



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**“POTENCIAL DE REMOCIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL PERUANA EN EL
TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON PLOMO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

AUTOR:

BARRETO PIO CARMEN ELIZABETH

ASESOR:

DR. RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ CIRO

JURADOS:

DRA. TAFUR ANZUALDO, VICENTA IRENE

DR. BOLÍVAR JIMÉNEZ, JOSÉ LUIS

DR. JAVE NAKAYO, JORGE LEONARDO

LIMA - PERÚ

2021

Dedicatoria

A mi familia por el apoyo, paciencia y compañía que me brindaron durante todo el proceso del trabajo hoy culminado.

Agradecimiento

A Dios por guiarme a lo largo de toda mi existencia por ser la fortaleza y el apoyo en los momentos difíciles.

A mis padres por el ejemplo de disciplina, trabajo y honradez que me permitieron alcanzar la madurez para lograr los objetivos trazados.

A mi asesor el Dr. Ciro Rodríguez, quien me brindó su apoyo, experiencia y conocimiento, permitiendo el desarrollo y culminación de la tesis doctoral.

A los Docentes del doctorado de la Universidad Nacional Federico Villarreal por sus conocimientos y experiencias compartidas.

A todos los que de una u otra manera me alentaron a la realización de este trabajo.

Índice

Resumen	15
Abstract.....	16
I Introducción.....	17
1.1 Planteamiento del Problema	19
1.2 Descripción del problema.....	20
1.3 Formulación del problema.....	29
1.3.1 Problema General.....	29
1.3.2 Problemas específicos.....	29
1.4 Antecedentes	30
1.4.1 Antecedentes Internacionales.....	30
1.4.2 Antecedentes Nacionales.....	35
1.5 Justificación e importancia de la investigación	37
1.5.1 Teórica.....	37
1.5.2 Práctica	38
1.5.3 Social.....	38
1.5.4 Importancia	38
1.6 Limitaciones de la Investigación	39
1.7 Objetivos.....	39
1.7.1 Objetivo General.....	39
1.7.2 Objetivos específicos	40
1.8. Hipótesis	40
1.8.1 Hipótesis General	40
1.8.2 Hipótesis Específicas	41

II Marco Teórico	42
2.1 Marco Conceptual	42
2.1.1 El plomo	42
2.1.2. Las Zeolitas	45
2.2 Términos Básicos.....	67
2.3 Aspectos de Responsabilidad Social y Medio Ambiente	69
2.3.1 Responsabilidad Social	69
2.3.2 Responsabilidad Ambiental	69
2.4. Normativa Nacional e Internacional	70
2.4.1 Ley General del Ambiente 28611	70
2.4.2 Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29333.....	70
2.4.3 Guía para la calidad del agua potable.....	72
III Método.....	73
3.1 Tipo de Investigación	73
3.1.1 Alcance de la Investigación	73
3.2 Población y Muestra	74
3.2.1 Población	74
3.2.2 Muestra	75
3.3.1 Variable Independiente X.....	78
3.3.2 Variable Dependiente Y	79
3.4 Instrumentos de recolección de datos.....	80
3.4.1 Materiales y Equipos	80
3.4.2 Técnicas de Laboratorio	82
3.5 Procedimientos	83

3.5.1 Caracterización de la zeolita Natural	83
3.5.2 Factores que influyen en la cinética de remoción y de adsorción.....	85
3.5.3 Determinación de la capacidad de adsorción de la zeolita natural Yura –Arequipa- Perú	90
3.5.4 Determinación de la eficiencia de la zeolita natural en la remoción de plomo...	91
3.5.5 Evaluación del cumplimiento del ECA - Plomo categoría I- subcategoría A1; agua para consumo humano	93
3.6 Análisis de datos	94
3.6.1 Estadísticos utilizados en el análisis de datos.....	94
IV Resultados.....	96
4.1 Composición Fisicoquímica de la Zeolita Natural	96
4.1.1. Evaluación de la morfología superficial y composición química de la zeolita Natural	96
4.1.2 Determinación de la capacidad de intercambio iónico (C.I).....	101
4.2 Factores que influyen en la cinética de remoción	102
4.2.1 Influencia del pH en el porcentaje de remoción de plomo	102
4.2.2 Influencia del pH en cinética de remoción del plomo	103
4.2.3 Influencia del pH de la solución en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural.....	106
4.2.4 Influencia del tamaño de partícula de la zeolita en la cinética de adsorción de plomo	109
4.2.5 Evaluación de la capacidad de adsorción en función a la masa del adsorbente	112
4.2.6 Evaluación de la cinética de adsorción en función a la concentración de plomo en la solución	116

4.3 Determinación de la capacidad de adsorción de la zeolita natural Yura –Arequipa-Perú.	120
4.4 Determinación del potencial de remoción de la zeolita natural.....	124
4.4.1 Muestra de agua contaminada tratada con zeolita, con diez repeticiones.....	124
4.4.2 Muestra de agua contaminada tratada con zeolitas naturales con 36 repeticiones	126
4.5 Evaluación del cumplimiento del ECA - Plomo.....	129
4.6 Análisis e Interpretación	131
4.6.1 Composición Físicoquímica de la zeolita natural	131
4.6.2 Evaluación de la capacidad de intercambio iónico (C.I).....	131
4.6.3 Factores que influyen en el proceso de adsorción.....	132
4.7 Determinación de la capacidad de adsorción de la zeolita natural	134
4.8 Determinación del potencial de remoción de la zeolita natural.....	135
4.9 Evaluación del cumplimiento del ECA - Plomo.....	136
V <i>Discusión de resultados</i>	138
5.1 Composición Físicoquímica de la zeolita natural	138
5.1.1 Evaluación de la composición físicoquímica y morfológica	138
5.1.2 Evaluación de la capacidad de intercambio iónico (C.I).....	139
5.2. Factores que influyen en el proceso de adsorción	139
5.2.1 Influencia del pH en la cinética de remoción	140
5.2.2 Influencia del tamaño de partícula de la zeolita en la cinética de adsorción de plomo	141
5.2.3 Influencia del tamaño de masa en la cinética de adsorción de plomo.....	141

5.2.4. Influencia de la concentración de la solución en la cinética de adsorción de plomo	141
5.3 Evaluación del proceso de adsorción del plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa Perú	142
5.4. Determinación del potencial de remoción de la zeolita natural.....	143
5.5 Evaluación del cumplimiento del ECA Plomo	143
VI Conclusiones	145
6.1 Conclusión General	145
6.2 Conclusiones específicas.....	145
VII Recomendaciones	147
VIII Referencias.....	148
Trabajos citados.....	148
IX Anexos	156
7.1 Matriz de consistencia	157
7.2. Muestras Zeolitas Naturales.....	159
7.3.- Fichas técnicas de instrumentos a utilizar.....	159

Índice de Tablas

Tabla 1. Inventario de pasivos ambientales mineros en el Perú	22
Tabla 2. Composición química y propiedades fisicoquímicas de muestras de zeolitas	31
Tabla 3. Parámetro de ecuaciones de Langmuir y Freundlich (Tamaño de partícula 0-125 um).....	36
Tabla 4. Límites máximos permisibles de calidad de agua para consumo humano.....	42
Tabla 5. Categoría 1: Poblacional y recreacional subcategoría A	43
Tabla 6. Capacidad de intercambio teórica y real.....	53
Tabla 7. Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo de zeolitas naturales Yura-Arequipa-Perú	75
Tabla 8. Coordenadas de ubicación del punto de muestreo aguas superficiales Río Chillón	78
Tabla 9. Operacionalización de la variable independiente.....	78
Tabla 10. Operacionalización de la variable dependiente.....	79
Tabla 11. Tamaño de partícula ASTM, E. 11-61	81
Tabla 12. Equipos e Instrumentos de Laboratorio	82
Tabla 13. Técnicas analíticas- Laboratorio	83
Tabla 14. Influencia del pH en la cinética de remoción de plomo.....	87
Tabla 15. Influencia del tamaño de partícula en la cinética de remoción y de adsorción.....	88
Tabla 16. Influencia de la masa del adsorbente en la cinética de remoción de plomo	89
Tabla 17. Influencia de la concentración de solución en la cinética de remoción de plomo	89
Tabla 18. Evaluación de la Capacidad de adsorción de la zeolita natural	90
Tabla 19. Evaluación del porcentaje de remoción plomo utilizando como adsorbente la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	92

Tabla 20. Evaluación del potencial de remoción plomo de la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú	93
Tabla 21. Evaluación del cumplimiento del ECA.....	94
Tabla 22. Composición atómica porcentual de la zeolita natural Yura-Arequipa-Perú	99
Tabla 23. Composición zeolita natural después del proceso de adsorción de plomo.....	100
Tabla 24. Cationes intercambiables (mg/L) de la zeolita natural	101
Tabla 25. Capacidad de intercambio iónico zeolita natural	102
Tabla 26. Influencia del pH en el porcentaje de remoción de plomo de aguas contaminadas	103
Tabla 27. Influencia del pH en la cinética de remoción de plomo.....	104
Tabla 28. Influencia del pH en la cinética de adsorción de plomo	106
Tabla 29. Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis	107
Tabla 30. Estimación de la diferencia	107
Tabla 31. Prueba hipótesis	108
Tabla 32. Influencia del tamaño de partícula en la cinética de adsorción del Plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales	109
Tabla 33. Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis	110
Tabla 34. Estimación de la diferencia	111
Tabla 35. Prueba hipótesis	111
Tabla 36. Influencia de la masa del adsorbente en el porcentaje de remoción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales	112
Tabla 37. Influencia de la masa del adsorbente en la cinética de adsorción de plomo por zeolitas Naturales	113
Tabla 38. Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis	114
Tabla 39. Estimación de la diferencia	114

Tabla 40. Prueba hipótesis	115
Tabla 41. Influencia de la concentración de la solución en la cinética de adsorción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales	116
Tabla 42. Influencia de la concentración de la solución en el porcentaje de remoción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales	117
Tabla 43. Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis	119
Tabla 44. Estimación de la diferencia	119
Tabla 45. Prueba hipótesis	119
Tabla 46. Evaluación de la Capacidad de adsorción de la zeolita Natural de Yura Arequipa Perú	121
Tabla 47. Constantes de Isotermas de correlación	123
Tabla 48. Cobertura superficial versus concentración de la solución	123
Tabla 49. Evaluación del potencial de remoción de plomo de la Zeolita natural	124
Tabla 50. Resultados estadística de la prueba de hipótesis	125
Tabla 51. Evaluación del potencial de remoción de plomo de la Zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú	127
Tabla 52. Resultados estadística de la prueba de hipótesis	128
Tabla 53. Calidad del agua superficial tratada con zeolitas naturales para uso de consumo humano; Carretera Canta km. 74,5.	130

Índice de Figuras

Figura 1. Relaves con tóxicos de minería en el cerro Tamboraque	23
Figura 2. Bocamina abandonada con flujo de agua, Cía minera Germanio Río Auri - cuenca del río Rímac.....	24
Figura 3. Pasivos mineros en la laguna de Pacococha, cabecera de la Cuenca de Aruri 28-06-2012.	24
Figura 4. Estación de monitoreo E-6a: río Rímac, central hidroeléctrica.....	25
Figura 5. Concentración de plomo en el río Rímac 2012- 2015.....	26
Figura 6. Concentración de plomo en el río Rímac 2013- 2016.....	26
Figura 7. Niveles de concentración de plomo en la cuenca del río Chillón.....	27
Figura 8. Isotherma de adsorción del plomo:a) Modelo Langmuir (Línea Continua) b) Modelo Freundlich (Línea Punteada).....	36
Figura 9. Especiación de Pb (II) en función al pH en solución acuosa.....	45
Figura 10. Proceso de formación de la zeolita.....	47
Figura 11.Estructura de zeolita.....	48
Figura 12. Morfología Mordenita.....	50
Figura 13. Espectro de energía dispersiva de electrones de la zeolita MXZ.....	51
Figura 14. Isothermas de adsorción.....	56
Figura 15. Isotherma de remoción de Pb (II) con zeolita MXZ.....	59
Figura 16.Cinética de remoción de plomo por intercambio iónico.....	62
Figura 17.Efecto del pH inicial en la cinética de remoción $q=$ mg de metal por gramo de zeolita como adsorbato.....	63
Figura 18. Influencia de la masa del adsorbente en la remoción del hierro.....	64

Figura 19. Influencia del tamaño de partícula del adsorbente en el proceso de remoción del hierro.	65
Figura 20. Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción de metales pesados.....	66
Figura 21. Cantera zeolitas naturales distrito de Yura- Arequipa- Perú.....	75
Figura 22. Plano de Ubicación de los puntos de muestreo en las canteras de zeolitas naturales-Yura- Arequipa-Perú.....	76
Figura 23. Tamaño de muestra -Partición de muestras.....	77
Figura 24. Zona de toma de muestra del agua superficial carretera Canta km. 74,5.	77
Figura 25. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 1 mm y 400 um.	96
Figura 26. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 100 um y 50 um.....	97
Figura 27. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 20 y 10 um.	97
Figura 28. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 5 um y 2 um.	98
Figura 29. Espectro zeolita Natural por espectroscopia de Energía dispersiva.	98
Figura 30. Morfología de la zeolita Natural después de adsorción de Plomo de 200 um y um.....	100 99
Figura 31. Espectro zeolita natural después del proceso de adsorción de plomo.	100
Figura 32. Influencia del pH de la solución en el porcentaje de remoción.	103
Figura 33. Cinética de remoción del plomo a pH= 5.	104
Figura 34. Influencia del pH de la muestra de agua en la cinética de remoción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	105
Figura 35. Velocidad de remoción de plomo a diferentes concentraciones de solución (zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú).....	105
Figura 36. Influencia del pH de la solución en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	106

Figura 37. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.....	108
Figura 38. Influencia del tamaño de partícula en la cinética de Adsorción de plomo por la zeolita natural.	109
Figura 39. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.	111
Figura 40. Influencia de la masa del adsorbente en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	113
Figura 41. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.	115
Figura 42. Influencia de la concentración de la solución en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	117
Figura 43. Influencia de la concentración de plomo en el porcentaje de remoción en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales.....	118
Figura 44. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.	120
Figura 45. Isotherma de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	121
Figura 46. Isotherma (lineal) de adsorción de Langmuir, de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	122
Figura 47. Isotherma (lineal) de adsorción de Freundlich del plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	122
Figura 48. Distribución de datos y valores críticos del porcentaje de remoción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.....	125
Figura 49. Grafica de distribución y valores críticos (Tamaño muestra 36 y $\alpha= 0,05$).	128
Figura 50. Calidad del agua superficial tratada con zeolita natural para uso de consumo humano	130

Resumen

Los ríos de las cuencas altas y medias altas de nuestro país; se encuentran contaminadas con metales pesados superando los estándares de calidad ambiental. En este contexto la utilización de zeolitas naturales como adsorbentes de estos contaminantes son una alternativa de solución, especialmente en las zonas altoandinas donde las comunidades consumen agua directamente del río o de pozo sin tratamiento alguno.

