema de agitación y sistema de control.

Se dosificó hidróxido de calcio al tanque reactor, se ajustó la velocidad de rotación y el tiempo de rotación. Con el objetivo de formar la mayor cantidad de sulfato de calcio, hemos dado la mitad de del tiempo total, después hemos dosificado hidróxido de aluminio para obtener la etringita, las condiciones de operación fueron los mismos.

FIGURA N° 4.4
PRUEBAS EXPERIMENTALES



Culminado el tiempo se apaga el sistema de control de velocidad de rotación se procede a la microfiltración con papel whatman 0.45 micrones.

Estas pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo distintas condiciones de operación.

FIGURA N° 4.5
MICROFILTRACIÓN 0.45 MICRONES



b) Análisis fisicoquímico del producto final

La cantidad de sulfatos luego de cada procedimiento de remoción de sulfatos realizada en el laboratorio de investigación de la Universidad del Callao se analizó en un laboratorio externo, obteniendo el resultado siguiente:

FIGURA N° 4.6
MUESTRAS DE AGUAS TRATADA A DISTINTAS CONDICIONES
DE OPERACIÓN



CUADRO N° 4.2
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

N° Muestra	Cantidad Sulfatos SO_4^{2-} (mg/L)
1	1115.4
2	1057.65
3	1091.5
4	1067.95
5	1101.25

6	986.55
7	993.15
8	1015.25
9	1204.85
10	1326
11	1154.6
12	1189.3
13	1033.25
14	1227.45
15	1079.85
16	1069.55

Para calcular el % de remoción de sulfatos se realizó en un laboratorio externo.

$$\% \text{ Remoción} = \frac{\text{ppm } SO_4(\text{inicio}) - \text{ppm } SO_4(\text{final})}{\text{ppm } SO_4(\text{inicio})}$$

CUADRO N° 4.3
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

N° Experiencias	Variables				Vector respuesta
	A	B	C	D	% Remoción
1	15	4.5	800	60	26.9
2	15	4.5	800	90	30.7
3	15	4.5	1000	60	28.5
4	15	4.5	1000	90	30.0
5	15	6.0	800	60	27.8
6	15	6.0	800	90	35.4
7	15	6.0	1000	60	34.9
8	15	6.0	1000	90	33.5
9	30	4.5	800	60	21.0
10	30	4.5	800	90	13.1

11	30	4.5	1000	60	24.3
12	30	4.5	1000	90	22.1
13	30	6.0	800	60	32.3
14	30	6.0	800	90	19.6
15	30	6.0	1000	60	29.2
16	30	6.0	1000	90	29.9

4.6. Procedimiento estadístico y análisis de datos

Para la evaluación del efecto de la cantidad de hidróxido de calcio, cantidad de hidróxido de aluminio, tiempo de rotación velocidad de rotación, se aplicó el método del principio de Pareto.

Los análisis estadísticos correspondientes al método del principio de Pareto se realizaron utilizando el programa Estadístico Minitab 17.1.0

V. RESULTADOS

5.1. Características Físico-Químicas del agua de rechazo de Planta de Osmosis Inversa

En el cuadro N° 5.1 se presenta los resultados de las características físico-químicas del agua de rechazo de Planta de Osmosis Inversa.

CUADRO N° 5.1
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL AGUA DE RECHAZO

COMPONENTES	CONCENTRACIÓN
Potencial de Hidrógeno (pH)	8.3
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	11,874.69
Conductividad (μ S/cm)	17,305.61
Bicarbonatos (mg/L)	152.40
Carbonatos (mg/L)	1.94
Cloruro (mg/L)	5,808.37
Fluoruro (mg/L)	0.16
Nitrato (mg/L)	40.34
Sulfato (mg/L)	1,527.17
Sílice (mg/L)	20.29
Aluminio Total (mg/L)	0.103
Antimonio (mg/L)	< 0.0008
Arsénico Total (mg/L)	0.017
Bario Total (mg/L)	0.06
Berilio Total (mg/L)	< 0.0001

Bismuto (mg/L)	< 0.00005
Boro (mg/L)	0.68
Cadmio Total (mg/L)	0.0012
Calcio Total (mg/L)	845.93
Estroncio Total (mg/L)	10.99
Hierro Total (mg/L)	0.19
Magnesio Total (mg/L)	172.79
Manganeso Total (mg/L)	0.0387
Potasio Total (mg/L)	54.59
Sodio Total (mg/L)	3,238.64

5.2. Resultados Experimentales

Se presentan los resultados obtenidos experimentalmente en la remoción de sulfatos presentes en el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa en el cuadrado N°5.2

CUADRO N° 5.2
RESULTADOS DE REMOCIÓN DE SULFATOS EN EL AGUA DE
RECHAZO

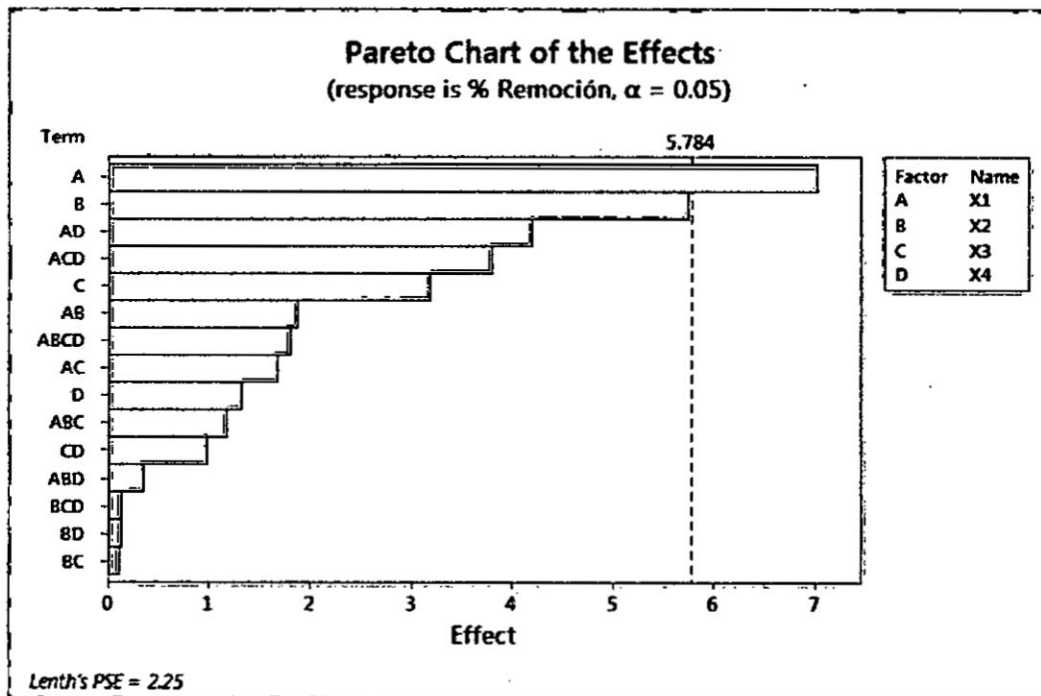
Punto Experimental	X₁ Dosificación Ca(OH)₂ (g/L)	X₂ Dosificación Al(OH)₃ (g/L)	X₃ Velocidad de agitación (rpm)	X₄ Tiempo de agitación (min)	Remoción de Sulfatos (%)
1	15(-1)	4,5(-1)	800(-1)	60(-1)	26,9
2	15(-1)	4,5(-1)	800(-1)	90(1)	30,7
3	15(-1)	4,5(-1)	1000(1)	60(-1)	28,5
4	15(-1)	4,5(-1)	1000(1)	90(1)	30,0
5	15(-1)	6,0(1)	800(-1)	60(-1)	27,8
6	15(-1)	6,0(1)	800(-1)	90(1)	35,4
7	15(-1)	6,0(1)	1000(1)	60(-1)	34,9
8	15(-1)	6,0(1)	1000(1)	90(1)	33,5
9	30(1)	4,5(-1)	800(-1)	60(-1)	21,0
10	30(1)	4,5(-1)	800(-1)	90(1)	13,1
11	30(1)	4,5(-1)	1000(1)	60(-1)	24,3
12	30(1)	4,5(-1)	1000(1)	90(1)	22,1
13	30(1)	6,0(1)	800(-1)	60(-1)	32,3
14	30(1)	6,0(1)	800(-1)	90(1)	19,6

15	30(1)	6,0(1)	1000(1)	60(-)	29,2
16	30(1)	6,0(1)	1000(1)	90(1)	29,9

5.3. Estimación del modelo matemático y análisis de las curvas de contorno

Haciendo un análisis preliminar, para los datos experimentales obtenidos, en el diagrama de Pareto de los efectos, figura N°5.1.