El Trabajo consistió en la determinación del potencial de remoción de la zeolita natural de la zona de Yura-Arequipa Perú, a ser utilizada en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo, iniciándose el estudio con la evaluación de la morfología, composición y capacidad de intercambio catiónico, así como la capacidad de adsorción y potencial de remoción del plomo presente en las aguas contaminadas.

Los resultados reportaron que las zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa son aluminosilicatos de alta porosidad con una relación Si/Al: 3,347 y una capacidad de intercambio catiónico de 0,293 meq de metal/g de zeolita; las isothermas de adsorción se ajustaron al modelo de Langmuir, con una constante de correlación $R^2 = 0,9825$ y una capacidad de adsorción de 3,55 mg Pb^{2+} /gramo de zeolita, siendo el pH óptimo de remoción de 5 y un potencial de remoción del 98 %; características que hacen de este adsorbente un agente seguro para la remoción del plomo presente en aguas superficiales contaminadas.

Palabras claves: Zeolitas naturales, metales pesados, adsorción, remoción.

Abstract

Natural zeolites are aluminosilicates, microporous materials of great cation exchange capacity, the application of these low-cost natural minerals is an alternative for the removal of heavy metals present in surface waters, especially in the upper middle basins of the rivers of our country; High Andean areas where communities consume water directly from the river or well without any treatment.

The present work consisted in the determination of the removal potential of the natural zeolite from the area of Yura-Arequipa Perú, to be used in the treatment of water contaminated with lead, beginning the study with the evaluation of morphology, composition and capacity of cation exchange, as well as the adsorption capacity and removal potential of lead present in contaminated water.

The results reported that the natural zeolites in the Yura-Arequipa area are high porosity aluminosilicates with a Si / Al ratio: 3,347 and a cation exchange capacity of 0,293 meq of metal /g of zeolite; the adsorption isotherms were adjusted to the Langmuir model, with a correlation constant $R^2 = 0,9825$ and an adsorption capacity of 3,55 mg Pb^{2+} / gram of zeolite, with the optimum removal pH of 5, with a removal potential of 98%; characteristics that make this adsorbent a safe agent for the removal of lead present in contaminated surface waters.

Keywords: Natural zeolites, heavy metals, adsorption, removal.

I Introducción

Los metales pesados es uno de los grandes problemas ambientales a nivel mundial; cuando estos son descargados a los cuerpos receptores, causan la degradación de los recursos naturales, así como de las diferentes formas de vida, por ser acumulativos y no biodegradables.

El plomo es un metal de uso industrial muy toxico y al estar dispuestos en cuerpos de agua causa serios trastornos a la salud humana; la agencia de protección ambiental (EPA), lo ha clasificado como uno de los metales más peligrosas para la salud estableciendo el límite máximo permisible de plomo en agua potable de 0,001 mg/L; asimismo el reglamento de la calidad de agua para consumo humano del Perú, establece como límite máximo permisible 0,01 mg/L de Plomo.DS.N°031-2010-SA (MINSa, 2011).

Las cuencas altas, medias altas y bajas de los ríos de nuestro país; se encuentran contaminadas con metales pesados como (plomo, arsénico y cadmio); superando los estándares de calidad ambiental, en lo que corresponde a la categoría I (Poblacional y recreacional), aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.subcategoría A1: aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección; (MINAM, D.S. 004-2017, 2017).

Las zeolitas naturales son cristales minerales de aluminosilicatos hidratados que contienen cationes alcalino o alcalino- térreos, con canales que tienen alta capacidad de intercambio catiónico y de hidratación sin alterar su estructura porosa tridimensional, (Paredes, Ramirez, Osuna, Alamilla, & Madujano, 2013). Su naturaleza cristalina asegura que la abertura de los poros sea uniforme en el cristal y puede discriminar el paso de

moléculas a través de ellos, con diferencias menores de 0.1 nanómetros nm; por esta característica las zeolitas son conocidas como “tamices moleculares”, (Payra & Dutta, 2003). En este contexto el objetivo fue evaluar el potencial de remoción de la zeolita natural de Yura-Arequipa Perú del plomo presente en las aguas contaminadas, para su posterior aplicación en las zonas de las cuencas medias altas de nuestro país, donde el poblador de la zona consume agua sin tratamiento alguno.

El resultado del trabajo nos permite contar con una alternativa de adsorbente de bajo costo a ser utilizado en tratamiento de aguas contaminadas con plomo en las zonas altoandinas, en las comunidades donde las personas consumen agua directamente del río o de pozo sin tratamiento alguno; evitando la intoxicación por plomo y el impacto generado por este metal en la población.

1.1 Planteamiento del Problema

Los metales pesados es uno de los grandes problemas ambientales a nivel mundial; cuando estos son descargados en los cuerpos receptores, causan la degradación de estos recursos naturales, así como de las diferentes formas de vida, por ser acumulativos y no biodegradables.

El plomo es un metal de uso industrial muy toxico y al estar dispuestos en los cuerpos de agua, causa graves trastornos a la población que la consume; la agencia de protección ambiental (EPA), lo ha clasificado como uno de los metales más dañinos para la salud estableciendo el valor máximo permisible de plomo en agua potable de 0,001 mg/L; asimismo el reglamento de la calidad de agua para consumo humano del Perú, indica que el límite máximo permisible es de 0,01 mg/L de Plomo.DS.N°031-2010-SA (MINSA, 2011, pág. 40).

Las cuencas altas, medias altas y bajas de los ríos de nuestro país; se encuentran contaminadas con metales pesados como (plomo, arsénico y cadmio); superando los estándares de calidad ambiental en lo que corresponde, “Categoría I (Poblacional y recreacional), aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.subcategoría A1: aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección”, (MINAM, D.S. 004, 2017, págs. 1, 5).

Las zeolitas naturales son cristales cuya estructura principal está constituida por silicio- aluminio que contienen cationes intercambiables, alcalino o alcalino- térreos, con canales que permiten el intercambio catiónico y de hidratación sin alterar su estructura

porosa tridimensional, (Paredes, Ramirez, Osuna, Alamilla, & Madujano, 2013, pág. 4). “Su naturaleza cristalina asegura que la abertura de los poros sea uniforme en el cristal y puede discriminar el paso de moléculas a través de ellos, con diferencias menores de 0.1 nanómetros nm; por esta característica las zeolitas son conocidas como tamices moleculares”, (Payra & Dutta, 2003, págs. 5-24).

En este contexto el objetivo fue evaluar el potencial de remoción de la zeolita natural de Yura-Arequipa Perú del plomo presente en las aguas contaminadas, para su posterior aplicación en las zonas de las cuencas medias altas de nuestro país, donde el poblador de la zona consume agua sin tratamiento alguno.

El resultado del trabajo nos permite contar con una alternativa de filtro de bajo costo a ser utilizado en tratamiento de aguas contaminadas con plomo en las zonas altoandinas, en las comunidades donde las personas consumen agua directamente del río o de pozo sin tratamiento alguno; evitando la intoxicación por plomo y el impacto generado por este metal en la población.

1.2 Descripción del problema

Los metales pesados como el arsénico, cadmio, plomo y mercurio son considerados como los más dañinos para la salud, por su alta toxicidad y ser acumulativos en organismos vivos. El plomo es un problema de riesgo ambiental, aun en niveles trazas es muy tóxico y al estar presente en los cuerpos de agua, causa serios problemas de salud en la población que la consume. Afecta el sistema nervioso central en niños e interfiere

con el metabolismo del calcio por inferencia con el metabolismo de la vitamina D. Concentraciones sanguíneas con plomo de 30 ug/mL o mayores generan una disminución del cociente intelectual en los niños. Estudios epidemiológicos indican que la exposición a este metal afecta el desarrollo mental en los niños, siendo estos más susceptibles que los adultos. Ha sido clasificado, como uno de los compuestos inorgánicos altamente peligroso para el ser humano. La organización mundial de la salud (OMS), le dio un valor de referencial al plomo de 0,01mg/L, (OMS., 2006, págs. 312,313).

La contaminación de las aguas superficiales por metales pesados en nuestro país, es causada principalmente por vertimientos industriales, relaves mineros y pasivos ambientales en la cuenca alta y media como se observa en la Tabla 1. Dicha contaminación degrada la calidad del agua superficial y limita su uso; por lo que es necesario aplicar algún tipo de tratamiento que permita reducir los contaminantes y hacerla apta para el consumo humano como corresponde a las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable, (INEI., 2016, págs. 14,16).

Tabla 1
Inventario de pasivos ambientales mineros en el Perú

Pasivo ambiental minero	
Año	inventariado
2006	850
2010	5557
2011	6855
2012	7576
2013	8206
2014	8571
2015	8768* proyectado

Fuente: (MINEM, 2016, págs. 11,12)

Nota:

- Inventario Nacional 2014, existían 8571 pasivos, de ellos el 50% (4292 pasivos) muestran la calificación de muy alto y de alto riesgo, (MINEM, 2016, págs. 11,12).
- De los cuales el 59% (2539 pasivos) de pasivos de muy alto y alto riesgo, están siendo considerados en proyectos de remediación por el estado. (MINEM, 2016, págs. 11,12).
- El Estado entre el 2010 al 2014 ha intervenido para la remediación de 1578 pasivos de muy alto y alto riesgo en diferentes regiones del País, (MINEM, 2016, págs. 11,12).

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), en la cuenca del río Rímac, que empieza en la sierra limeña y desemboca en el mar del Callao, existen 17 relaves mineros formales donde se guardan toneladas de arsénico, plomo, cadmio, aluminio y otros residuos mineros; de las cuales, once se encuentran en explotación, mientras que los seis restantes están en proceso de cierre. En efecto, algunos relaves resultan más peligrosos que otros. Mientras que unos se ubican a más de cuatro

mil metros de distancia del río Rímac, otros están a menos de cinco metros, como se observa en la Figura 1, (Leyton, 2017, págs. 18,19).



Figura 1. Relaves con tóxicos de minería en el cerro Tamboraque.
Fuente: (Municipalidad, 2013, pág. 11)

En la cuenca alta del río Rímac, se ubican los principales centros mineros de cobre, plomo, zinc, oro, plata y antimonio. Las empresas mineras, Los Quenuales S.A.- Unidad Casapalca; Volcán Compañía Minera S.A.- Unidad Ticlio; Compañía Minera San Juan - Perú S.A; Compañía Minera PERUBAR S.A. - Unidad Rosaura; parte de sus efluentes son vertidos directamente al río o en canchas de relaves de minerales, que se ubican al margen del río o de la quebrada más próxima. Durante la época de avenidas, estos pasivos son erosionados y arrastrados por las lluvias al río, contaminándolo, como podemos observar en las Figuras 2 y 3, (DIGESA, 2011a, pág. 50).



Figura 2. Bocamina abandonada con flujo de agua, Cía minera Germanio Río Auri - cuenca del río Rímac.

Fuente: (ANA., 2011, pág. 5).



Figura 3. Pasivos mineros en la laguna de Pacococha, cabecera de la Cuenca de Aruri 28-06-2012.

Fuente: (Municipalidad, 2013, pág. 12)

Según la evaluación de metales pesados realizado por DIGESA; comprendida entre la bocatomas de la planta de tratamiento de la atarjea de SEDAPAL y la salida de la

laguna Ticticocha , se observan puntos críticos, siendo uno de ellos la estación de monitoreo 6A ubicada a la altura del puente Tamboraque II- Central Hidroeléctrica de Huanchor que se muestra en la Figura 4, observándose una concentración de 0,381 mg/L de plomo, superando los estándares de calidad de la categoría1, subcategoría A2: (por lo que requieren un tratamiento diferente al tratamiento convencional para su potabilización), (DIGESA, 2011a, pág. 50).



Figura 4. Estación de monitoreo E-6a: río Rímac, central hidroeléctrica.
Fuente: (DIGESA, 2011a, pág. 50)

El Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima Metropolitana (SEDAPAL), reportó que la concentración de plomo (Pb) presente en el río Rímac; para el mes de febrero fue de (0,540 mg/L) para el 2014 y de (1,93 mg/L) para el 2015 como se muestra en la Figura 5, (INEI, 2015, págs. 12-14).



Figura 5. Concentración de plomo en el río Rímac 2012- 2015.
Fuente: SEDAPAL, citado por, (INEI, 2015, págs. 12- 14)

Asimismo las concentraciones de plomo para los meses en el mes de enero fueron de 0,80 mg/L para el 2014; 0,240 mg/L para el 2015 y 0,030 mg/L para el 2016, cómo se indica en Figura 6 (INEI., 2016, págs. 14-16).

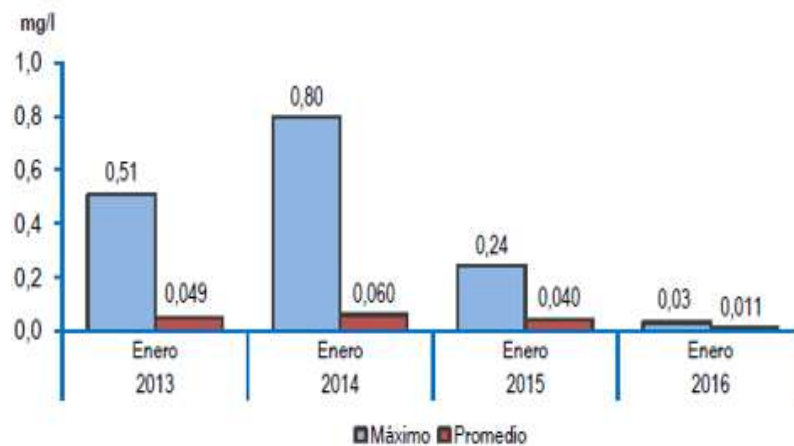


Figura 6. Concentración de plomo en el río Rímac 2013- 2016.
Fuente: (INEI., 2016, págs. 14-16)

La evaluación de riesgos del 2011, realizada por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) (Programa Nacional de Vigilancia de la calidad de los Recursos

Hídricos); nos muestra que las estaciones E-08, E-8A y E-09, presentan alto riesgo de contaminación por plomo a lo largo de la cuenca del Chillón, existiendo en la estación E-07 un riesgo moderado como se muestra en las Figura 7, (DIGESA., 2011b, pág. 16).

Como podemos observar de la información presentada por el INEI como la DIGESA, nos reporta que las aguas de los ríos Rímac y del río Chillón de la cuenca media alta hacia abajo, superan los estándares de calidad ambiental, en lo que corresponde a la categoría I (aguas destinadas para la producción de agua potable); subcategoría A1: (aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección), (MINAM, D.S. 004, 2017, págs. 10,11).

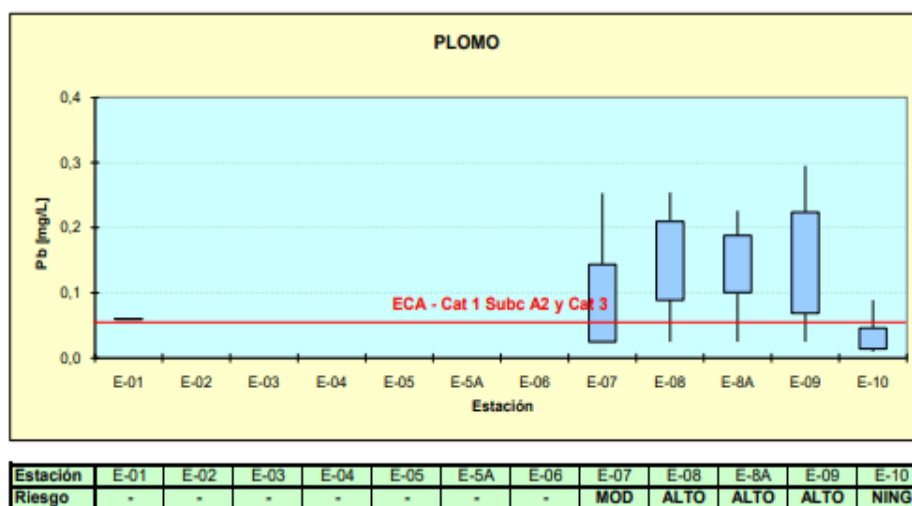


Figura 7. Niveles de concentración de plomo en la cuenca del río Chillón.

Leyenda:

- | | |
|---------------------------------|---|
| E01: Puente Huaros | E02: Km 90 Carretera Lima-Canta |
| E03: km 79 Carretera Lima-Canta | E04: Puente Magdalena |
| E05: Puente Trapiche | E05A: Canal regadío antes de planta SEDAPAL |
| E06: Puente Chillón, Pan. Norte | E07: Límite con San Diego margen derecha |
| E08: A.H. Mariano Ignacio Prado | E08A: Puente Chillón Av. Néstor Gambeta |
| E09: A.H. Márquez | E10: Línea de playa, 200 m de desembocadura |

Fuente: Evaluación de riesgos en el Río Chillón 2011 (DIGESA., 2011b, pág. 16)

El estudio realizado sobre la calidad del agua en el sector San Mateo de Huanchor; (Cuenca del Río Rímac), concluye que existen elementos metálicos como (cadmio, arsénico, plomo, hierro y manganeso), que sobrepasan los estándares de calidad ambiental, por lo que se requieren técnicas de tratamiento alternos, efectivos y de bajo costo a ser aplicables en zonas de riesgo. Los resultados del monitoreo de niveles de exposición por metales pesados (Pb), reportaron que la evaluación realizada a 269 personas el 66%, se encontraban por encima del valor permisible-OMS; en lo que corresponde a la contaminación por plomo, lo que se evidencia en las diversas enfermedades que presenta la población de la zona, (Calla, 2010, págs. 132-149).

Las zeolitas naturales, son aluminosilicatos hidratados que poseen una alta porosidad y propiedades fisicoquímicas que permite las reacciones fisicoquímicas de intercambio iónico en la superficie del cristal. Estas cavidades de los cristales contienen cationes metálicos intercambiables como calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro entre otros que se presentan coordinados en la estructura cristalina y pueden ser remplazados por otros iones como los metales pesados, (Sagayo, 2015, pág. 71).

A nivel mundial existen más de 50 tipos de zeolitas naturales, en nuestro país no se cuenta con una base de datos de canteras que comprendan a las zeolitas naturales, más aún no están identificadas, ni se conoce sus propiedades fisicoquímicas ni capacidades como material filtrante a ser utilizado en la remoción de metales pesados.

En este contexto se estudiaron las zeolitas naturales ubicadas en el distrito de Yuraprovincia de Arequipa- departamento de Arequipa- Perú, ubicado en la vertiente oriental

de los volcanes Chachani - Misti e irrigado por el río Yura, que se une al río Chili formando el río Vítor. Siendo la temática del presente estudio evaluar la morfología, presencia de cationes intercambiables, la capacidad de adsorción y el potencial de remoción de plomo de la zeolita natural de la zona de Yura - Arequipa Perú.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema General

¿Cuál es el potencial de remoción de la zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú; utilizada como filtro en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo?

1.3.2 Problemas específicos

1. ¿De qué manera la composición fisicoquímica de las zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa-Perú, influyen en el potencial de remoción de plomo en tratamiento de aguas contaminadas?
2. ¿Qué factores fisicoquímicos, influyen en la cinética de remoción del plomo, de las aguas tratadas mediante zeolita natural de la zona Yura-Arequipa-Perú?
3. ¿Cuál será la capacidad de adsorción de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú, utilizada como medio filtrante en el proceso de tratamiento de aguas contaminadas con plomo?

4. ¿Cuál es la eficiencia de remoción de plomo de aguas contaminadas, de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú?

5. ¿En qué medida el agua superficial contaminada con plomo, tratada con zeolita natural peruana de la zona Yura- Arequipa- Perú como medio filtrante; cumple con el ECA- categoría I- subcategoría A1?

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedentes Internacionales

... “Las zeolitas son materiales adecuados para el tratamiento de agua con metales pesados, dada su gran capacidad de intercambio catiónico, así como su gran afinidad por estos tipos de metales. Son económicos, fáciles de conseguir y se podrían adaptar a otros sistemas de tratamiento”, (Sagayo, 2015, pág. 70).

Las pruebas realizadas de partículas modificadas con iones de Fe (III) menores a 0,043 mm, dieron como resultado el incremento de adsorción de plomo de 66 mg/g a 133mg/g. Asimismo la determinación de cationes intercambiables, muestra que la cantidad adsorbida de plomo es casi igual a la cantidad de cationes intercambiables demostrándose que el intercambio iónico es el único mecanismo de remoción de plomo en aguas contaminadas, (Kragovic, Stojmenovic, Petrovic, Loredo, & Ristic, 2019, págs. 286-293).

El estudio realizado sobre el intercambio de iones metálicos presentes en muestras acuosas con zeolitas naturales colectadas en Villa Reyes, San Luis de Potosí, México; demostró que la remoción de iones metálicos (Pb^{2+} , Cd^{2+} ; Zn^{2+}), fue de 28,83 a 72,45% para el plomo, de 15,41 a 34,31% para el cadmio y de 3,77 a 23,56% para el Zn y comparando los porcentajes de remoción demuestran que la selectividad de intercambio de las zeolitas por (Pb^{2+} y Cd^{2+}), decrece en función a la composición química de la zeolita; en el orden siguiente: TAM 2 > TAM1 > Crem > AK como se muestra en la Tabla 2, (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001, págs. 129-136).

Tabla 2
Composición química y propiedades fisicoquímicas de muestras de zeolitas

Zeolita	R.M. Si/Al	Al (% W)	Fe (%W)	Área Supf. m ² /g	Vol. Poro cm ³ /g	Diámetro Poro (nm).
AK	6,123	5,880	0,800	11,4	0,021	7,26
Crem	5,510	5,879	1,300	26,1	0,058	8,86
TAM-1	7,120	5,117	0,628	22,0	0,052	9,49
TAM-2	6,898	5,072	0,650	22,2	0,050	8,95

Nota: Muestras de zeolitas: AK, Crem, TAM-1, TAM-2
Fuente: (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001)

Los estudios realizados por Motsi para evaluar la capacidad de las zeolitas naturales en la eliminación de metales pesados como (Fe, Cu, Zn y Mn) provenientes del drenaje ácido de mina (AMD), mostraron que la zeolita natural remueve de manera selectiva los metales pesados como ($Fe^{3+} > Zn^{2+} > Cu^{2+} > Mn^{2+}$); determinándose que las remociones más altas de metal se lograron incrementando la velocidad de agitación, el pH de la solución; la reducción del tamaño de partícula y el tratamiento térmico; lográndose

valores de remoción del 71-99% para el Fe y 97-99 % para el Cu, (Motsi, 2010, págs. 80-260).

Las investigaciones realizadas para evaluar la eficiencia de la zeolita del tipo faujasita en la eliminación de metales pesados de drenaje ácido de mina (AMD), reportaron que la eficiencia para la remoción de metales pesados depende del material adsorbente y de la dosis aplicada. Asimismo, indica que la selectividad de la faujasita para la remoción va en el orden decreciente: Fe > As > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr. La clinoptilolita natural mostró ser efectiva hasta un 75% de eficiencia de absorción en algunos casos. La selectividad para esta zeolita natural fue Pb > Cu > Cd > Zn > Cr > Co > Ni, variando su eficiencia de absorción de 75% para Pb y 45% para Ni, (Rios, Appasamy, & Clive, 2011, págs. 126-134).

Estudios realizados con zeolitas sintéticas, utilizando las cenizas de las plantas carboeléctricas, con el fin de separar el plomo y el manganeso de efluentes acuosos contaminados; demostraron que las zeolitas preparadas removieron en un 20% en manganeso mientras que las comerciales fueron de 4% y para el caso de la remoción de plomo fue de un 80% para las zeolitas preparadas frente a un 20 % de las comerciales, (Arango, Perez, Gochi, & Sánchez, 2011, págs. 5-13).

Estudios realizados demostraron, que a partir del caolín calcinado es factible conseguir zeolita meta estable tipo A; el cual tiene gran capacidad de intercambio iónico dada su relación proporcional Si/ Al; asimismo observaron que cuando la relación Si/Al aumenta; la capacidad de intercambio iónico y la actividad catalítica disminuyen;

mientras que la estabilidad térmica y la resistencia al ácido se incrementan al igual que las características superficiales hidrofóbicas e hidrofílicas, (Villavicencio & Fernández, 2009, págs. 95-107).

La evaluación de una muestra acuosa formada de licor mixto de la PTAR y una disolución de metales pesados a concentración similar a los encontrados en los lixiviados de biosólidos; tratados con una batería de filtros empacados de zeolita clinoptilolita; demostraron que las zeolitas presentan una alta eficiencia en la separación de metales pesados en condiciones controladas de caudal, pH y temperatura ambiente. Los resultados mostraron que los filtros removieron un gran porcentaje de los metales pesados presentes en la solución, independientemente de la concentración inicial de esta; observándose mayor eficiencia en la separación del mercurio, (Acevedo, Builes, Ordoñez, & López, 2011, págs. 31-42).

Los resultados de las pruebas realizadas, describieron la adsorción del CO₂ en poros de zeolita tipo erionita natural, intercambiada con soluciones acuosas de Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ de sales a diferentes concentraciones, tiempo y temperatura de tratamiento; observándose que la creación de poros emergentes incremento la capacidad de adsorción del CO₂ y que la presencia de Na⁺ en el microporo de entrada, produce una mayor adsorción en las nanocavidades, en el área externa de las zeolitas intercambiadas con iones. Asimismo, demostraron que el Na⁺ bien distribuido es favorable y accesible para la adsorción de nitrógeno, (Hernández, y otros, 2015, págs. 33-41).

Estudios realizados con zeolita sintética tipo faujasita Na-X; aplicada en aguas residuales domésticas y en aguas sintéticas removieron material contaminante en orden descendente: dureza (Ca^{2+} y Mg^{2+}) > NH_4^+ > material coloidal (fosfatos, nitrógeno amoniacal, sulfatos, alcalinidad y dureza presentes en las aguas residuales domésticas); observándose que preferentemente removió cationes en el proceso de adsorción lo cual muestra el carácter básico de la zeolita, (Manrique, y otros, 2015, págs. 114-123).

Las evaluaciones de materiales filtrantes como arena, carbón activado y zeolita en agua residual, a ser utilizada en la agricultura; mostraron que el carbón activado tiene la capacidad de remover el boro a concentraciones por debajo de 0,75 mg/L. El uso de la arena, proveniente de la región, por el alto contenido de sodio y arsénico, limitó su potencial como material filtrante. En cambio la zeolita natural, mostró ser la mejor alternativa para remover la salinidad del agua, reflejándose en la conductividad eléctrica, la que se redujo hasta 20 % sin alterar los otros parámetros de calidad de agua, (Vera, Rojas, Chavez, & Arriaza, 2015, págs. 5-19).