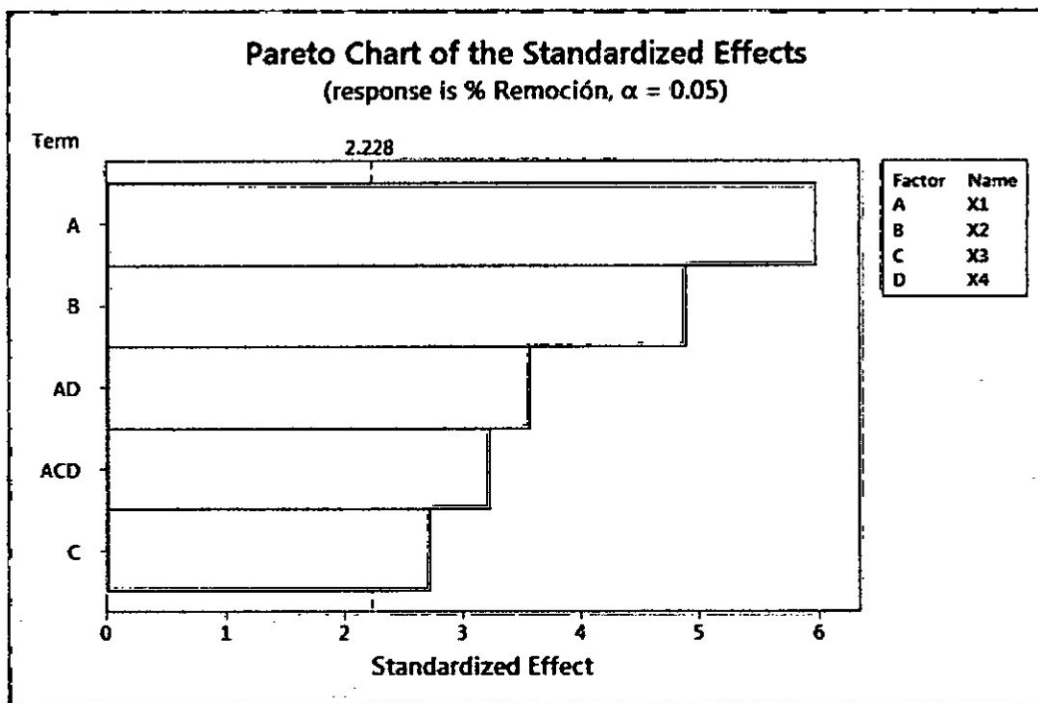
FIGURA N° 5.1
DIAGRAMA DE PARETO DE LOS EFECTOS



Se puede observar que tienen mayor efecto en explicar el comportamiento de remoción de sulfatos los factores principales A y B en mayor proporción y C en menor proporción. En cuanto a las interacciones de factores, los de regular importancia son AD y ACD.

Volviendo a ejecutar el análisis y considerando solamente los términos previamente descritos obtenemos El diagrama de Pareto de efectos estandarizados, figura N°5.2.

FIGURA N° 5.2
DIAGRAMA DE PARETO DE LOS EFECTOS ESTANDARIZADOS



Se puede inferir del diagrama que todos los parámetros considerados para el modelo son importantes debido que superan la línea recta a trazos de color rojo.

En la figura N°5.3 se presenta la prueba de significancia de los coeficientes de la regresión factorial para la remoción de sulfatos considerando los valores obtenidos experimentalmente y los términos de importancia.

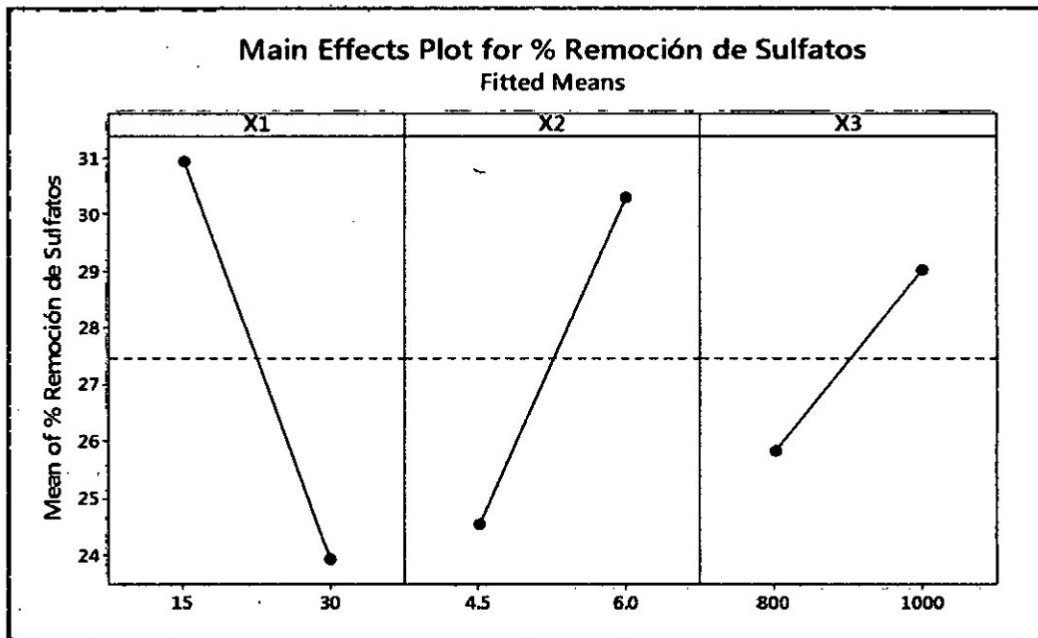
FIGURA N° 5.3
PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DE LOS COEFICIENTES DE LA
ECUACIÓN DE REGRESIÓN FACTORIAL PARA LA REMOCIÓN DE
SULFATOS

Factorial Regression: % Remoción de Sulfatos versus X1, X2, X3, X4						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	5	498.93	99.786	18.06	0.000	
Linear	3	370.61	123.538	22.36	0.000	
X1	1	197.40	197.403	35.73	0.000	
X2	1	132.25	132.250	23.94	0.001	
X3	1	40.96	40.960	7.41	0.021	
2-Way Interactions	1	70.56	70.560	12.77	0.005	
X1*X4	1	70.56	70.560	12.77	0.005	
3-Way Interactions	1	57.76	57.760	10.45	0.009	
X1*X3*X4	1	57.76	57.760	10.45	0.009	
Error	10	55.25	5.525			
Total	15	554.18				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
2.35048	90.03%	85.05%	74.48%			
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		27.450	0.588	46.71	0.000	
X1	-7.025	-3.512	0.588	-5.98	0.000	1.00
X2	5.750	2.875	0.588	4.89	0.001	1.00
X3	3.200	1.600	0.588	2.72	0.021	1.00
X1*X4	-4.200	-2.100	0.588	-3.57	0.005	1.00
X1*X3*X4	3.800	1.900	0.588	3.23	0.009	1.00
Regression Equation in Coded Units						
$\% \text{ Remoción de Sulfatos} = 27.450 - 3.512 X1 + 2.875 X2 + 1.600 X3 - 2.100 X1*X4 + 1.900 X1*X3*X4$						

Todos los términos considerados en el modelo son significativos por presentar valores de probabilidad (p-Value) menores al nivel de significancia escogido ($\alpha=0,05$), es decir los términos importantes para el modelo $p\text{-Value} < 0,05$, además los valores FIV presentan valores igual a la unidad y el R^2 un valor de 85%, es decir que el modelo describe un 85 % del fenómeno de remoción de sulfatos.

En la figura N°5.4 se muestra el comportamiento de los efectos principales para la remoción de sulfatos.

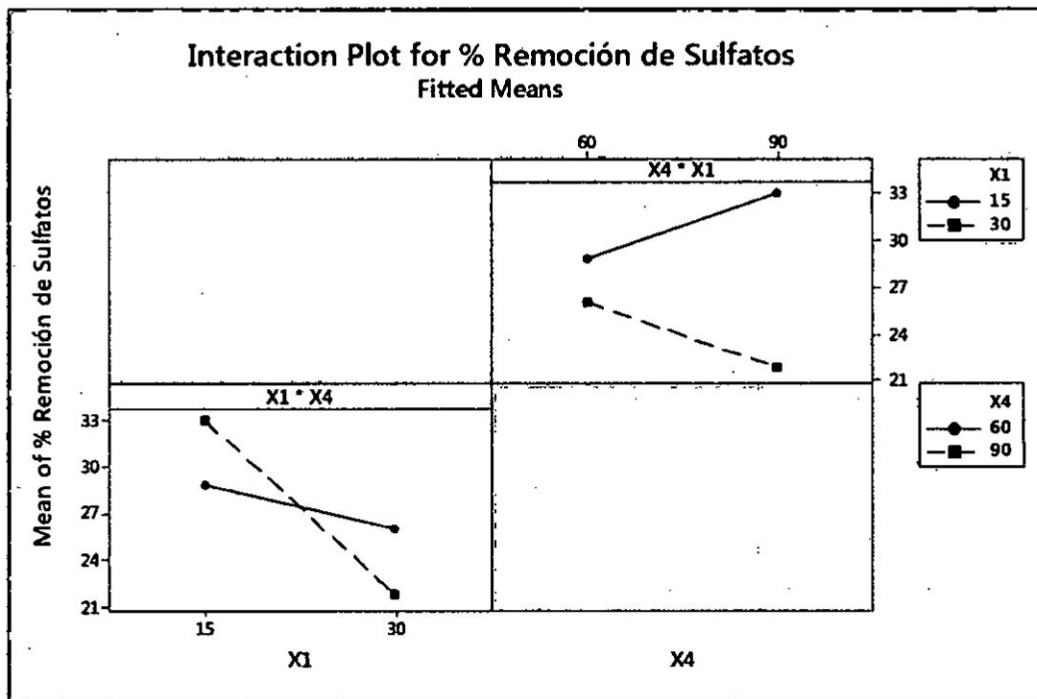
FIGURA N° 5.4
EFFECTOS PRINCIPALES PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS



En la gráfica de efectos principales se observa que para conseguir una mayor remoción de sulfatos se debe considerar trabajar: Dosificación de Hidróxido de Calcio a nivel bajo, dosificación de Hidróxido a nivel alto y velocidad de agitación a nivel alto.