Estudios realizados con una zeolita virgen de composición química (75,97% SiO_2 ; 4,30% Al_2O_3 ; CaO 2,40%; Na_2O 1,55%; Fe_2O_3 0,97%; K_2O 0,87%; MgO 0,37%); con una relación $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 17,7$; y un 55,65 % de un tamaño de partícula de malla (20) de 0,84 mm y 34,39 % de malla (40) de 0,42 mm; demostraron que el calcio es el metal que tiene mayor capacidad de intercambio con respecto a otros cationes. La alcalinidad es el único parámetro que se mantiene permanente en el proceso de adsorción, dado que los iones (aniones) responsables de la alcalinidad, no compiten por los sitios activos en el

proceso de adsorción, lo que confirma el carácter negativo de la carga superficial que favorece la adsorción de cationes, (Cuchimaque, Vargas, & Reyes, 2013, págs. 24-44)

Los autores identificaron como chabasita el tipo de zeolita natural, del yacimiento mexicano La Palma, Divisaderos, Sonora y evaluaron su potencialidad para remover plomo en aguas contaminadas; las pruebas demostraron que la zeolita en su forma natural tiene los iones de intercambio como Ca^{2+} , Na^+ y Mg^{2+} suficientes para ser utilizado como medio adsorbente de intercambio iónico en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados; determinándose un tiempo de contacto para lograr el equilibrio de 500 minutos, parámetro necesario para determinar el tiempo de residencia en las unidades instaladas, (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013, págs. 201-210).

1.4.2 Antecedentes Nacionales

Los estudios de biosorción de plomo (II), en pectina reticulada de cascará de naranja, demostraron que el coeficiente correlacional no lineal del modelo de Langmuir es mayor al coeficiente correlacional del modelo de freundlich, lo que confirma la gran afinidad de las sustancias pécticas por el plomo II, demostrando que la sorción química ocurre en la monocapa de la superficie, siendo la isoterma de Langmuir la que más se ajusta para interpretación de estos datos como podemos observar en la Tabla 3 y la Figura 8. Asimismo indican que la interacción entre la pectina y el plomo posiblemente podría ser por la naturaleza coulombica por ser el plomo (II) un ácido blando, siendo los oxígenos bases duras y los grupos carboxilato de las unidades del ácido galacturónico, (García, Borja, Guzmán, Yipmantin, & Maldonado, 2013, págs. 256-260).

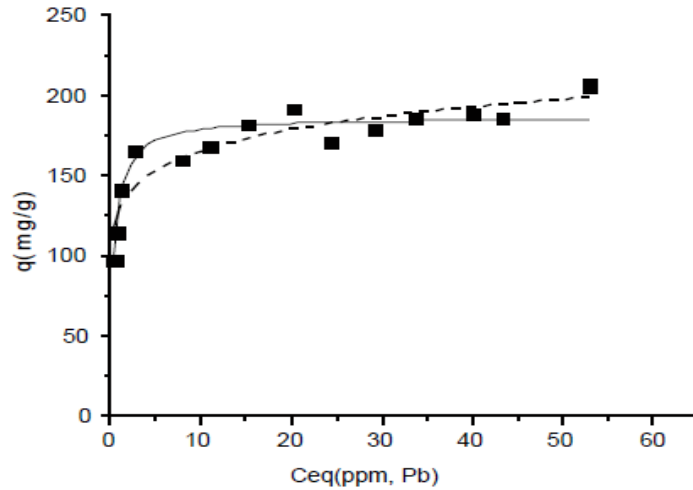


Figura 8. Isotherma de adsorción del plomo: a) Modelo Langmuir (Línea Continua) b) Modelo Freundlich (Línea Punteada).
Fuente: (García, Borja, Guzmán, Yipmantin, & Maldonado, 2013)

Tabla 3
Parámetro de ecuaciones de Langmuir y Freundlich (Tamaño de partícula 0-125um)

Isotherma de Langmuir			Isotherma de Freundlich		
q _{max} (mg/g)	b(L/mg)	R ²	K ^a	n	R ²
185,881	2,476	0,8991	128,218	9,070	0,8643

Unidades de K: $\text{mg}^{1-1/n} \text{g}^{-1} \text{L}^{1/n}$

Fuente: (García, Borja, Guzmán, Yipmantin, & Maldonado, 2013)

Las pruebas realizadas de adsorción de arsénico con zeolitas naturales demostraron que la isoterma de adsorción de Freundlich con un valor de ($R^2=0,9972$), representa mejor el proceso de adsorción del arsénico con zeolita naturales que la isoterma de Langmuir por presentar esta un valor muy debajo de la unidad ($R^2 = 0,4567$), lo cual demuestra la formación de una doble capa difusa en la superficie del adsorbato. Asimismo demostraron que el pH es un parámetro a tener en consideración durante el proceso de separación, dado

que la eficiencia de remoción varía según el pH de la solución a tratar, (Catacora & Marín, 2015, págs. 98-108).

La evaluación del comportamiento isotérmico de adsorción de plomo y cadmio en efluentes líquidos, utilizando como adsorbente borra de café, demostraron que el comportamiento de adsorción del plomo se ajusta en gran medida a la isoterma de Freundlich considerando un valor de $R^2 = 0,8888$, que resultó más cercano a la unidad que el de Langmuir que fue de 0,7904. Asimismo concluyó que el comportamiento isotérmico es diferente a la de la borra de café cuando este es utilizado como adsorbente en la remoción de plomo y de cadmio, lo que se fundamenta en la diferencia de sus radios iónicos hidratados, siendo el del plomo más pequeño pero más denso que del cadmio, (Angeles, 2011, págs. 5-13).

1.5 Justificación e importancia de la investigación

1.5.1 Teórica

Las zeolitas naturales por su composición mineral de aluminosilicatos hidratados y cationes alcalinos – alcalinotérreos poseen una gran capacidad para remover metales pesados de soluciones acuosas entre ellos el plomo, metal que aun en concentraciones trazas es muy peligroso y al estar dispuesto en aguas superficiales, causa serios problemas en la salud de la población. Estos minerales son recursos naturales que están en equilibrio con el ambiente, de fácil operación, adaptabilidad y regeneración. La caracterización de la zeolita nos permitirá identificar sus propiedades fisicoquímicas y la factibilidad de su uso como filtro en la separación del plomo de las aguas contaminadas. El estudio cinético y de equilibrio realizado en este trabajo, nos permitirá, determinar su capacidad de

adsorción frente a los metales pesados y permitirá en adelante desarrollar tecnologías alternas y efectivas en el tratamiento de aguas superficiales y de pozo contaminadas con plomo.

1.5.2 Práctica

Los resultados del estudio permitirán proponer sistemas de tratamiento utilizando como medio filtrante las zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa, para remoción de plomo de las aguas superficiales de la cuenca medio alta del territorio peruano, donde la población consume agua directamente del río, con solo un solo proceso de desinfección.

1.5.3 Social

El resultado del trabajo permitirá contar con una alternativa de tratamiento utilizando como medio filtrante las zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa- Perú, en la remoción del plomo de las aguas contaminadas, sobre todo a ser utilizado en las comunidades donde las personas consumen agua directamente del río o de pozo sin tratamiento alguno; evitando la intoxicación por plomo de la población y el impacto generado por este metal en los niños.

1.5.4 Importancia

Su aplicación como medio filtrante permitirá remover el plomo de las aguas superficiales y aguas de pozo. Aguas que cumplen con las propiedades físicas, pero presentan concentraciones de metales pesados mayores a los estipulados por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA); respecto a la concentración de plomo en agua de categoría I (para uso poblacional y recreacional), aguas superficiales para la producción

de agua potable; subcategoría A1: aguas a ser potabilizadas con desinfección; cuyo ECA corresponde a 0.01 mg/L, (MINAM, D.S. 004, 2017, págs. 10,11)

1.6 Limitaciones de la Investigación

El trabajo consiste en evaluar la composición, morfología, capacidad de intercambio iónico, factores que influyen en la capacidad de adsorción, la cinética de adsorción y remoción de la zeolita natural de la zona de Yura Arequipa-Perú, en lechos por lotes, parámetros que nos permitieron conocer la capacidad de adsorción y el potencial de remoción de la zeolita natural de la zona de Yura-Arequipa, utilizada como medio filtrante en las aguas contaminadas con plomo.

La falta de equipos para determinar la morfología, composición de la zeolita y el análisis de metales pesados, lo que limita el número de pruebas a realizar por ser el costo de los análisis bastante altos en laboratorios externos.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo General

Determinar el potencial de remoción de la zeolita natural peruana utilizada como filtro en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo.

1.7.2 Objetivos específicos

1. Analizar la influencia de la composición de la zeolita natural de la zona Yura-Arequipa-Perú, en el potencial de remoción de plomo de aguas contaminadas.
2. Evaluar los factores fisicoquímicos que influyen en la cinética de remoción de plomo en aguas contaminadas, tratadas mediante zeolita natural de la zona Yura-Arequipa-Perú.
3. Determinar la capacidad de adsorción de la zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú, utilizada como filtro en aguas contaminadas con plomo.
4. Evaluar la eficiencia de la remoción del plomo presente en aguas contaminadas, utilizando como medio filtrante zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú.
5. Determinar la calidad del agua tratada con zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú, en lo que corresponde al plomo y el cumplimiento del ECA- categoría I- subcategoría A1; agua para consumo humano.

1.8. Hipótesis

1.8.1 Hipótesis General

La zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú; presenta un alto potencial de remoción de plomo en el tratamiento de aguas contaminadas.

1.8.2 Hipótesis Específicas

1. H₁: La composición fisicoquímica, de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú, determina la capacidad de adsorción, en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo.
2. H₂: Los factores fisicoquímicos (pH, tamaño de partícula, masa del adsorbente y la concentración inicial de la solución), influyen en la cinética de remoción del plomo presente en aguas contaminadas.
3. H₃: La zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú, presenta una alta capacidad de adsorción de plomo en el tratamiento de aguas contaminadas.
4. H₄: La zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú, utilizada como medio filtrante presenta una alta eficiencia en la remoción de plomo en aguas contaminadas.
5. H₅: La calidad del agua tratada con zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú, cumple con el ECA, en lo que corresponde al plomo - categoría I- subcategoría A1; agua para consumo humano.

II Marco Teórico

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 El plomo

El plomo es un metal de uso industrial muy tóxico; la agencia de protección ambiental (EPA), lo ha clasificado como uno de los metales pesados más dañinos para la salud humana, estableciendo que la máxima concentración de plomo en agua para consumo humano debe ser 0,001 mg/L; el reglamento de la calidad de agua para consumo humano del Perú, establece como límite máximo permisible de plomo en agua para consumo humano 0,01 mg/, .DS.N°031-2010-SA como se observa en la Tabla 4, (MINSa, 2011, pág. 40).

Tabla 4
Límites máximos permisibles de calidad de agua para consumo humano

Parametro	Unidad	LMP
Arsénico	mg/L As	0,010
Cadmio	mg/LCd	0,003
Plomo	mg/L Pb	0,010

Fuente: (MINSa, 2011, pág. 40)

El ministerio del Ambiente (MINAM), con decreto supremo N°004-2017-MINMAN actualiza los parámetros de calidad del agua en las diferentes categorías entre ellas la categoría 1: Categoría 1: Poblacional y recreacional a) Subcategoría A: Aguas

superficiales destinadas a la producción de agua potable las que se muestran en la Tabla 5, (MINAM, D.S. 004, 2017, págs. 10-11).

Tabla 5
Categoría 1: Poblacional y recreacional subcategoría A
Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable

Parámetro	Unidad	A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
Aluminio	mg/L	0,900	0,500	0,500
Antimonio	mg/L	0,002	0,002	0,006
Arsénico	mg/L	0,010	0,010	0,150
Bario	mg/L	0,700	1,000	1,000
Berilio	mg/L	0,012	0,040	0,100
Boro	mg/L	2,400	2,400	2,400
Cadmio	mg/L	0,003	0,005	0,010
Cromo	mg/L	0,050	0,05	0,050
Hierro	mg/L	0,300	1,000	5,000
Manganeso	mg/L	0,400	0,400	0,500
Mercurio	mg/L	0,001	0,002	0,002
Niquel	mg/L	0,070	-	-
Plomo	mg/L	0,010	0,050	0,050
Selenio	mg/L	0,040	0,040	0,050
Uranio	mg/L	0,020	0,020	0,020

Fuente: (MINAM, D.S. 004-2017, 2017)

Subcategoría A: ... “Aquellas aguas que previo tratamiento, son destinadas para el abastecimiento de agua para consumo humano” (MINAM, D.S. 004, 2017, pág. 10)

A1: ... “Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección, aguas que por sus características de calidad, reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente”, (MINAM, D.S. 004, 2017, pág. 10).

A2: “Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional, destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano, sometidas a un tratamiento convencional” (MINAM, D.S. 004, 2017, pág. 10).

A3: “Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional que incluye procesos físicos y químicos avanzados como precloración, micro y ultra filtración, nanofiltración, carbón activado, ósmosis inversa o procesos equivalentes establecidos por el sector competente”, (MINAM, D.S. 004, 2017, pág. 10).

Especies de plomo en función al pH: Una solución acuosa de una sal de Pb (II) genera iones solvatados como $[\text{Pb}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, el cual generalmente se denota como Pb^{2+} . Cuando se regula el pH en estas soluciones ya sea con una base o un ácido se producen iones complejos como: $[\text{Pb}(\text{OH})_4]^{2-}$, $[\text{Pb}(\text{OH})_3]^-$, $[\text{Pb}(\text{OH})]^+$, también genera la formación de $\text{Pb}(\text{OH})_2$ para las soluciones de Pb(II). La estabilidad de estos compuestos iónicos en solución y la correspondiente precipitación de los hidróxidos depende del pH; de los equilibrios de solubilidad y termodinámico de las especies involucradas como se puede observar en la Figura 9, (Angeles, 2011, págs. 5-13).