En la figura N°5.5 se muestra el comportamiento de la remoción de sulfatos a causa de interacción de las variables importantes.

FIGURA N° 5.5
EFFECTOS DE LA INTERRACIÓN DE VARIABLES PARA REMOCIÓN DE
SULFATOS



En la gráfica de interacción de variables se observa que para conseguir una mayor remoción de sulfatos se debe considerar trabajar con una dosificación de Hidróxido de Calcio de 15 g/L y un tiempo de agitación de 90 minutos.

En la figura N°5.6 se muestra las curvas de contorno, donde se muestra la influencia de la dosificación de Hidróxido de Calcio, dosificación de Hidróxido de Aluminio, Velocidad de agitación y el tiempo de agitación.

En la curva de contorno $X_2 \cdot X_1$ se puede apreciar que a una velocidad de agitación de 900 RPM y un tiempo de agitación de 75 minutos, la remoción de sulfatos se incrementará a medida que la dosificación de Hidróxido de Aluminio aumente y la dosificación de Hidróxido de Calcio disminuya.

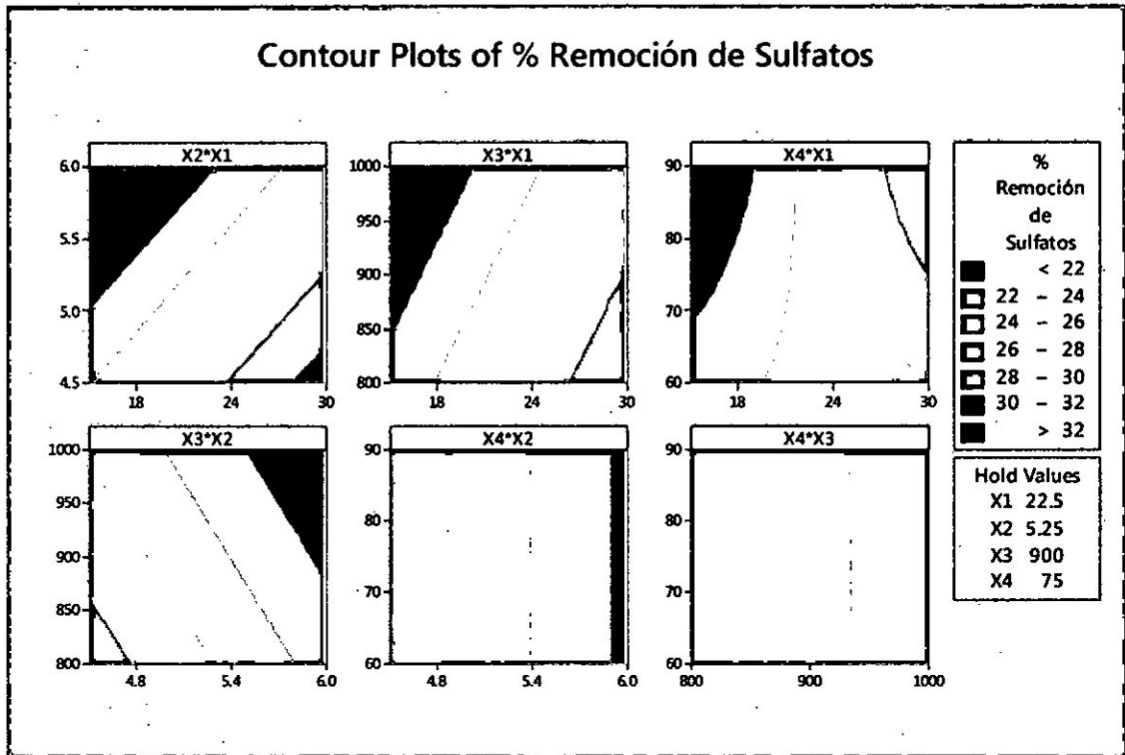
En la curva de contorno $X_3 \cdot X_1$ se puede apreciar que a una dosificación de Hidróxido de Aluminio de 5,25 g/L y un tiempo de agitación de 75 minutos, la remoción de sulfatos se incrementará a medida que la velocidad de agitación aumente y la dosificación de Hidróxido de Calcio disminuya.

En la curva de contorno $X_4 \cdot X_1$ se puede apreciar que a una dosificación de Hidróxido de Aluminio de 5,25 g/L y una velocidad de agitación de 900 rpm, la remoción de sulfatos se incrementará a medida que el tiempo de agitación aumente y la dosificación de Hidróxido de Calcio disminuya.

En la curva de contorno $X_3 \cdot X_2$ se puede apreciar que a una dosificación de Hidróxido de Calcio de 22,5 g/L y un tiempo de agitación de 75 minutos, la remoción de sulfatos se incrementará a medida que la velocidad de agitación y la dosificación de Hidróxido de Aluminio aumenten.

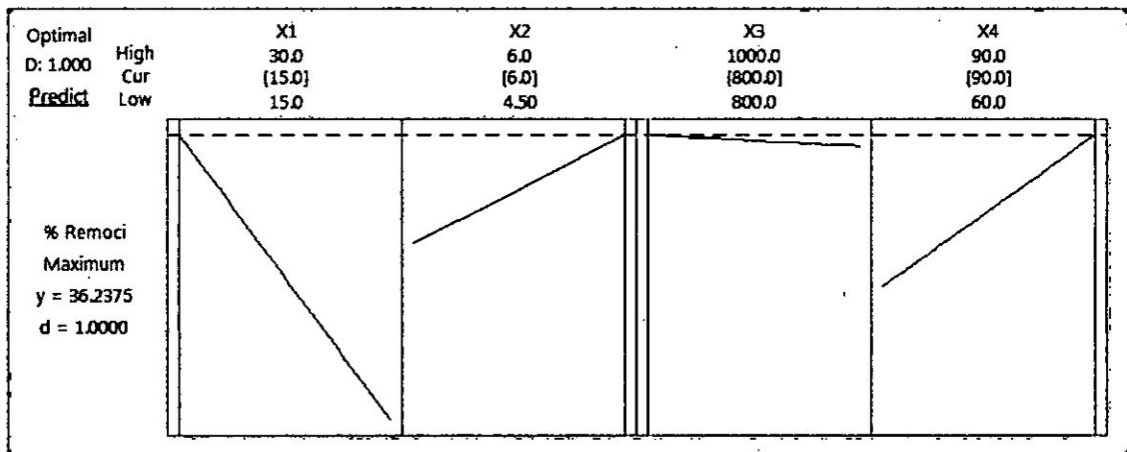
En la curva de contorno $X_4 \cdot X_2$ se puede apreciar que a una dosificación de Hidróxido de Calcio de 22,5 g/L y una velocidad de agitación de 900 rpm, la remoción de sulfatos se incrementará a medida que el tiempo de agitación y la dosificación de Hidróxido de Aluminio aumenten.

FIGURA N° 5.6
CURVAS DE CONTORNO PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS



En la figura N°5.7 se muestra la gráfica final del optimizador, mostrando que se puede lograr hasta un 36% de remoción de sulfatos cuando el sistema está bajo las siguientes condiciones: Dosificación de Hidróxido de Calcio a nivel bajo, dosificación de Aluminio a nivel alto, Velocidad de agitación a nivel bajo y el tiempo de agitación en el nivel alto.

FIGURA N° 5.7
OPTIMIZACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE SULFATOS



5.4. Parámetros óptimos

EL CUADRO N°5.3
PARÁMETROS ÓPTIMOS

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Remoción de
Dosificación	Dosificación	Velocidad de	Tiempo de	Sulfatos
Ca(OH) ₂	Al(OH) ₃	agitación	agitación	(%)
(g/L)	(g/L)	(rpm)	(min)	
15	6,0	800	90	35,4

Los parámetros óptimos encontrados en la presente investigación son los reportados en el cuadro N°5.3, con estos parámetros se ha logrado una remoción de 35.4% de sulfatos.

Estos valores se pueden contrastar con los estudios de Moreno, 2014, quien investigó la remoción de iones sulfato presente en el efluente generado por el rechazo de una planta de osmosis inversa. Los resultados reportaron un rango de remoción de 25%, 32% y 40% concentración de iones sulfatos.