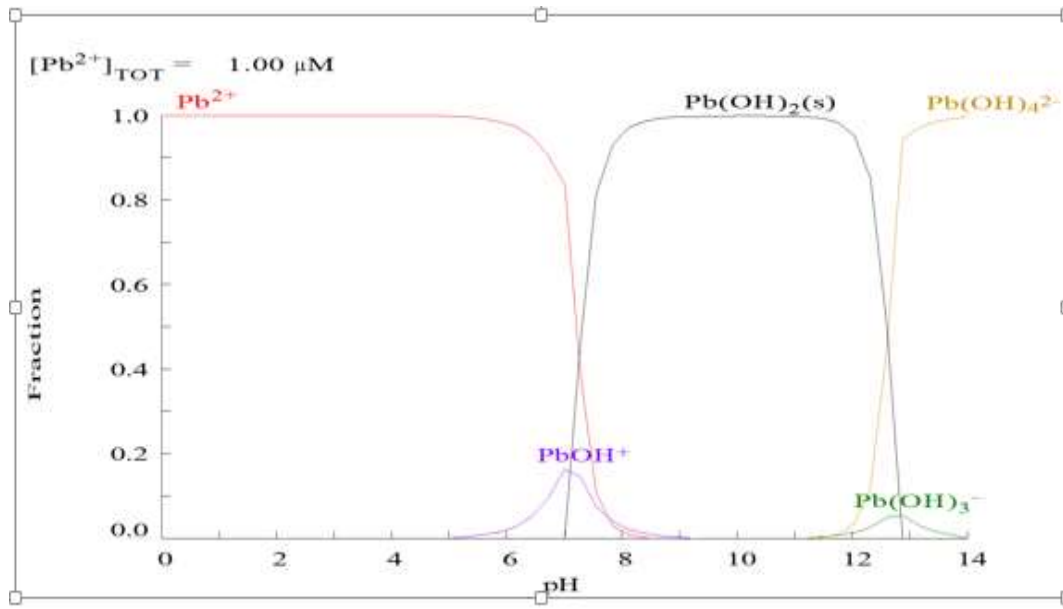


Figura 9. Especiación de Pb (II) en función al pH en solución acuosa.
Fuente: (Puigdomenech, 2010)

El valor del pH en la fase acuosa determina tanto la adsorción de aniones como de cationes, siendo el efecto diferente en ambos casos; observándose que a valores de pH superiores a 4 se ve favorecida la adsorción de cationes así mientras que la adsorción de cationes suele estar favorecida a valores de pH superiores a 4 y a valores menores a 4 se favorece la adsorción de aniones, (Tejada, Villabona, & Gárces, 2015, págs. 109-123).

2.1.2. Las Zeolitas

Las zeolitas naturales son cristales formados por aluminosilicatos hidratados que contienen cationes alcalino o alcalino- térreos, con canales que tienen alta capacidad de intercambio catiónico, sin alterar su estructura porosa tridimensional, (Paredes, Ramirez, Osuna, Alamilla, & Madujano, 2013, pág. 4).

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalino microporosos, compuestos de silicio y aluminio con una estructura tetraédrica con átomos de oxígeno que conectan con

tetraedros vecinos; la incorporación del Al^{+3} , hace que el compuesto tenga una carga negativa que permite el ingreso de cationes inorgánicos y orgánicos, para mantener la neutralidad dentro del marco general de la estructura. La composición de zeolita puede describirse mejor como una red tridimensional constituida por tetraedros de SiO_4 y AlO_4 , que comparten los átomos de oxígeno. Las zeolitas de baja relación Si/Al son hidrofílicas y las zeolitas de mayor relación son hidrofóbicas. La estructura del cristal asegura que el diámetro de los poros sea uniforme, lo que permite discriminar el paso de los cationes o aniones a través de ellos, con divergencias menores de 0.1 nanómetros nm; por ello las zeolitas son denominadas como “tamices moleculares”, (Payra & Dutta, 2003, págs. 2-24).

2.1.2.1. Origen

La palabra zeolita viene del griego zéo y líthos que significa piedra que hierve o piedra efervescente. En 1756 el sueco Barón Axel Fredrik Cronsted, descubre que un mineral de la mina de cobre sueca de Tornea; desprendía agua cuando se calentaba a la llama y cuando se enfriaba volvía a hidratarse, de manera que podía someterse a ciclos sucesivos de hidratación y deshidratación, por esta propiedad, Cronsted propuso denominarla “zeolita”, que según la lengua griega de la época se traduce como “piedra que hierve”. Están constituidas tetraedros de (SiO_4) y (AlO_4) enlazados entre sí por átomos de oxígeno, dando lugar a la formación de cavidades intracristalinas, que permite alojar agua y otros adsorbatos como cationes lo que distingue a las zeolitas de otros tectosilicatos, (García & Perez, 2003, págs. 13-26).

Las zeolitas son minerales de zonas metamórficas de grado muy bajo, denominada la llamada “facies zeolítica”. Se forman en diferentes ambientes geológicos, dándose

como alteraciones de minerales antigénicos a cierta temperatura y presión; en sistemas metamórficas y en lugares afectados por la meteorización, también se encuentran en vetas hidrotermales y en alteraciones de rocas sedimentarias cristalinas. (Morante, 2004, págs. 166-173).

2.1.2.2 Formación de una zeolita

En el proceso de formación se van generando canales de diferentes dimensiones, donde se ubican los cationes y moléculas de agua, que están conectados entre ellas a través de poros de tamaños uniformes, como se observa en la Figura 10; formándose una red tridimensional de tetraedros, donde los principales componentes son los átomos de silicio y aluminio unidos por átomos de oxígeno. Estos tetraedros se enlazan entre sí originando estructuras poliédricas, (estructuras secundarias) que se unen formando estructuras terciarias complejas, unidas entre ellas por medio de canales o poros de tamaño uniforme. Las relación silicio-aluminio así como el ordenamiento de los tetraedros, dan lugar a los diferentes tipos de zeolitas, (Gómez, 2001, págs. 21-30).

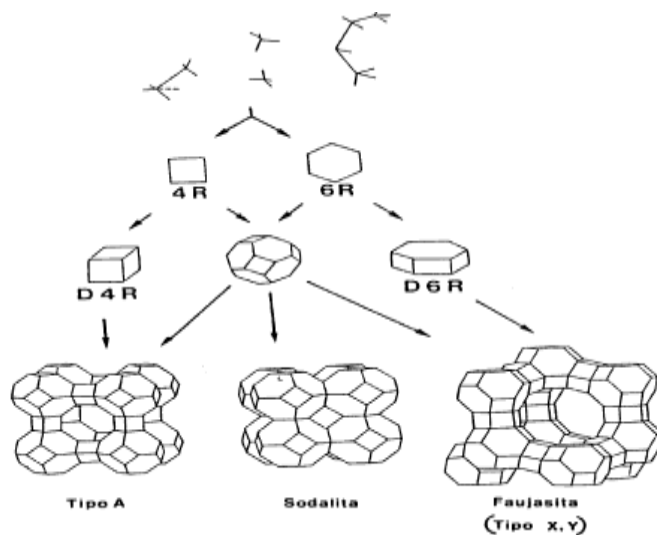


Figura 10. Proceso de formación de la zeolita.

Fuente: (Gómez, 2001)

2.1.2.3 Estructura de la zeolita

La estructura básica está conformada por átomos de silicio rodeado de 4 átomos de oxígeno; donde el Al^{3+} reemplaza al Si^{4+} generando una deficiencia de cargas positivas, que son compensadas por cationes de intercambio Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ; cationes que están unidos débilmente y se desprenden en el proceso de intercambio iónico, siendo reemplazados con cationes selectivos del entorno. En la celda unitaria del primer sistema se encuentran los cationes de intercambio; los iones dentro del primer sistema, en la celda unitaria se conocen como "cationes de intercambio", los iones del segundo sistema se denominan "cationes estructurales", porque con el oxígeno determinan la estructura del armazón tetraédrico, como se muestra en la Figura 11, (Morante, 2004, págs. 166-173).

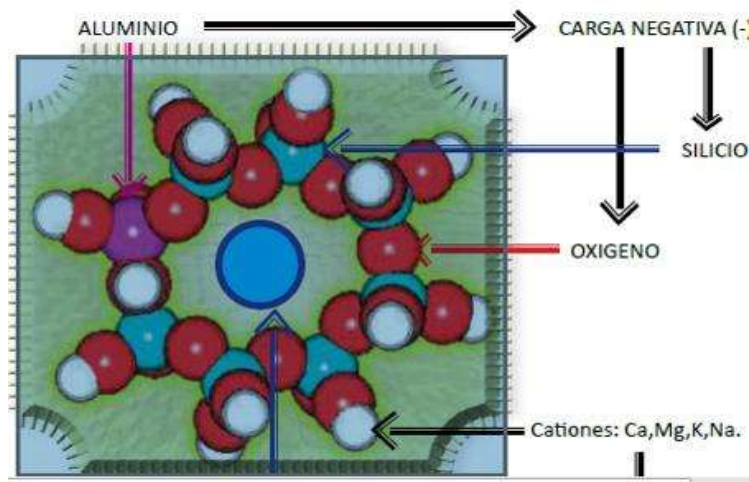
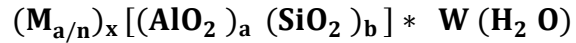


Figura 11. Estructura de zeolita.

Fuente: (Morante, 2004)

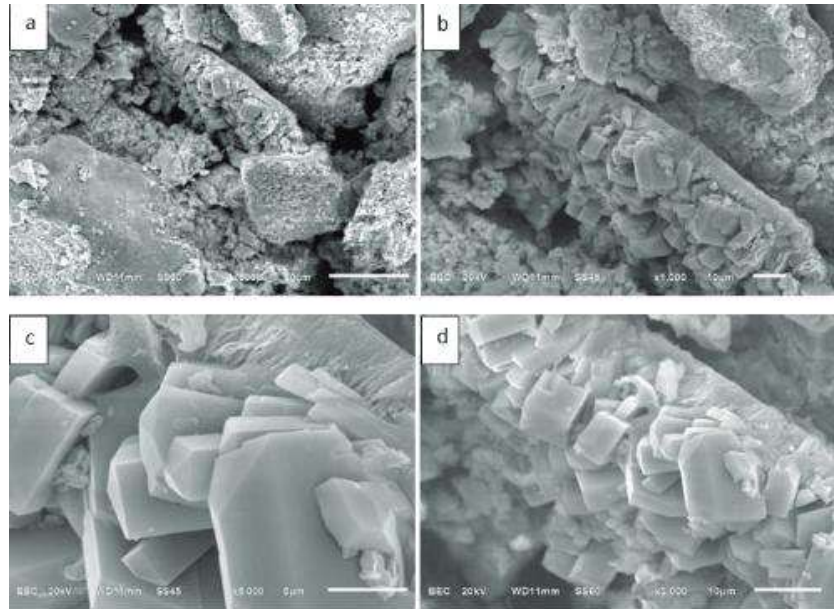
La fórmula cristalográfica de la celda unitaria:



La estructura comprende tres componentes: el armazón formado por aluminio-silicato, los espacios libres interconectados en el armazón donde se encuentran los cationes intercambiables y la molécula de agua que están en la estructura como una fase ocluida. (Flanigen, E. 1993), citado (Morante, 2004, págs. 166-173).

La relación silicio/aluminio, así como las distintas formas de coordinación de los tetraedros, forman los diferentes tipos de zeolitas, cada una de ellas presentan diferentes características físicas y químicas son de diferente selectividad catiónica, densidad y tamaño de los poros. Una de las zeolitas más utilizadas como la Clinoptilolita, presenta un volumen en 16% mayor de poros que la Analcrita; esta diferencia en propiedades nos muestra, que no todas las zeolitas, presentan las mismas características ni propiedades y que se debe conocer el material a utilizar para cada tratamiento en particular, (Chica, Londoño, & Álvarez, 2006, págs. 30-34).

Morfología de Zeolita: La microscopía electrónica muestra imágenes de mordenita a diferentes ampliaciones, donde se observa la presencia de cristales delgados en forma de placas con geometría variable Figura 12, (Ortega, y otros, 2015, págs. 65-71).



*Figura 12. Morfología Mordenita.
Fuente: (Ortega, y otros, 2015)*

Composición Química Zeolita: El estudio realizado para determinar el potencial de la zeolita natural mexicana (MXZ), reporto que su composición química expresada en masa: fue de: 49,39 % O; 0,32% Na; 0,54 %Mg; 8,39% Al; 34,51% Si; 1,23% K; 2,53 % Ca; 3,09% Fe; con una relación de Si/ Al: (4,11). Asimismo el espectro de energía dispersiva de electrones, confirma que los cationes presente en la muestra de la zeolita son: O; Mg; Na; Ca ; K; Si; Al; Fe. Con una relación de $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^{+} > K^{+}$, como se muestra en la Figura 13. Asimismo las pruebas realizadas para obtener la capacidad de adsorción de plomo de la Chavasita mexicana (MXZ), reporto una capacidad máxima de adsorción de plomo de 2,38 meq/g , siendo el modelo de Lagmuir el que mejor se ajusta a las medidas experimentales con un coeficiente de correlación de ($R^2 = 0,92$). (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013, págs. 201-210)

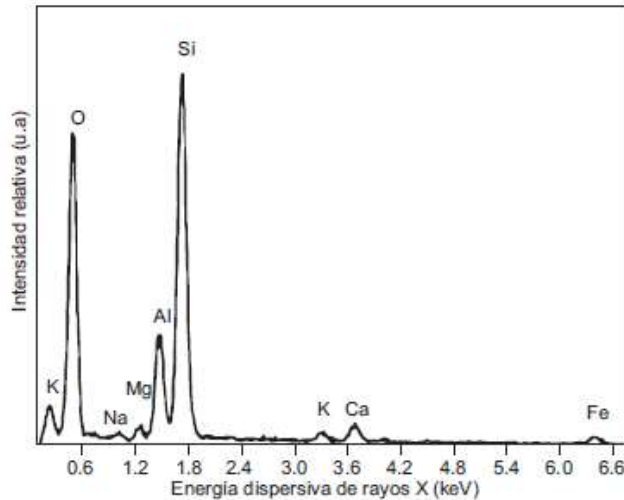


Figura 13. Espectro de energía dispersiva de electrones de la zeolita MXZ.
Fuente: (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013)

2.1.2.4 Clasificación de zeolitas

Las características estructurales de la zeolita y la microporosidad, permite la transferencia de masa entre el espacio intracrystalino y el medio circundante; la que está condicionada por la abertura de los poros, ingresando o saliendo del espacio intracrystalino, las moléculas cuyos tamaños son menores a cierto valor crítico, que varía según el tipo de zeolita; característica particular que determina el uso industrial, conocida como selectividad geométrica o de forma. Meier, W.M. 1968, citado en (Costafreda, 2011, pág. 23).