La remoción de sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa, tiene limitaciones en su remoción debido a que existe interferencias como el alto contenido de dureza (Ca^{+2} , CO_3^{-2} y HCO_3^{-1}) y otros iones que fueron rechazados por la membranas, estos tienen un efecto directa sobre el proceso de remoción de sulfatos.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de hipótesis con los resultados

Hipótesis General

Estableciendo las condiciones fisicoquímicas favorables para la precipitación química y microfiltración; entonces se podrá remover de 30% a 40% de sulfatos presentes en el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.

- Los parámetros óptimos hallados en la presente investigación son 15 g/L de hidróxido de calcio, 6 g/L de hidróxido de aluminio, 800 RPM de agitación y con tiempo de reacción de 90 minutos, y se obtuvo una remoción de sulfatos de 35.4%, el valor está dentro de lo planteado en la hipótesis. Por lo tanto se acepta la Hipótesis General.

Hipótesis Específica

Hipótesis Específica N° 1

Las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa superan los Valores Máximos Admisibles D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

De acuerdo a los análisis fisicoquímicos de los parámetros del agua rechazo de una planta de Osmosis Inversa como se muestra en el anexo N° 2, se aprecia que los parámetros superan los Valores Máximos Admisibles (VMA D.S. N° 021-2009-VIVIENDA) y en referencia a sulfatos este tiene un valor de 1526 ppm, el valor

regulado para sulfatos presentes en los efluentes son 500 ppm. Por lo tanto se acepta la Hipótesis Específica N°1 planteada.

Hipótesis Específica N°2

Condiciones fisicoquímicas adecuadas para remover los iones sulfatos del agua de rechazo de una planta de ósmosis inversa son 20 g/L de cal, 5.0 g/L hidróxido de aluminio, 900 RPM de agitación continua y un tiempo de reacción de 80 minutos.

Las condiciones adecuadas experimentadas para la remoción de iones sulfatos del agua son 15 g/L de hidróxido de calcio, 6 g/L de hidróxido de aluminio, 800 RPM de velocidad de agitación y 90 minutos de tiempo de agitación. Por lo tanto se rechaza la Hipótesis Específica N°2.

6.2. Contratación de resultados con otros estudios similares

6.2.1 Análisis de las características Físico-Químicas del agua de rechazo de una planta de Osmosis Inversa

Se puede mencionar que las características fisicoquímicas tienen semejanza con los valores reportados por Moreno, 2014, quien desarrolló una investigación “**Estudio del Proceso de Precipitación de Etringita para la Eliminación de Sulfatos en los Efluentes Generados en Industrias Químicas del Ebro**”, para los experimentos empleo agua muestra de distintas fuentes entre ellas el rechazo de una planta de ósmosis inversa, y los análisis reporta Ca^{+2} 1150 (ppm), SO_4^{-2} 2000 (ppm) y HCO_3^{-2} 2100 (ppm).

Las características reportadas por los análisis del agua de rechazo de la presente investigación fueron Ca^{+2} 843.95 (ppm), SO_4^{-2} 1,527.17 (ppm) y HCO_3^{-2} 152.40 (ppm) (Ver Anexo N° 3). La diferencia que hay entre ambas se debe a la fuente de captación y ubicación de la toma de agua, que alimenta a la planta de ósmosis inversa, por lo tanto los rechazos también tendrán diferencias, sin embargo en ambos casos la presencia de sulfatos es alto respecto a lo que exigen las normas de descargas de efluentes (Valores Máximos Admisibles D.S. N° 021-2009-VIVIENDA) por lo tanto requiere estudios para su remoción.

6.1.1. Análisis de resultados reportados por diversos estudios y ensayos

Los resultados obtenidos en la presente investigación, fue de 35.4% de remoción de sulfatos, desde una concentración inicial de iones sulfatos 1,500 ppm aprox. Estos valores se pueden contrastar con los estudios de Moreno, 2014, quien desarrolló una investigación titulada “Estudio del Proceso de Precipitación de Etringita para la Eliminación de Sulfatos en los Efluentes Generados en Industrias Químicas del Ebro” y una de sus experimentaciones lo realizó aplicando a la remoción de iones sulfato presente en el efluente generado por el rechazo de una planta de osmosis inversa. Los resultados reportaron un rango de remoción de 25%, 32% y 40% concentración de iones sulfatos.

Otros estudios y aplicaciones de la remoción de sulfatos están dirigidos a aguas procedentes de mina, donde se aprecia la presencia de iones sulfatos producto de los drenajes lixiviados principalmente de pirita, sin embargo también están presentes los metales pesados. Sanz, 2015 desarrolló una investigación “Eliminación de Sulfatos en

Agua de Mina Mediante Procesos de Precipitación en Serie y Nanofiltración” y logró reducir los iones sulfatos inferiores a 50 ppm mucho menor de lo que exige la norma, así mismo Smit (1999), desarrolló un estudio titulado “Tratamiento de agua de mina contaminada” emplea el proceso SAVMIN. Los resultados fueron, la remoción de sulfatos en 90% (agua de mina) y 98% (agua de una planta química), también fue posible la remoción de metales pesados a niveles aceptables por la normativa ambiental.

VII. CONCLUSIONES

- 1) Los valores altos de remoción de sulfatos presentes en el agua de rechazo de una planta de ósmosis inversa se logra, realizando un pretratamiento para remover los iones interferentes más importantes como Ca^{+2} , HCO_3^{-1} y CO_3^{-2} . Se debe incrementar la alcalinidad con soda (NaOH) preparado al 10%, y llevar a pH de 10 hasta 12 y la filtración de sólidos formados. Seguido al pretratamiento, se debe continuar la saturación con hidróxido de calcio (15g/L) e hidróxido de aluminio (6 g/L) en agitación continua (800 RPM) durante 80 minutos valores óptimos ensayados en la presente investigación, con ello se logró una remoción de 35.4%.

- 2) Se puede concluir que el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa contiene iones disueltos que superan los Valores Máximos Admisibles (VMA) y deben ser tratados antes de su descarga al efluente, los iones presentes en exceso coinciden con otros antecedentes con problemas similares, por lo tanto es importante tener alternativas de tratamiento antes de realizar descargas al emisor.

- 3) Las condiciones fisicoquímicas para remover iones sulfatos obtenidos en la experimentación son de 15 g/L de hidróxido de calcio, 6 g/L de hidróxido de aluminio, 800 RPM de agitación y con tiempo de reacción de 90 minutos, y se obtuvo una remoción de sulfatos de 35.4%.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1). Para lograr mejores resultados de remoción de sulfatos, requiere realizar un pretratamiento previo a los iones interferentes (dureza) Ca^{+2} , HCO_3^{-1} y CO_3^{-2} luego de verificar la precipitación de estos iones, se prosigue con la aplicación del método de precipitación química y seguido de la microfiltración, de este modo se puede conseguir mejores resultados que sin un pretratamiento.
- 2). El tiempo de agitación o reacción es un factor importante, a tiempos mayores a 90 minutos la remoción es más eficiente, también se debe considerar las dosificaciones apropiadas de los agentes precipitantes como el hidróxido de calcio e hidróxidos de aluminio.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MORENO, M. **Estudio del Proceso de Precipitación de Etringita para la Eliminación de Sulfatos en los Efluentes Generados en Industrias Químicas del Ebro.** Máster Universitario en Química Sostenible Universidad Zaragoza, 2013.
2. SMIT, J. **The Treatment Of Polluted Mine Water.** Congress Sevilla, Spain, 1999.
3. SANZ, J. **Eliminación de Sulfatos en Aguas de Mina Mediante Proceso de Precipitación en Serie y Nanofiltración.** Veolia Water Technologies.
4. International Network for Acid Prevention. **Treatment Of Sulphate in Mine Effluents.** Lorax Environmental, 2003.
5. W, L, FORISSIER. **16 years of experience in mine water sulphate removal by nanofiltration.** International Congress on Water Management in the Mining Industry, 2012.
6. VISSER. **The Anaerobic Treatment of Sulfate Containing Wastewater.** Wageningen Agricultural University. Holanda 1995.
7. RODRIGUEZ J. **Remoción de Sulfatos de Aguas Residuales Generadas por la Empresa Ferinsa G.B.** 1999.
8. HARRIS D. **Análisis Químico Cuantitativo.** Editorial Reverté. Sexta Edición. Barcelona - España, 2007.