2.1.2.5 Carácter básico de las zeolitas

La sustitución en la estructura cristalina de la zeolita de un átomo como el Si^{4+} por uno de menor valencia como el Al^{3+} da lugar a la aparición de una carga negativa en la estructura que debe ser neutralizada por un protón o un catión metálico. Estas cargas generan el carácter ácido o básico de las zeolitas, siendo los átomos de oxígeno cargados

negativamente los centros básicos, mientras que el catión actúa como ácido y compensa la carga negativa de la estructura. Las variables que afectan la basicidad de la zeolita son la composición química y su estructura. Estos parámetros van a determinar la reactividad de los centros básicos en adsorción y catálisis. Los materiales más básicos serán aquellos con un mayor contenido en aluminio que se intercambien con los cationes menos electronegativos, (Gómez, 2001).

2.1.2.6 Las zeolitas como intercambiadores catiónicos

La capacidad de intercambio iónico de la zeolita es la cantidad de equivalentes de un catión retenido por una masa determinada de zeolita, que se relaciona directamente con el aluminio presente en la red zeolítica y dependiendo de la composición química del mineral, donde la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, determina la capacidad de intercambio iónico, correspondiendo una alta capacidad a una baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, (Rodríguez & Rodríguez, 1997, págs. 231-235).

La propiedad de intercambio iónico, se considera como una propiedad intrínseca de las zeolitas, propiedad que se genera debido a la sustitución isomórfica de los átomos de sílice por los de aluminio, produciéndose una carga negativa (-) en la estructura del cristal compensada con cationes intercambiables, asimismo depende de su naturaleza microporosa, dado que sus cavidades y el carácter de los cationes (carga iónica, tamaño y forma), determinan la capacidad de intercambio iónico de la zeolita, (Rodríguez & Rodríguez, 1997, págs. 231-235).

La capacidad de intercambio y selectividad del material de zeolitas por el Pb(II), depende de la composición química del mineral y los iones $[H_3O^+]$ que intervienen en la solución, estos compiten por los sitios activos con los iones metálicos en el proceso de intercambio (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001).

En la Tabla 6, demuestra que la capacidad de intercambio teórica (C.I.T) es mayor que la real (C.I.R.), dado que a) no todos los sitios activos son accesibles a todos los cationes b) no todos los cationes son intercambiables c) No todo el aluminio pertenece al esqueleto estructural de la zeolita, (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001, págs. 129-136).

Tabla 6
Capacidad de intercambio teórica y real

Ión	Zeolita	CIR (meq/g)	CIT (meq /g)
Cr⁺³	TAM 2	0,150	1,88
Pb⁺²	TAM 1	0,439	1,90
	TAM2	0, 398	1,88
Cd⁺²	TAM 1	0,338	1,90
	TAM2	0,312	1,88
Zn⁺²	TAM1	0,365	1,90

Nota: Muestras de zeolitas; TAM-1, TAM-2/ identificadas en Tabla 3
Fuente: (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001)

La capacidad efectiva (CIE), es de gran importancia práctica y se refiere “a la cantidad real de cationes intercambiables contenidos en una cantidad determinada de material, bajo condiciones experimentales específicas; valor que se debe a que algunos cationes no pueden ser removidos debido a su baja movilidad y fuerzas de unión dentro del cristal”, (Inglezakis et al., 2001), citado en (Córtez, 2007, pág. 15).

La selectividad de un adsorbente depende principalmente de la estructura de la zeolita y la naturaleza de los cationes; la que se puede atribuir a la diferencia de las fuerzas atractivas de los diferentes iones con la superficie del sólido; La clinoptilolita en su forma natural remueve eficientemente el Pb(II), donde a bajas concentraciones de plomo se alcanzó en un menor tiempo la capacidad máxima de adsorción, (Chabalina & Martínez, 2014, pág. 7).

2.1.2.7 Las zeolitas como materiales adsorbentes

La adsorción, es un proceso físico producida por interacciones de gran efecto (fuerzas de van der Waals), permitiendo que moléculas, partículas o iones queden capturados sobre la superficie del cristal; donde el material que adsorbe es el adsorbente y el material adsorbido o retenido e llama adsorbato. Las propiedades fundamentales que diferencian a un adsorbente es su alta porosidad, que determina su superficie de contacto y los lugares activos para la adsorción, (Sivaraj, Namasivayam and Kadirvelu, 2001), citado en (Valladares, Cárdenas, De la cruz, & Melgosa, 2017, págs. 55-73).

2.1.2.8 Equilibrio de adsorción

El equilibrio de adsorción se logra cuando la velocidad a la que los iones se adsorben en una superficie es igual a la velocidad con la que se desorben, Los sistemas de equilibrio son dinámicos donde las velocidades de adsorción y desorción se igualan, manteniéndose constante la concentración del soluto en la solución, estas investigaciones permiten determinar la capacidad de adsorción y el potencial del material como adsorbente, (Córtez, 2007).

El comportamiento de equilibrio se describe generalmente en términos de isotermas de equilibrio que dependen de la temperatura del sistema, la concentración inicial total de la solución en contacto con el intercambiador y las características del sistema de intercambio iónico, como la composición de la solución, el tipo de mineral y el pH (Inglezakis et al., 2002) citado en (Motsi, 2010).

Isoterma de Adsorción: Es la relación de equilibrio entre la concentración de la fase fluida y la concentración de las partículas adsorbidas a una temperatura dada, relaciona la concentración de la sustancia adherida a la superficie del sorbato en la fase fluida a una temperatura dada, la relación de las variables se conoce como isoterma de adsorción se expresa en mg/L adsorbato / masa del adsorbente, en la Figura 14, se muestra su clasificación en seis tipos, (McCabe, Smith, & Harriot, 2007, págs. 875-911).

Tipos de Isotermas

Lineal: Se da cuando la cantidad adsorbida del soluto es proporcional a la concentración del fluido, a mayor concentración mayor es la cantidad adsorbida. (McCabe, Smith, & Harriot, 2007, págs. 875-911).

Cóncava: Son favorables al proceso de adsorción, donde a bajas concentraciones de fluido pueden obtener elevada carga del adsorbato en el adsorbente, la cantidad adsorbida se aproxima a un valor constante al incrementarse la presión relativa; el límite está determinado por el volumen accesible frente al tamaño del poro. (McCabe, Smith, & Harriot, 2007, págs. 875-911).

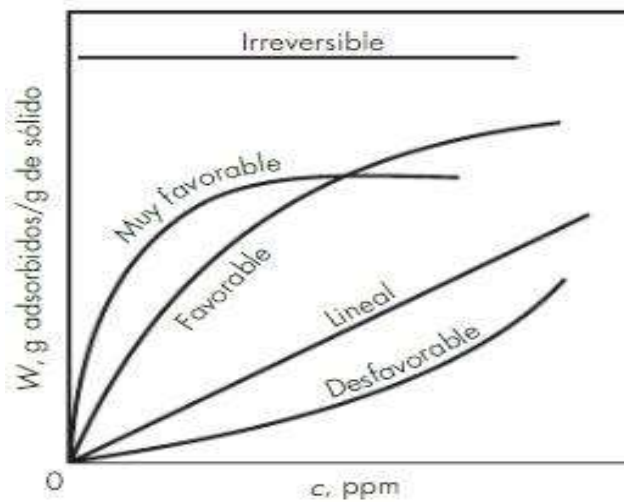


Figura 14. Isotermas de adsorción.
Fuente: (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

Convexa: “Son desfavorable debido a que se obtienen cargas de sólidos relativamente bajas y conducen a largas zonas de transferencia de masa en el lecho. Los materiales macroporosos y no porosos presentan poca afinidad entre el adsorbente y el adsorbato”, (McCabe, Smith, & Harriot, 2007, págs. 875-911).

Isoterma de Langmuir: En este modelo los iones se intercambian específicamente sobre sitios activos en la zeolita, el intercambio ocurre entre el catión metálico en solución y el sitio activo. La adsorción máxima se produce cuando la superficie está cubierta por una monocapa de adsorbato. Para la adsorción de un soluto (adsorbato) a partir de la isoterma de Langmuir, la formula se escribe como sigue, (Motsi, 2010).

$$q_e = \frac{q_m b c_e}{1 + K_L c_e} \quad (1)$$

Dónde: “ q_e es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente en equilibrio, (m la cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente g / g); q_m es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente” (Motsi, 2010); correspondiente a completar la cobertura de sitios disponibles (mg / g); K_L constante que relaciona la afinidad con los sitios de unión (L/ mg), se determina a partir de la ecuación lineal de Langmuir:

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{c_e} + \frac{1}{q_m} \quad (2)$$

La cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente en equilibrio (q_e) se determina según la ecuación:

$$q_e = \frac{m_s}{m} = (C_0 - C_e) \frac{V}{m^3} \quad (3)$$

Dónde: C_0 es la concentración inicial de cationes (mg / L); C_e es la concentración en el equilibrio en la fase líquida (mg / L); V es el volumen de la solución (litros); m_s es la masa de soluto adsorbido (mg); m es la masa del adsorbente (g); K_L es el coeficiente de adsorción de Langmuir, esta constante se relaciona con la afinidad entre el soluto y el (L / mg), (Motsi, 2010).

La isoterma de Langmuir se caracteriza por una constante adimensional (R_L) que es el (Factor de separación) y que se determina según la ecuación, (Taha M.Elmosri, 2014).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

Donde: C_o (mg/L): (concentración inicial); K_L (L/mg) (constante de Langmuir). El valor de R_L , muestra que la forma de isoterma es lineal si $R_L = 1$, desfavorable si $R_L > 1$, favorable si $0 < R_L < 1$ o irreversible si $R_L = 0$. Otra ecuación que permite relacionar la cobertura de superficie del adsorbente es (θ) , con la concentración inicial de plomo en la muestra utilizando el coeficiente de Langmuir K_L ; (Taha M.Elmosri, 2014, págs. 1667-1681)

$$(\theta) = \frac{K_L C_o}{1 + K_L C_o} \quad (5)$$

Isoterma de adsorción de Freundlich: Describe el equilibrio sobre una superficie heterogénea que es más frecuente en los sistemas naturales. El modelo matemático asume que la energía de adsorción no es equivalente para todos los sitios de adsorción y se expresa matemáticamente de la siguiente manera según, (Motsi, 2010).

$$q_e = k C_e^{1/n} \quad (6)$$

Dónde: q_e es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente en equilibrio (mg /g); C_e es la concentración residual de fase líquida en equilibrio (mg / l); k y n son constantes de Freundlich empíricos que son dependientes de las condiciones experimentales, k es un indicador de la capacidad de adsorción, mientras que n está relacionado con la intensidad o fuerza de unión de adsorción, (Motsi, 2010).

La forma lineal de la isoterma de adsorción de Freundlich es:

$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

Dónde: $1/n$ es el factor de heterogeneidad; valores de $1/n \ll 1$ indican adsorbentes heterogéneos, mientras que los valores más cercanos a 1 indican un material con sitios de unión relativamente homogéneos, (Motsi, 2010).

“El valor de n debe variar entre 1 y 10 para que el proceso de adsorción sea favorable, este modelo de adsorción corresponde a mecanismos de adsorción del tipo de fisisorción y también a mecanismos de químisorción, pero sobre sólidos con superficies heterogéneas” (Angeles, 2011).

Las pruebas realizadas con zeolitas naturales tipo chabasita (MXZ) y modificadas MXZNa con NaOH y MXZNH₄ con NH₄NO₃, reportaron una gran selectividad por el ion plomo como se muestra en la isoterma de adsorción Figura 15, (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013).

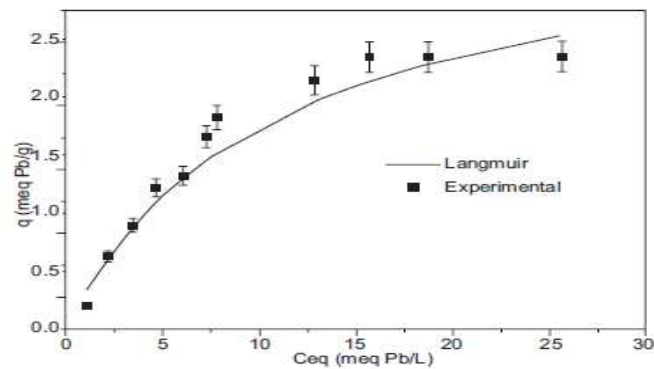


Figura 15. Isoterma de remoción de Pb (II) con zeolita MXZ.
Fuente: (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013).

La grafica de la cinética de adsorción, se ajustó al modelo de Langmuir, presentando una buena correlación de datos con $R^2 = 0,92$, lográndose el equilibrio aproximadamente a los 500 minutos de contacto; de los datos calculados se tiene que la máxima remoción de plomo por la zeolita natural mexicana tipo chabasita = MXZ a través del proceso de intercambio iónico fue de 2.38 meq de Pb/g, (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013, págs. 201-210)

Las isothermas obtenidas utilizando hojas en polvo de *Dobera Glabra* Forssk (DL), de la familia salvadoraceae; como adsorbente no convencional para la eliminación de plomo y níquel en soluciones acuosas; mostraron que el modelo más representativo del proceso de adsorción fue el de Langmuir; Obteniéndose una constante de correlación de Langmuir $R^2 = 0,999$ frente a la de Freundlich que tuvo una $R^2 = 0.98$, indicando que el proceso de adsorción sigue la ecuación de Langmuir, con una capacidad máxima de adsorción del DL para con el plomo de 83mg/g; mencionándose la formación una monocapa de plomo en la superficie homogénea del adsorbente. Los valores R_L estuvieron en el rango de (0,01 a 0,09), menor que la unidad por lo que concluye que la (DL) es un buen adsorbente para el plomo (II). Asimismo la cobertura superficial aumenta rápidamente con el incremento de la concentración inicial del plomo (II) en la muestra acuosa y luego aumenta lentamente cuando la concentración inicial se incrementa a 30 mg/L hasta que el valor de (θ) se acerca a 1, demostrándose que el DL es un buen adsorbente para el plomo (II), (Taha M.Elmosri, 2014, págs. 1667-1681).

El modelo que mejor se ajusta para representar la capacidad de adsorción de la zeolita natural es el de Langmuir, dado que el modelo supone que los sitios de intercambio iónico son sitios activos localizados en el adsorbente y en las zeolitas esto ocurre en la estructura de los tetraedros debido al desbalance de carga de los átomos de aluminio, dándose la interacción entre el catión metálico en solución y el sitio activo específico por ser una reacción de intercambio (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013).