9. SANZ A. **Química Analítica Básica, Introducción a los Métodos de Separación.** Universidad de Oviedo. Ediciones Simancas, 1985.
10. CHANG R. **Química.** McGraw-Hill Interamericana. Novena Edición, 2007.
11. BROW T. **Química. La Ciencia Central.** Ediciones Pearson. Séptima Edición, 1998.
12. <http://www.google.com/patents/WO2014087026A1?cl=es>. **Método de Tratamiento de Residuos con Carga en Sulfatos Valorización de los Lodos Obtenidos.**
13. CADORIN, C, R. **Avances en el Tratamiento de Aguas Ácidas de Minas.** Universidad Tecnológica Pereira. Setiembre, 2007.
14. XU, W, T. Interaction of PACls With Sulfate. *Revista de Ciencias Medioambiental.* Vol. 16, 2004.
15. BAUR, K, M. **Dissolution-Precipitation Behaviour of Ettringite, Monosulfate and Calcium Silicate Hydrate.** *Investigación de Cemento y Concreto.* Vol. 34, 2004.
16. CODY, L, C. **The Effects of Chemical Environment on the Nucleation, Growth, and Stability of Ettringite.** *Investigacion de Cemento y Concreto.* Vol. 34, 2004.
17. KUN, L, E. **A Report on the Reduction of the Sulphate Content of Acid Mine Drainage by Precipitation with Barium Carbonate.** Anglo American Research Laboratories, 1972.

18. WASCO J, A. **Chemical Removal of Calcium Sulphate Scale.** Organic Reserch Laboratory. The Dow Chemical Company. Midland, Mich.
19. CHRISTOE J. **Removal of Sulfate from Industrial Wastewaters.** Water Environmental Federation. Vol. 48, 1976.
20. BOWELL R. **A Review of Sulfate Removal Options For Mine Waters.** SRK Consulting. Windsor.

ANEXOS

**ANEXO N°1: REMOCIÓN DE IONES SULFATOS DE AGUA DE RECHAZO DE UNA PLANTA DE OSMOSIS INVERSA
MEDIANTE PRECIPITACIÓN QUÍMICA Y MICROFILTRACIÓN**

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cómo debe ser el proceso de remoción de iones sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa?	Remover los iones sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa mediante precipitación química y microfiltración.	Estableciendo las condiciones fisicoquímicas favorables para la precipitación química y microfiltración, Entonces se podrá remover entre 30% y 40% de remoción de sulfatos presentes en el agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.	Y: El proceso de remoción de sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa	Ensayos fisicoquímicos	Porcentaje de remoción de sulfatos.	Experimental
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICA	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa?	Identificar las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa.	Las características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa superan los Valores Máximos Admisibles D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.	X ₁ : Características fisicoquímicas del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa	Ensayos fisicoquímicos	* pH * Contenido de iones presentes en el agua * Iones Sulfatos	Lectura directa Análisis de Laboratorio Análisis de Laboratorio
¿Cuáles son las condiciones fisicoquímicas que determinan la remoción de iones sulfatos presentes en el agua de rechazo empleando la precipitación química y la microfiltración?	Determinar las condiciones fisicoquímicas para remover los iones sulfatos presentes en el agua de rechazo empleando la precipitación química y la microfiltración.	Condiciones fisicoquímicas adecuadas para remover los iones sulfatos del agua de rechazo de una planta de osmosis inversa son 20 g/L de cal, 5.0 g/L hidróxido de aluminio, 900 RPM agitación continua y un tiempo de reacción de 80 minutos.	X ₂ : Condiciones fisicoquímicas adecuadas para precipitar sulfatos.	Ensayos fisicoquímicos	*Hidróxido de calcio (g/L) *Hidróxido de Aluminio(g/L) *Tiempo de acondicionamiento *Concentración de Sulfatos	Lectura directa Lectura directa Lectura directa Análisis de Laboratorio

ANEXO N°2 VALORES MAXIMOS ADMISIBLES



Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales No domésticas

VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA) DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS EN EL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO D.S. N° 021-2009-VIVIENDA

ANEXO N° 02

Valores Máximos Admisibles ⁽¹⁾

Art. 1° FINALIDAD, ÁMBITO Y OBLIGATORIEDAD DE LA NORMA

La presente norma regula mediante Valores Máximos Admisibles (VMA) las descargas de aguas residuales No domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales.

Los VMA, son aplicables en el ámbito nacional y son de obligatorio cumplimiento para todos los usuarios que efectúen descargas de aguas residuales No domésticas en el alcantarillado sanitario; su cumplimiento es exigible por las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (SEDAPAL).

Art. 3° DEFINICIÓN DE VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA)

Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA), como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente No doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido en sus parámetros aprobados (Anexo N° 1, y Anexo N° 2) causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, tratamiento de aguas residuales y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

ANEXO N° 01

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	DBO5	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales (S.S.T)	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	A y G	100

PARÁMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0.02
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0.5
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	500
Sulfuros	mg/L	S ⁻²	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH ⁺⁴	80
pH ⁽²⁾		pH	6-9
Sólidos Sedimentables ⁽²⁾	mL/L/h	S.S.	8.5
Temperatura ⁽²⁾	°C	T	<35

(1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por procesos productivos, está precisada en el reglamento de la presente norma tomando como referencia el código CIU. Aquellas actividades que no estén incluidas, en este código deberán cumplir con los parámetros indicados en el presente Anexo.

(2) Estos parámetros, serán tomados de muestras puntuales. El valor de los demás parámetros, serán determinados a partir del análisis de una muestra compuesta.

Art. 5° SUSPENSIÓN DEL SERVICIO DE ALCANTARILLADO

SEDAPAL se encuentra facultada en virtud a la presente norma a imponer el cobro de tarifas aprobadas por la SUNASS e incluso disponer la suspensión del servicio de descargas al sistema de alcantarillado conforme a la regulación prevista en el reglamento y que deriven de la vulneración de los Anexos N° 01 y N° 02.

Art. 9° PROHIBICIONES

Queda totalmente prohibido descargar directa o indirectamente a los sistemas de alcantarillado aguas residuales o cualquier otro tipo de residuos sólidos líquidos o gaseosos que en razón de su naturaleza, propiedades y cantidad causen por sí solos o por interacción con otras descargas algún tipo de daño, peligro e inconvenientes en las instalaciones de los sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales según lo indicado en el reglamento de la presente norma.

DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES

PRIMERA.- La presente norma entró en vigencia a partir de la aprobación de su Reglamento mediante el D.S. N°003-2011-VIVIENDA, vigente a partir del 22 de junio de 2011.

SEGUNDA.- Los usuarios que a la fecha de entrada en vigencia del presente D.S., se encuentran efectuando descargas de aguas residuales No domésticas en los sistemas de alcantarillado sanitario, deberán adecuar sus descargas a las disposiciones establecidas en la presente norma, en un plazo no mayor de cinco (05) años.

En el caso de nuevos usuarios del sistema de alcantarillado sanitario las disposiciones de la presente norma son de aplicación inmediata.

DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS MODIFICATORIAS:

Art. 56°.- Son derechos de SEDAPAL:

(...)

- g) Suspender el servicio de alcantarillado sanitario cuando las características de los efluentes No domésticos que se vierten en él, no cumplan con los VMA, establecidos en la norma vigente. SEDAPAL o la que haga sus veces, queda facultada para cobrar por los gastos incurridos en la suspensión y reposición de dicho servicio.
- h) Cobrar el costo adicional por las cargas contaminantes descargados en el sistema de alcantarillado que superan los VMA, establecidos. Dicho pago adicional se encuentra incorporado en el Reglamento de Prestación de Servicios de SEDAPAL.

REGLAMENTO DEL D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, QUE APRUEBA LOS VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN EL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO APROBADO POR D.S. N° 003-2011-VIVIENDA

Art. 1.- Del Objeto

El presente Reglamento tiene por objeto regular los procedimientos para controlar las descargas de aguas residuales No domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, de acuerdo a lo establecido en el D.S. N°021-2009-VIVIENDA.

TÍTULO II

OBLIGACIONES Y DERECHOS DE LOS USUARIOS NO DOMÉSTICOS QUE HACEN USO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO SANITARIO

Art. 5.- De las obligaciones

Los Usuarios No Domésticos que descargan aguas residuales No domésticas al sistema de alcantarillado están obligados a:

- a) Presentar anualmente a SEDAPAL la Declaración Jurada de Usuario No Doméstico.
- b) Implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales, cuando sus descargas excedan o puedan exceder los VMA establecidos en el D.S. N°021-2009-VIVIENDA.
- c) Efectuar el pago adicional por exceso de concentración de los parámetros fijados en el Anexo N° 1 del D.S. N°021-2009-VIVIENDA, de acuerdo a la metodología establecida por la SUNASS.
- d) Pagar el Importe correspondiente a la toma de Muestra Inopinada, análisis y cualquier otro gasto relacionado a la labor realizada por el laboratorio acreditado ante INDECOPI, siempre que el valor del parámetro analizado sobrepase los VMA, en caso de no sobrepasar los VMA el importe será asumido por SEDAPAL.
- e) Informar a SEDAPAL, cuando la descarga de sus aguas residuales No domésticas presenten alguna modificación derivada de la ampliación o variación de las actividades que realiza el Usuario

No Doméstico, dentro de un plazo que no deberá exceder los quince (15) días hábiles a partir de la ampliación o variación de sus actividades.