2.1.2.9 Cinética de Remoción

“Los modelos cinéticos permiten darle explicación al fenómeno de adsorción dentro de un proceso específico, estableciendo la velocidad con la cual los contaminantes (iones metálicos) son retirados del medio acuoso”, (Tejada, Villabona, & Gárces, 2015, págs. 109-123).

Los estudios cinéticos nos proporcionan información sobre la dinámica del proceso, como la velocidad de adsorción está en función al tiempo de residencia a los coeficientes de transferencia de masa externa y la difusividad intrapartícula. La velocidad a la que avanza la adsorción es una función compleja de varios factores, de modo que la velocidad de reacción global puede estar influenciada por el efecto separado o combinado de estos factores, como el tamaño de partícula, el pH, concentración inicial de la solución, la temperatura y la velocidad de agitación, (Motsi, 2010). En la Figura 16, se muestra un comparativo de la cinética de remoción de plomo de una zeolita natural y modificadas con NaOH y NH₃, (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013)

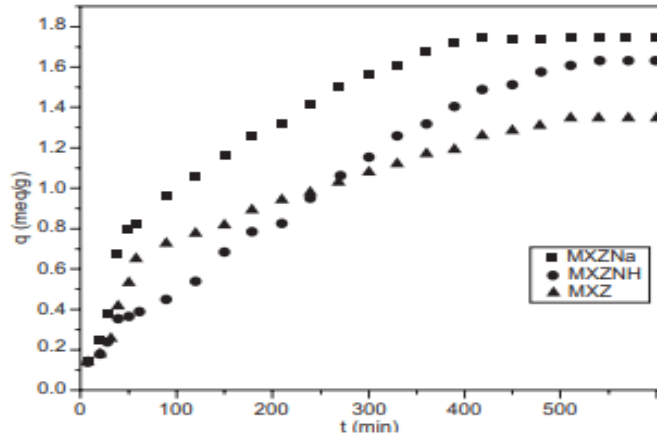


Figura 16. Cinética de remoción de plomo por intercambio iónico.
Fuente: (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013)

Factores que determinan la cinética de remoción: El tamaño de partícula de adsorbente, el pH, masa del adsorbente, la concentración de la solución inicial, la temperatura, la velocidad de agitación y la presencia de cationes competitivos. (Motsi, 2010, págs. 80-260).

El Potencial de Hidrógeno (pH): Es un factor que controla los procesos de adsorción de metales en los adsorbentes, dado que el pH de la solución determina la carga de la superficie del adsorbente y la disociación o protonación del electrolito. A altos valores de pH, se incrementa la concentración de iones $[OH^-]$ en la solución, generando la formación de hidrox-complejos, disminuyendo la carga neta del ion y también la afinidad con el adsorbente. “La especie química predominante depende fuertemente de la acidez del medio, sin dejar de lado la importancia de la acidez del catión, necesaria para competir con otros iones por los sitios activos en la superficie del adsorbente”, (Cuizano, Reyes, Domínguez, Llanos, & Navarro, 2010, págs. 123-130).

La Figura 17, muestra la influencia del pH en la adsorción de iones Zn que a medida que disminuye el pH de la solución, de 4,5 a 2,5, la eficiencia de eliminación de metales pesados también disminuye, debido a que los protones (H^+), en la solución desplazan los iones Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , de la superficie externa o superficie interna de la zeolita en un rango de pH ácido a neutro, esto da como resultado un aumento en el pH de la solución, ya que los H^+ se eliminan de la solución. La adsorción de iones H^+ por la zeolita también da como resultado una disminución en la adsorción de metales pesados de la solución, dado que estos iones H^+ , compiten por los sitios de adsorción disponibles en la zeolita. (Motsi, 2010).

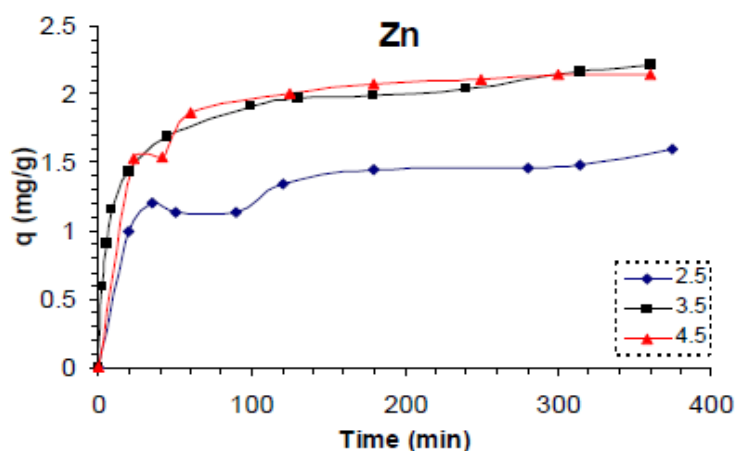


Figura 17. Efecto del pH inicial en la cinética de remoción $q = \text{mg}$ de metal por gramo de zeolita como adsorbato
Fuente: (Motsi, 2010)

Masa adsorbente: Se debe a que a medida que la masa adsorbente aumenta, hay más sitios de adsorción disponibles por unidad de masa de adsorbente agregado como se muestra en la Figura 18, (Motsi, 2010).

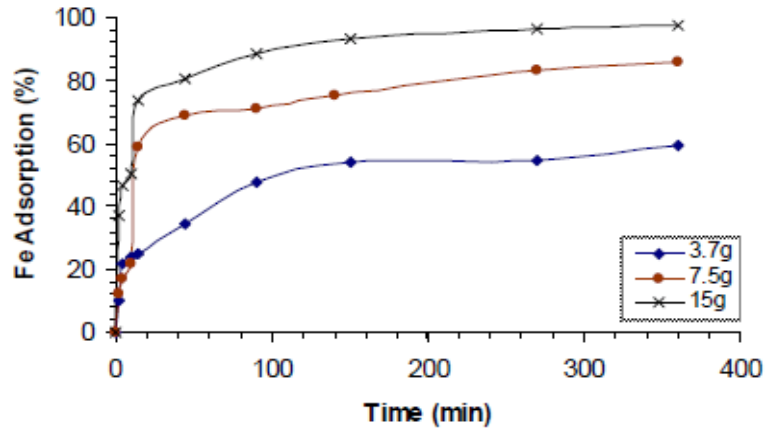


Figura 18. Influencia de la masa del adsorbente en la remoción del hierro.
Fuente: (Motsi, 2010).

Concentración Inicial de la Solución: La fuerza impulsora de la concentración es responsable de superar la resistencia a la transferencia de masa asociada con la adsorción de metales (Barrer, 1978). Por lo tanto, a medida que aumenta la concentración inicial, aumenta la velocidad de adsorción, dando como resultado un aumento en la adsorción de metales por parte de la zeolita. La capacidad de adsorción aumentará con un aumento en la concentración inicial hasta que el sistema alcance un punto de saturación, momento en el cual un aumento adicional de la concentración de adsorbato (metales pesados), no dará lugar a ningún cambio significativo en la cantidad adsorbida. También indica que un aumento en la concentración inicial no solo da como resultado un aumento en la cantidad adsorbida (q_e) sino una disminución en la eficiencia de la zeolita natural para la eliminación de metales pesados de la solución. (Motsi, 2010).

Tamaño de Partícula: La Figura 19, muestra la influencia del tamaño de partícula en el proceso de remoción de hierro.

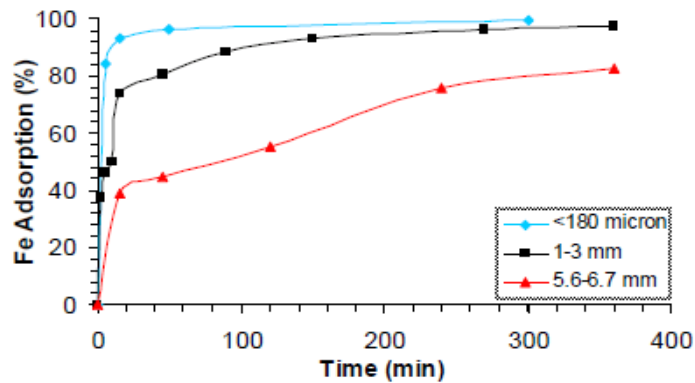


Figura 19. Influencia del tamaño de partícula del adsorbente en el proceso de remoción del hierro.
Fuente: (Motsi, 2010)

La adsorción ocurre en interior de la partícula sobre las paredes de los poros, en puntos específicos. La cantidad de adsorbato que pueda adsorber el material es proporcionalmente al área superficial interna de la partícula, por su cantidad de poros por unidad de masa. la disminución del tamaño de partícula de la zeolita natural da como resultado mayores tasas y eficiencias de remoción de metales pesados, pero a medida que aumenta el tiempo de contacto (tendiendo al equilibrio) hay una disminución en el grado de efecto del tamaño de la partícula (Malliou et al., 1994; Erdem et al., 2004) citado en (Motsi, 2010).

La Velocidad de Agitación: Es un parámetro que permite superar la resistencia de transferencia de masa externa, relacionada con la difusión de iones a través de la película líquida que rodea las partículas de zeolita, esta se reduce a medida que el espesor de la película se reduce debido a la agitación. La Figura 20, muestra que la eficiencia y la tasa de eliminación de metal aumentaron a medida que aumentaba la velocidad de agitación. La diferencia en la cantidad eliminada de la solución a las diferentes

velocidades se reduce con el tiempo; después de aproximadamente 400 minutos, la cantidad total del metal eliminado a las diferentes velocidades es casi la misma. (Motsi, 2010).

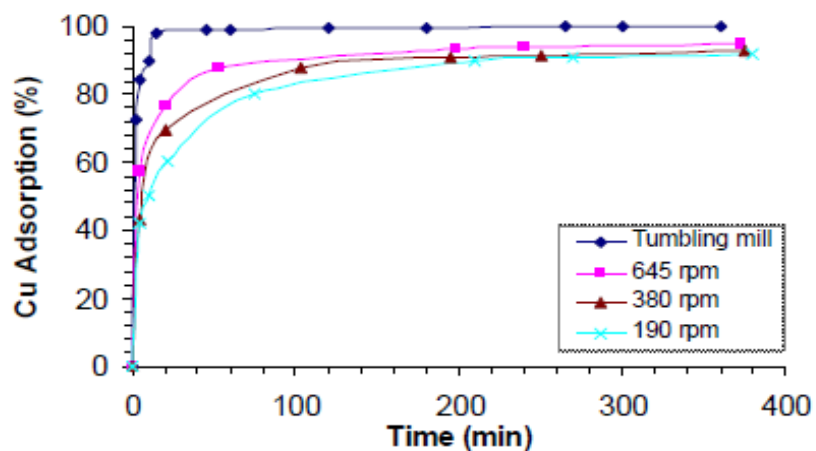


Figura 20. Efecto de la velocidad de agitación en la adsorción de metales pesados.
Fuente: (Motsi, 2010)

El porcentajes de remoción son válidos solamente en condiciones en que se obtuvieron porque estos dependen de la concentración inicial, de la relación entre masa de zeolita y el volumen de la solución, pH y temperatura de la solución; el porcentaje de remoción se calcula por medio de la siguiente ecuación, (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001).

$$\%R = \frac{c_0 - c_f}{c_0} \cdot 100\% \quad (8)$$

2.2 Términos Básicos.

Adsorción: Es la propiedad que tienen algunos sólidos, para que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie del sólido; se fundamenta en la transferencia de masa de la fase fluida a la fase sólida, permitiendo la separación selectiva de una sustancia y/o compuesto; donde el adsorbato es la sustancia que se acumula en la superficie del material adsorbente, (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Aguas contaminadas con plomo: Aguas superficiales contaminadas con plomo que no cumplen con el ECA- categoría I- subcategoría A1. I (Poblacional y recreacional), (MINAM, D.S. 004, 2017).

Capacidad de Adsorción: Es la cuantificación de la adsorción de algún contaminante en un adsorbente, se mide en gramos de contaminante/ masa de adsorbente, (Motsi, 2010).

Equilibrio de adsorción: “Es la relación de equilibrio entre la concentración de los iones de la fase fluida y la concentración de las partículas de adsorbente a una temperatura determinada”, (Córtez, 2007).

El Estándar de Calidad Ambiental – (ECA): “Es la medida que establece los niveles de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente”. (MINAM, Ley N° 28611, 2005, pág. 33) .

Intercambio Iónico: “Es la transferencia de uno o más iones, de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales”, (Fernandez, y otros, 2006).

El Límite Máximo Permisible – LMP: “Es la medida de la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente”, (MINAM, Ley N° 28611, 2005) pág. 34.

Metales Pesados: Compuestos no biodegradables que se acumulan en el organismo causando enfermedades y trastornos razón por la cual han sido catalogados como una clase emergente de cancerígenos, (OMS., 2006).

Valor Guía o Valor Pauta del Agua para Consumo Humano: Es un componente que asegura que agua, esté estéticamente agradable y que no tenga ningún riesgo de salud para el consumidor, (OMS., 2006).

Zeolitas: Aluminosilicatos hidratados que contienen cationes alcalino o alcalino-térreos, con canales que tienen alta capacidad de intercambio catiónico. (Paredes, Ramirez, Osuna, Alamilla, & Madujano, 2013).

2.3 Aspectos de Responsabilidad Social y Medio Ambiente

“La ISO 26000, nos muestra la importancia de revertir el impacto negativo que la actividad humana en la estabilidad de los ecosistemas mediante un uso socialmente responsable de los recursos naturales” (Argandoña & Isea, 2011, págs. 16-21).

... “La protección y restauración de la biodiversidad y los ecosistemas, el uso sostenible de la tierra y los recursos naturales y el fomento de un desarrollo urbano y rural en armonía con el ambiente son factores clave a tener en cuenta para desarrollar procesos que contribuyan a minimizar las situaciones de riesgo y mejorar al desarrollo económico y social de las comunidades”. (Argandoña & Isea, 2011, págs. 16-21).