- f) Brindar todas las facilidades, accesos e ingresos necesarios para que, en la oportunidad debida, el personal de SEDAPAL o la entidad que haga sus veces y el laboratorio acreditado ante INDECOPI, efectúe la toma de muestra inopinada.
- g) Implementar el mecanismo o dispositivo especial para la toma de muestra inopinada, cuyo costo será asumido por el Usuario No Doméstico.
- h) Asumir los costos asociados al incumplimiento procesos y otras actividades adicionales que estén relacionadas con la implementación de los VMA, de acuerdo al procedimiento establecido por la SUNASS.
- i) Los Usuarios No Domésticos cuyas actividades estén clasificadas según el CIU, deberán declarar, reportar y cumplir con las obligaciones que se establecen en el presente Reglamento, en función de los parámetros que para dichas actividades se establecen en el referido código. Aquellas actividades que no estén incluidas en el CIU, deberán cumplir con los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y 2 del D.S. N°021-2009-VIVIENDA.
- j) Cumplir con las demás disposiciones que se emitan para la regulación de la aplicación de los VMA.

Capítulo II

Derechos de los Usuarios No Domésticos

Art. 6 De los derechos

Los Usuarios No Domésticos que descargan aguas residuales No domésticas al sistema de alcantarillado sanitario, tienen derecho a:

- a) Recibir información sobre la normatividad, las modificaciones y actualizaciones respecto a los VMA.
- b) A solicitar, de conformidad al artículo 6 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, la exoneración del pago o suspensión del servicio de alcantarillado sanitario, cuando por caso fortuito o fuerza mayor se haya excedido los VMA, de acuerdo con el procedimiento establecido en el artículo 33 del presente reglamento.
- c) Presenciar la toma de muestra inopinada, a participar de dicho acto y a suscribir el Acta de Toma de Muestra Inopinada, cuyo contenido será como mínimo el establecido en el Anexo II del presente reglamento.
- d) Solicitar directamente a cualquier laboratorio acreditado ante INDECOPI, la toma de muestra de parte y los análisis de sus descargas.
- e) Presentar reclamos, si consideran que ha sido vulnerado alguno de sus derechos, de acuerdo a los procedimientos que para tal fin se establezcan.

Capítulo II

Del Pago Adicional

Artículo 11.- Del pago adicional por exceso de concentración

SEDAPAL, cobrará a los Usuarios No Domésticos el pago adicional por exceso de concentración cuando haya verificado excesos de los VMA establecidos en el Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, de acuerdo a la metodología establecida por SUNASS.

Artículo 12.- De la oportunidad del cobro

Cuando SEDAPAL, haya verificado que se ha excedido uno o más de los VMA establecidos en el Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, aplicará lo dispuesto por la SUNASS. Para ello, emitirá el recibo que será remitido al Usuario No Doméstico junto con el costo de los análisis, la toma de muestra inopinada y cualquier otro costo relacionado a la labor del laboratorio acreditado ante el INDECOPI.

La SUNASS emitirá las normas correspondientes para tal efecto, debiendo precisar los temas referidos a fechas de pago, conceptos facturables, falta de entrega de recibo, entre otros.

TÍTULO III

OBLIGACIONES Y DERECHOS DE SEDAPAL O LA QUE HAGA SUS VECES

Capítulo I

Obligaciones de SEDAPAL o la que haga sus veces

Art. 7.- De las obligaciones:

- a) Solicitar al Usuario No Doméstico la presentación anual de la Declaración Jurada de Usuario No Doméstico conforme al Anexo I del presente reglamento, según lo establecido en la segunda Disposición Complementaria Final del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- b) Registrar al Usuario No Doméstico una vez revisada y evaluada la Declaración Jurada de Usuarios No Domésticos, conforme al procedimiento establecido en el artículo 17 del presente reglamento.
- c) Emitir pronunciamiento, previa evaluación de la información presentada, y asignar un Código de Usuario No Doméstico.
- d) Pagar el importe correspondiente a la toma de muestra inopinada, análisis y cualquier otro gasto relacionado a la labor realizada por el laboratorio acreditado ante INDECOPI, siempre que el valor del parámetro analizado no sobrepase los VMA; en caso de sobrepasar los VMA el importe será asumido por el Usuario No Doméstico.
- e) Solicitar al Usuario No Doméstico el pago adicional por exceso de concentración de los parámetros por sobrepasar los VMA fijados en el Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, de acuerdo a la Metodología establecida por SUNASS.
- f) Reponer el servicio de alcantarillado sanitario previa verificación del cumplimiento de los parámetros establecidos en el Anexo N° 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- g) Suspender el cobro del pago adicional por exceso de concentración al Usuario No Doméstico, previa verificación del cumplimiento de los parámetros del Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- h) Comunicar los Usuarios No Domésticos sobre la normatividad, las modificaciones y actualizaciones respecto a los VMA.
- i) En caso fortuito o fuerza mayor, evaluar si temporalmente procede exonerar al Usuario No Doméstico, previa verificación de cumplimiento de los parámetros o de la suspensión del servicio de descargas del sistema de alcantarillado.
- j) Cobrar a los Usuarios No Domésticos el pago adicional por exceso de concentración, de acuerdo a la metodología establecida por SUNASS, según lo dispone el artículo 4° del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- k) Cumplir con las demás disposiciones que se emitan para regular la aplicación de los VMA.

Capítulo II

Derechos de SEDAPAL o la que haga sus veces

Art. 8.- De los derechos:

- a) Solicitar al laboratorio acreditado por INDECOPI que efectúe la Toma de Muestra Inopinada a las descargas del Usuario No Doméstico que, según su criterio, amerite la revisión de uno, dos o más VMA contenidos en los Anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.
- b) Realizar el estudio para caracterizar el tipo de descarga No doméstica a fin de proponer su evaluación al MVCS, y de ser el caso, modificar y/o actualizar los parámetros contenidos en los anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

TÍTULO IV

VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES

Capítulo I

De las Descargas

Art. 9.- De las descargas permitidas

Se permitirá la descarga directa de aguas residuales No domésticas

en el sistema de alcantarillado sanitario, sin pago o sanción alguna, siempre que no excedan los VMA establecidos en los Anexos N° 1 y 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

SEDAPAL, o la entidad que haga sus veces, en cumplimiento del artículo 7 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, verificará el cumplimiento de los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y 2 del mencionado Decreto Supremo.

Art. 10.- De las descargas no permitidas

No está permitido descargar aguas residuales No domésticas al sistema de alcantarillado sanitario, que sobrepasen los VMA establecidos en el N° 2 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

En cumplimiento del artículo 9 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, concordante con el literal i) del artículo 72 del T.U.O del Reglamento, no está permitido descargar, verter, arrojar o introducir bajo cualquier modalidad al sistema de alcantarillado sanitario, elementos tales como:

- Residuos sólidos
- Material orgánico de cualquier tipo y estado
- Mezclas inflamables, radioactivas, explosivas, corrosivas, tóxicas y/o venenosas que provoquen daño al sistema de alcantarillado.
- Aquellas descargas que puedan causar obstrucciones físicas, interferencias, perturbaciones
- Residuos sólidos o viscosos, capaces de obstruir el libre flujo.
- Gases procedentes de escapes de motores de cualquier tipo.
- Disolventes orgánicos y pintura, cualquiera sea su proporción o cantidad.
- Carburo calcio y otras sustancias sólidas potencialmente peligrosas, tales como hidruros, peróxidos, clorados, bromatos y sus derivados.
- Hidrocarburos y sus derivados
- Materias colorantes
- Agua salobre
- Residuos que generen gases nocivos.

RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 025-2011-SUNASS-CD

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL PAGO ADICIONAL POR EXCESO DE CONCENTRACIÓN DE LOS PARÁMETROS FIJADOS EN ANEXO 1 DEL D.S. N° 021-2009-VIVIENDA

Art. 1°.- Aprobar la metodología para determinación de pago adicional por exceso de concentración respecto de los Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales No domésticas en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado y que obra como anexo de la presente resolución.

Art. 3°.- Modificar el artículo 42° del Reglamento de Calidad de la Prestación de los Servicios de Saneamiento, aprobado por Resolución de Consejo Directivo N° 011-2007-SUNASS, de la siguiente manera:

"Artículo 42°.- Descargas en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado sanitario".

Los usuarios no deben descargar, directa o indirectamente, en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado, aguas residuales No domésticas o cualquier otro tipo de residuos sólidos, líquidos o gaseosos que no cumplan con la normativa de descargas de aguas residuales.

SEDAPAL, podrá cobrar a los usuarios el costo adicional correspondiente a las descargas en el servicio de alcantarillado que superen los Valores Máximos Admisibles establecidos por la normativa correspondiente, conforme a la metodología aprobada por SUNASS.

Art. 4°.- La SUNASS supervisará y fiscalizará a SEDAPAL el cumplimiento de efectuar el monitoreo y control de la concentración de parámetros de descarga de aguas residuales No domésticas en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado sanitario, de acuerdo, a lo establecido por la normativa vigente, asimismo

impondrá las sanciones correspondientes.

Para este efecto aplicará el Reglamento General de Supervisión, Fiscalización y Sanción de las Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento, aprobado Resolución de Concejo Directivo N° 003-2007-SUNASS-CD, en lo que corresponda.

ANEXO N° 1

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR EL PAGO ADICIONAL POR EXCESO DE CONCENTRACIÓN DE LOS PARÁMETROS FIJADOS EN EL ANEXO N° 1 DEL D.S. N° 021-2009-VIVIENDA

1. Establecimiento de rangos

En concordancia con el principio de incentivar la reducción de las descargas de los parámetros del anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, la presente metodología establece cinco (05) rangos de concentración de los parámetros (DBO, DQO, SST, A y G) en relación a los incrementos de concentraciones establecidas como valores máximos admisibles de las descargas de aguas residuales en el sistema de recolección del servicio de alcantarillado sanitario y la transición de estos valores en relación a la dilución de la ciudad y los efectos generados y proyectados en la operación y mantenimiento de la red colectora y plantas de tratamiento de desagüe, con la finalidad de incentivar en los usuarios no domésticos la adecuación de sus sistemas con un pre tratamiento antes de verter sus desagües a la red colectora:

Definición de Rangos de Parámetros

RANGO	PARÁMETROS			
	DBO ₅	DQO	SST	Ay G
VMA (mg/L)	500	1000	500	100
Rango 1	500,1-550	1000,1-1100	500,1-550	100,1-150
Rango 2	550,1 - 600	1100,1 - 1200	550,1 - 600	150,1 - 200
Rango 3	600,1 - 1000	1200,1 - 2500	600,1 - 1000	200,1 - 450
Rango 4	1000,1 - 10 ⁴	2500,1 - 10 ⁴	1000,1 - 10 ⁴	450,1 - 10 ³
Rango 5	> a 10 ⁴	> a 10 ⁴	> a 10 ⁴	> a 10 ³

2. Establecimiento de límite de pago adicional por cada rango

Adicionalmente se establece límites de pago adicional para cada rango establecido:

Definición de Límite de Pago Adicional

RANGO	LÍMITE DE PAGO ADICIONAL
Rango 1	25% del importe facturado por servicio de alcantarillado
Rango 2	75% del importe facturado por el servicio de alcantarillado
Rango 3	100% del importe facturado por el servicio de alcantarillado
Rango 4	10 veces del importe facturado por el servicio de alcantarillado
Rango 5	20 veces del importe facturado por el servicio de alcantarillado

3. Establecimiento de pesos específicos para cada uno de los parámetros.

La metodología establece pasos específicos para cada uno de los parámetros: DBO₅, DQO, Ay Gy SST:

ASIGNACIÓN PORCENTUAL

PARÁMETRO	ASIGNACIÓN PORCENTUAL
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	25%
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	35%
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	20%
Aceites y Grasas	20%

II Fórmula

El pago adicional a ser aplicado a los usuarios No domésticos que producen agua residual No doméstica con concentraciones de DBO, DQO, SST y Aceites y Grasas por encima de los Valores Máximos Admisibles del Anexo N° 1 del D.S. N° 021-2009-VIVIENDA, en adelante VMA, será aplicado sobre la estructura tarifaria previamente definida entre SEDAPAL y la SUNASS.

Por tanto, únicamente los usuarios que opten por arrojar en la red colectora pública agua residual No doméstica con concentraciones de DBO₅, DQO, SST y Aceites y Grasas por encima de los VMA deberán realizar el pago adicional.

Ecuación 1:

PA =	Importe a facturar por el servicio de alcantarillado	*F
------	------------------------------------------------------	----

Donde:

PA = Pago adicional

F = Factor de ajuste para calcular el pago adicional

FACTORES POR CADA RANGO:

RANGO	FACTORES				TOTAL
	F DBO ₅	F DQO	F SST	F Ay G	
Asignación porcentual	25%	15%	20%	20%	
Rango 1	6%	9%	5%	5%	25%
Rango 2	19%	26%	15%	15%	75%
Rango 3	25%	35%	20%	20%	100%
Rango 4	250%	350%	200%	200%	10 veces más
Rango 5	500%	700%	400%	400%	20 veces más

Ecuación 2:

$$F = F_{DBO_5} + F_{DQO} + F_{SST} + F_{AyG}$$

Donde:

F = Factor de ajuste para calcular el pago adicional.

F_{DBO₅} = Factor de exceso de DBO₅ de acuerdo al rango.

F_{DQO} = Factor de exceso de DQO de acuerdo al rango.

F_{SST} = Factor de exceso de SST de acuerdo al rango.

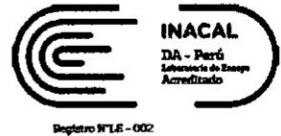
F_{AyG} = Factor de exceso de A y G de acuerdo al rango.

III Etapa de Implementación

La presente Metodología será aplicada en cumplimiento con lo dispuesto en el D.S. N° 021-2009-VIVIENDA.

ANEXO Nº 3 ANALISIS DE LABORATORIO DE AGUA DE RECHAZO

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 1 de 7

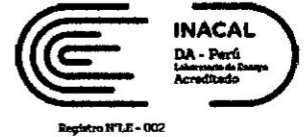
A solicitud de:	[REDACTED]	Cantidad Muestras:	1
Dirección:	[REDACTED]	Fecha de Recepción a SGS:	[REDACTED]
Solicitud de Ensayo:	[REDACTED]		
Muestreo realizado por:	[REDACTED]		

Análisis	Método
Bicarbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B: 2012; 22nd Ed. - Alkalinity Titration Method
Carbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B: 2012; 22nd Ed. - Alkalinity Titration Method
Conductividad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510-B: 2012; 22nd Ed. - Conductivity: Laboratory Method
Sólidos Disueltos Totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-C: 2012; 22nd Ed. - Solids: Total Dissolved Solid dried at 180°C
Potencial de Hidrógeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H4-B: 2012; 22nd Ed. - pH Value: Electrometric Method.
Silice	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SiO2-C: 2012; 22nd Ed. - Silica: Molybdosilicate Method
Metales Totales	EPA 200.8: 1994 Rev 5.4 Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry.
Aniones	EPA 300.0:1993; Rev. 2.1.- Determination of Inorganic Anions by Ion Chromatography.

Emitido en Callao-Perú [REDACTED]

[REDACTED]
Coordinador de Laboratorio

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 2 de 7

Matriz
Producto descrito como
Identificación de Muestra
Fecha de muestreo

		AGUA SALOBRE
		AGUA SALOBRE
		POZO-01
	L.D.	
Bicarbonatos (mg HCO ₃ /L)	0.6	152.4
Carbonatos (mg CO ₃ /L)	0.3	1.94
Conductividad (µS/cm)	—	17,305.61
Potencial de Hidrógeno (pH)	—	6.3 *
Sílice (mg/L)	0.16	20.29
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	1	11,874.69

Aniones

Matriz
Producto descrito como
Identificación de Muestra
Fecha de muestreo

		AGUA SALOBRE
		AGUA SALOBRE
		POZO-01
	L.D.	
Cloruro (mg/L)	0.025	5,808.37
Fluoruro (mg/L)	0.002	0.16
Nitrato (mg/L)	0.031	40.34
Sulfato (mg/L)	0.01	1,527.17

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL-DA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 3 de 7

Metales Totales

Matriz:
Producto descrito como
Identificación de Muestra
Fecha de muestreo

	AGUA SALOBRE	
	AGUA SALOBRE	
	POZO-01	
	L.D.	
Aluminio Total (mg/L)	0.02	0.103
Antimonio Total (mg/L)	0.0008	<0.0008
Arsénico Total (mg/L)	0.001	0.017
Bario Total (mg/L)	0.002	0.06
Berilio Total (mg/L)	0.0001	<0.0001
Bismuto Total (mg/L)	0.00005	<0.00005
Boro Total (mg/L)	0.01	0.680
Cadmio Total (mg/L)	0.0002	0.0012
Calcio Total (mg/L)	0.003	845.93
Cerio Total (mg/L)	0.00008	0.00010
Cesio Total (mg/L)	0.0001	0.0002
Cobalto Total (mg/L)	0.00007	0.00092
Cobre Total (mg/L)	0.001	0.003
Cromo Total (mg/L)	0.002	<0.002
Estaño Total (mg/L)	0.0010	0.0015
Estroncio Total (mg/L)	0.0003	10.99
Fósforo Total (mg/L)	0.2	<0.2
Gaio Total (mg/L)	0.00004	0.00004
Alemanio Total (mg/L)	0.0002	0.0005
Hierro Total (mg/L)	0.001	0.190
Litio Total (mg/L)	0.0009	0.1571
Magnesio Total (mg/L)	0.001	172.79
Manqueseo Total (mg/L)	0.0006	0.0387
Mercurio Total (mg/L)	0.00003	0.00036
Molibdeno Total (mg/L)	0.00014	0.06288
Niquel Total (mg/L)	0.0004	0.0037
Plata Total (mg/L)	0.0002	0.0002
Plomo Total (mg/L)	0.0003	0.0005
Potasio Total (mg/L)	0.2	54.590

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL-DA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 4 de 7

Metales Totales

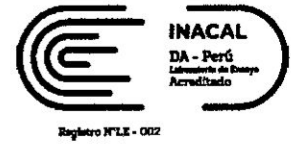
		AGUA SALOBRE
		AGUA SALOBRE
		POZO-01
Rubidio Total (mg/L)	0.0003	0.0692
Selenio Total (mg/L)	0.002	0.008
Sodio Total (mg/L)	0.02	3,238.64
Talio Total (mg/L)	0.00003	0.00024
Teluro Total (mg/L)	0.001	<0.001
Torio Total (mg/L)	0.00006	<0.00006
Tritanio Total (mg/L)	0.01	<0.01
Uranio Total (mg/L)	0.00004	0.02192
Vanadio Total (mg/L)	0.002	0.006
Wolframio Total (mg/L)	0.0002	<0.0002
Yterbio Total (mg/L)	0.00002	<0.00002
Zinc Total (mg/L)	0.0008	0.0045
Zirconio Total (mg/L)	0.00015	0.00051

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL-DA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 5 de 7

Control de Calidad

MB: Blanco del proceso.
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.
 MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.
 Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Alcalinidad Método : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B: 2012; 22nd Ed. - Alkalinity Titration Method

Parámetro	Unidad	LD	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery
Carbonatos	mg CO ₃ /L	0.3	<0.3	0%	97%
Bicarbonatos	mg HCO ₃ /L	0.6	<0.6	0%	112%

Conductividad Método : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510-B: 2012; 22nd Ed. - Conductivity; Laboratory Method

Parámetro	Unidad	LD	DUP %RPD	LCS %Recovery
Conductividad	µS/cm	—	0%	99 - 100%

Sólidos Disueltos Totales Método : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540-C: 2012; 22nd Ed. - Solids: Total Dissolved Solid dried at 180°C

Parámetro	Unidad	LD	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	1	<1	0 - 3%	98 - 101%

Potencial de Hidrógeno Método : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H⁺-B: 2012; 22nd Ed. - pH Value; Electrometric Method

Parámetro	Unidad	LD	DUP %RPD	LCS %Recovery
Potencial de Hidrógeno	pH	—	0%	100%

Sílice Método : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4600-SiO₂-C: 2012; 22nd Ed. - Silica; Molybdenicite Method

Parámetro	Unidad	LD	MB	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Sílice	mg/L	0.16	<0.16	100%	97 - 98%	5%

Notas:
 El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.
 (*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL-DA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 6 de 7

Metales Totales

Método : EPA 200.8: 1994 Rev 5.4 Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled
Plasma - Mass Spectrometry.

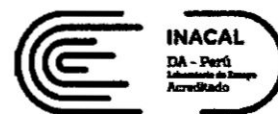
Parámetro	Unidad	LD	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Plata Total	mg/L	0.0002	<0.0002	0 - 8%	107 - 108%	98 - 104%	1 - 4%
Aluminio Total	mg/L	0.02	<0.02	1 - 8%	NA - 101%	NA - 99%	NA - 4%
Arsénico Total	mg/L	0.001	<0.001	0 - 7%	102 - 109%	101 - 102%	1 - 4%
Boro Total	mg/L	0.01	<0.01	1 - 8%	96%	91 - 98%	1 - 2%
Bario Total	mg/L	0.002	<0.002	1 - 7%	93 - 101%	97 - 103%	4%
Berilio Total	mg/L	0.0001	<0.0001	0%	91 - 97%	94 - 95%	1 - 2%
Bismuto Total	mg/L	0.00005	<0.00005	0%	105 - 108%	94 - 95%	1 - 4%
Calcio Total	mg/L	0.003	<0.003	0 - 4%	97 - 100%	98 - 99%	0 - 1%
Cadmio Total	mg/L	0.0002	<0.0002	0 - 6%	93 - 99%	97 - 107%	2%
Cerio Total	mg/L	0.00008	<0.00008	0 - 8%	106%	102 - 104%	0 - 3%
Cobalto Total	mg/L	0.00007	<0.00007	0 - 6%	93 - 97%	97 - 101%	0 - 1%
Cromo Total	mg/L	0.002	<0.002	0 - 8%	104 - 109%	96 - 105%	2 - 3%
Cesio Total	mg/L	0.0001	<0.0001	2 - 7%	99 - 102%	106 - 110%	0 - 3%
Cobre Total	mg/L	0.001	<0.001	0 - 7%	98%	97 - 101%	1%
Hierro Total	mg/L	0.001	<0.001	2 - 8%	99 - 103%	97 - 107%	0 - 2%
Galio Total	mg/L	0.00004	<0.00004	0 - 2%	99 - 105%	97 - 100%	1 - 2%
Germanio Total	mg/L	0.0002	<0.0002	0 - 6%	103 - 104%	100 - 104%	0 - 1%
Hafnio Total	mg/L	0.00005	<0.00005	0 - 7%	100 - 101%	93 - 97%	0 - 4%
Mercurio Total	mg/L	0.00003	<0.00003	2 - 8%	92 - 93%	94 - 98%	0%
Potasio Total	mg/L	0.2	<0.2	1 - 3%	102%	98%	1%
Lantano Total	mg/L	0.0005	<0.0005	0%	101 - 106%	99 - 101%	0 - 4%
Litio Total	mg/L	0.0009	<0.0009	0 - 7%	98 - 99%	96 - 99%	0 - 6%
Lutecio Total	mg/L	0.00002	<0.00002	0%	97 - 99%	99 - 101%	1 - 3%
Magnesio Total	mg/L	0.001	<0.001	0 - 3%	99 - 102%	99 - 102%	0 - 1%
Manganeso Total	mg/L	0.0006	<0.0006	1 - 8%	94 - 97%	94 - 97%	3%
Moibdeno Total	mg/L	0.00014	<0.00014	0 - 8%	102 - 104%	100 - 102%	1 - 2%
Sodio Total	mg/L	0.02	<0.02	0 - 2%	95 - 101%	97 - 98%	0 - 1%
Niobio Total	mg/L	0.0005	<0.0005	0%	102 - 107%	97 - 98%	1 - 2%
Niquel Total	mg/L	0.0004	<0.0004	0 - 4%	97 - 101%	93 - 98%	0 - 1%
Fósforo Total	mg/L	0.2	<0.2	0%	96%	94%	7%

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL-DA, para la matriz en mención.

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



Registro N° LE - 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL

Página 7 de 7

			MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Plomo Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 6%	104 - 109%	96 - 99%	2 - 3%
Rubidio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 7%	105%	98 - 103%	2 - 5%
Antimonio Total	mg/L	0.0008	<0.0008	0%	95 - 103%	105 - 109%	1%
Selenio Total	mg/L	0.002	<0.002	0 - 6%	99 - 100%	95 - 105%	0 - 5%
Estaño Total	mg/L	0.0010	<0.0010	0 - 1%	97 - 106%	105%	2 - 4%
Estroncio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	1 - 2%	98 - 105%	102 - 103%	0%
Tantalio Total	mg/L	0.0007	<0.0007	0%	99 - 103%	99 - 102%	2 - 3%
Ytacio Total	mg/L	0.001	<0.001	0%	101%	98 - 100%	2 - 6%
torio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	95 - 105%	99 - 104%	1 - 7%
Tiitacio Total	mg/L	0.01	<0.01	0%	NA - 99%	NA - 102%	NA - 1%
Talio Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0 - 6%	99 - 102%	100 - 101%	1 - 3%
Uranio Total	mg/L	0.00004	<0.00004	1 - 4%	104 - 107%	99 - 100%	2 - 4%
Venadio Total	mg/L	0.002	<0.002	1 - 5%	104 - 107%	98 - 108%	0 - 15%
Wolframio Total	mg/L	0.0002	<0.0002	0 - 3%	105 - 107%	101 - 104%	1 - 4%
Yterbio Total	mg/L	0.00002	<0.00002	0%	95 - 100%	95 - 98%	0 - 3%
Zinc Total	mg/L	0.0008	<0.0008	0 - 8%	91 - 100%	97 - 100%	1 - 3%
Zirconio Total	mg/L	0.00015	<0.00015	0 - 5%	93 - 101%	99 - 109%	1 - 3%

Aniones

Método : EPA 300.0:1993; Rev. 2.1.- Determination of Inorganic Anions by Ion Chromatography.

Parámetro	Unidad	LD	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Cloruro	mg/L	0.025	<0.025	0%	99 - 100%	99 - 104%	0%
Fluoruro	mg/L	0.002	<0.002	2 - 5%	97 - 98%	99%	1%
Nitrato	mg/L	0.031	<0.031	0 - 1%	99 - 100%	96 - 104%	0 - 2%
Sulfato	mg/L	0.01	<0.01	0%	99 - 100%	99 - 102%	2%

Notas:

El reporte de tiempo se realiza en el sistema horario de 24 horas.

(*) El método indicado no ha sido acreditado por el INACAL-DA, para la matriz en mención.