2.3.1 Responsabilidad Social

El resultado del trabajo permitirá contar con una alternativa efectiva y de bajo costo a ser utilizado en tratamiento de aguas contaminadas con plomo; sobre todo a ser utilizado en las comunidades donde las personas consumen agua directamente del río o de pozo sin tratamiento alguno; evitando la intoxicación por plomo de la población y el impacto negativo generado por este metal en los niños.

2.3.2 Responsabilidad Ambiental

La aplicación de las zeolitas como filtros para remover los metales pesados como el plomo presente en aguas contaminadas, permitirá el cumplimiento de la norma de calidad ambiental minimizando el daño al cuerpo receptor, asegurando la estabilidad de los ecosistemas, a través del uso responsable de los recursos naturales.

2.4. Normativa Nacional e Internacional

2.4.1 Ley General del Ambiente 28611

Artículo I “Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida”, (MINAM, Ley N° 28611, 2005, pág. 20).

Artículo 66°. De la salud ambiental

Artículo 66.1 “La prevención de riesgos y daños a la salud de las personas es responsabilidad del estado, a través de la autoridad de salud y de las personas naturales y jurídicas dentro del territorio nacional, contribuir a una efectiva gestión del ambiente y de los factores que generan riesgos a la salud de las personas” (MINAM, Ley N° 28611, 2005, pág. 47).

Artículo 114 El acceso al agua para consumo humano es un derecho de la población. “Corresponde al Estado asegurar la vigilancia y protección de aguas que se utilizan con fines de abastecimiento poblacional, sin perjuicio de las responsabilidades que corresponden a los particulares”, (MINAM, Ley N° 28611, 2005, pág. 61).

2.4.2 Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29333

Título Preliminar:

Artículo 1 (inc. 6). Principio de sostenibilidad

“El estado promueve y controla el aprovechamiento y conservación sostenible de los recursos hídricos, previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las

condiciones naturales de su entorno como parte del ecosistema donde se encuentran”, (ANA, Ley de recursos Hídricos N° 29338, 2009, pág. 1).

“El uso y gestión sostenible del agua implica la integración equilibrada de los aspectos socioculturales, económicos y ambientales en el desarrollo nacional, así como así como la satisfacción de las necesidades de las actuales y futuras generaciones”, (ANA, Ley de recursos Hídricos N° 29338, 2009, pág. 1)

Título I Disposiciones Generales

Artículo 1:

“El agua es un recurso natural, renovable e indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan y la seguridad de la nación”, (ANA, Ley de recursos Hídricos N° 29338, 2009, pág. 3)

Artículo 36: Uso Primario

“El uso primario consiste en la utilización directa y efectiva de la misma, en las fuentes naturales y causes públicos de agua, con el fin de satisfacer necesidades humanas primarias. Comprende el uso de agua para preparación de alimentos, el consumo directo y uso personal, así como su uso en ceremonias culturales y rituales” (ANA, Ley de recursos Hídricos N° 29338, 2009, pág. 13).

Artículo 39: Uso Poblacional

“Consiste en la captación de agua de una fuente o red pública debidamente tratada, con el fin de satisfacer las necesidades humanas básicas, preparación de alimentos y hábitos de aseo personal”, (ANA, Ley de recursos Hidrónicos N° 29338, 2009, pág. 13).

Artículo 40: Acceso a la población a las redes de agua potable

“El estado garantiza a todas las personas el derecho de acceso a los servicios de agua potable en cantidad suficiente y en condiciones de seguridad y calidad para satisfacer las necesidades personales y domésticas”, (ANA, Ley de recursos Hidrónicos N° 29338, 2009, pág. 13)

2.4.3 Guía para la calidad del agua potable

Establece como límite máximo permisible 0,01 mg/L de plomo la calidad del agua para consumo humano, pág. 223, (OMS., 2006, págs. 212,213).

III Método

3.1 Tipo de Investigación

Es de tipo experimental, donde se manipulan las variables del estudio mediante un proceso secuencial, probatorio y analítico; según el tipo de estudio es longitudinal dado que se miden y relacionan las variables en más de una ocasión, es de nivel explicativo donde se mide el efecto producido por la variable independiente (Zeolita), sobre la variable dependiente (aguas contaminadas con plomo) ; en una relación causa - efecto, recolectándose y comparándose los datos obtenidos en diferentes oportunidades o momentos de una misma población con el propósito de establecer el comportamiento y probar las teorías. (Hernandez Sampieri, 2014, pág. 5).

3.1.1 Alcance de la Investigación

Es de nivel explicativo, permitiéndonos determinar y controlar las causas y factores que han dado origen a la investigación planteada, (Hernandez Sampieri, 2014, pág. 95). En este contexto, se analizó la morfología y composición del cristal de las canteras de la zona de Yura-Arequipa-Perú, para determinar si corresponde a una zeolita natural mediante un proceso exploratorio, la información recopilada permitió identificar al material en estudio como zeolita natural y conocer las características fisicoquímicas, la manipulación del factor causal permitió determinar sus efectos en la variable dependiente, donde la aplicación de la variable independiente (X) = Zeolita natural, modifica la variable dependiente (Y)= Concentración de plomo en aguas contaminadas. Las pruebas realizadas permitieron conocer el potencial de remoción de plomo de la zeolita natural en estudio,

para su utilización como medio filtrante de aguas contaminadas. (Hernandez Sampieri, 2014, págs. 90-93)

3.2 Población y Muestra

Las canteras de las zeolitas naturales a estudiarse se encuentran en el distrito de Yura- Arequipa- Perú. “Yura proviene de la palabra quechua: “gyurac” que significa blanco, nombre que proviene de las llanuras salitrosas de color blanquecino que existen en este lugar se ubica al noroeste de la ciudad de Arequipa”. (YURA, 2012). “Ocupa una extensa región de la provincia de Arequipa por lo que su territorio representa los accidentes más diversos: cadenas de cerros, llanuras, altiplanicies, quebradas y cañones, se halla en la vertiente oriental de los volcanes Misti y Chachan”; Las llanuras de mayor consideración son: la Pampa Cañahuas, Pampa Arrieros, y la Pampa del Confital. Está irrigado por el río Yura, el que une sus aguas al río Chili para formar el río Vítor (YURA, 2012).

3.2.1 Población

La población corresponde a las zeolitas naturales peruanas ubicadas en el distrito de Yura – Provincia de Arequipa-departamento de Arequipa – Perú, como se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Cantera zeolitas naturales distrito de Yura- Arequipa- Perú.
Fuente: (YURA, 2012)

3.2.2 Muestra

Zeolitas Naturales: Se tomaron 100 kilos de muestra, de las canteras de Yura distrito de Yura-provincia de Arequipa- Departamento de Arequipa Perú, cuyas coordenadas se indican en la Tabla 7 y Figura 22.

Tabla 7
Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo de zeolitas naturales Yura-Arequipa-Perú

Código	Coordenadas UTM(WGS84)		Altitud m	Descripción	
	Zona	X	Y		Z
Zeo-01		211090,67	8201792,94	2489	Quebrada seca, afluente del río Yura
Zeo-02		211203,72	8208152,05	2687	Margen derecho del río Yura

Fuente: Elaboración propia

El recojo de las muestras se realizó de forma aleatoria, se tomaron 8 muestras del mineral en superficie descubierta a 30 cm de profundidad, las que se sometieron a

partición como se muestra en la Figura 23, para obtener una muestra compuesta representativa, según como lo indica la guía de muestreo de suelos del MINAM, (MINAM, Guía de Muestreo de Suelos, 2014, pág. 22).



Figura 22. Plano de Ubicación de los puntos de muestreo en las canteras de zeolitas naturales-Yura-Arequipa-Perú.
Fuente: (Google Earth, 2020)

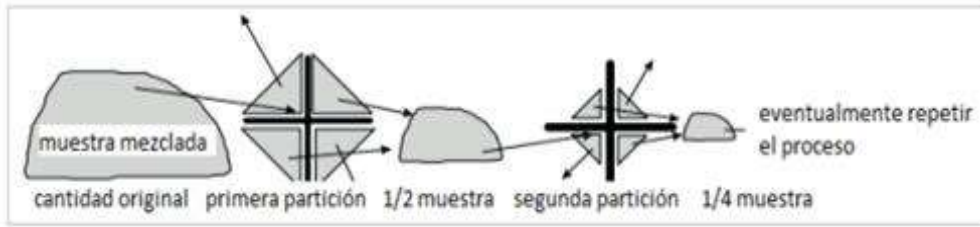


Figura 23. Tamaño de muestra -Partición de muestras.
Fuente: (MINAM, Guía de Muestreo de Suelos, 2014)

Muestra del agua superficial: Se tomó como muestra el agua superficial del río Chillón, a la altura del km 74,5 de la carretera Canta a 10 minutos del pueblo de Yaso-Canta, como se muestran la Figura 24. El punto de monitoreo se identificó con el sistema de posicionamiento global (GPS), registrándose las coordenadas en el sistema UTM, como se muestra en la Tabla 8. La toma de muestra se realizó siguiendo el protocolo de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales RJ N° 010-2016-ANA para muestras simples para ríos o lagos a partir de la orilla, (ANA, Protocolo para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos, 2016)



Figura 24. Zona de toma de muestra del agua superficial carretera Canta km 74,5.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. *Coordenadas de ubicación del punto de muestreo aguas superficiales Río Chillón*

Punto de muestreo	Coordenadas de ubicación UTM(WGS84)	
	X	Y
km 74.5 Carretera Canta	0313135	8223089

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Operacionalización de las variables

3.3.1 Variable Independiente X

X: Potencial de remoción de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa.

Tabla 9
Operacionalización de la variable independiente

Variable	Dimensión	Indicador	Instrumento	Tipo de variable
Independiente: Potencial de remoción de plomo de la zeolita Natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú	X ₁ _Composición química de zeolita natural.	Relación: Al/Si	Microscopía electrónica de barrido	Numérica de distribución continua
	X ₂ = Morfología	Estructura	Espectrofotómetro de masa y/o absorción atómica	
	X ₃ = Intercambio catiónico K,Na, Ca,Mg	Capacidad de intercambio		
	X ₄ = Tamaño de partícula: malla N° 20; 30; 50; escala Tyler	Capacidad de adsorción		
	X ₅ = Dosis del adsorbente. 2,5; 5; 10; g /L de Sol.	Capacidad de Remoción de plomo.		

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Variable Dependiente Y

Y: Remoción del plomo presente en aguas contaminada.

Z: Variable Interviniente Factores que influyen en el proceso de reducción de plomo en aguas contaminadas.

Tabla 10
Operacionalización de la variable dependiente

Variable	Dimensión	Indicador	Instrumento	Tipo de variable	
Dependiente: Remoción del Plomo presente en aguas contaminadas.	Y1: Concentración de plomo en aguas contaminadas. (1; 5; 10; mg/L)	Concentración de plomo en el agua tratada con zeolita.	Espectrofotómetro de masa (ICP)	Numérica de distribución continua	
	Interviniente: Factores que influyen en el proceso de remoción de plomo en aguas contaminadas	Z ₁ = pH: (3; 5; 7)	Capacidad de remoción	Espectrofotómetro de masa (ICP)	Numérica de distribución continua
		Z ₂ = C ₀ : (1, 5, 10, 20,40) mg/L	Capacidad de remoción	Espectrofotómetro de masa (ICP)	Numérica de distribución continua
	Z ₃ = Tiempo de contacto (0-360) min)	Capacidad de Remoción	Espectrofotómetro de masa (ICP)	Numérica de distribución continua	

Fuente: Elaboración propia.

El trabajo se inició con un estudio exploratorio de este mineral para conocer su composición, morfología y cationes intercambiables presentes en el mineral a fin de relacionarlas con otras zeolitas naturales a nivel mundial y evaluar sus propiedades. Para evaluar los factores fisicoquímicos que influyen en la cinética de remoción, se manipularon las variables pH, tamaño de partícula, masa del adsorbente y concentración de la solución, variando el tiempo de contacto; evaluándose a través de graficas de

correlación la influencia de estos factores en el proceso de remoción del plomo presente en las aguas contaminadas.

Para evaluar la capacidad de adsorción se realizaron pruebas de equilibrio de adsorción a diferentes concentraciones de plomo presente en la muestra problema hasta la saturación del adsorbato, elaborándose las isothermas de adsorción y comparándolas con los modelos de Langmuir y Freundlich.

Para validar el potencial de remoción de la zeolita natural, se trabajó con una muestra de agua contaminada de 1 mg/L de plomo, determinándose su concentración después del tratamiento y evaluándose estadísticamente con la técnica estadística de T de Student con un nivel de significancia del 5%, y 95% de confianza determinándose la probabilidad de error con el cálculo del el p-valor a fin de tomar decisiones respecto a la aceptación o no de la hipótesis planteada.

3.4 Instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Materiales y Equipos

a) Trabajo de Gabinete. - Para el estudio se revisaron: Textos, trabajos de investigación, revistas, tesis de repositorios de universidades, bases de datos como Science Direct; ProQuest; Elsevier Journals; normas de calidad del agua, métodos estandarizados para la determinación de metales, normas ambientales. Etc.

b) Trabajo de Campo. - Para el trabajo de campo, se utilizó, bolsas de polietileno para recolectar la muestra, baldes de plásticos de 20 litros; Cajas conservadores (Coolers), bolsas refrigerantes; HNO₃ cc para la preservación de

muestras; frascos de polietileno de 1 y 0.5 litros; morteros, tamices según norma ASTM, E. 11-61, Tabla 11.

Tabla 11
Tamaño de partícula ASTM, E. 11-61

Serie	Malla	Abertura (mm)
18-130	20	0,840
18-132	30	0,590
18-136	50	0,297
18-137	60	0,250

Fuente: Elaboración propia.

c) Trabajo de Laboratorio. – Para el trabajo en el laboratorio se utilizaron los siguientes equipos, materiales y reactivos, Tabla 12.

d) Materiales de Laboratorio: Crisoles de porcelana; mortero con pilón de porcelana; vasos de precipitado, matraces aforados de 1000; 500; 250 y 100 mL; buretas graduadas de 50 mL, probetas graduadas, pipetas volumétricas y graduadas, matraces aforados de 1 y 0,5 litros; papel de filtro Whatman N° 40, luna de reloj, desecador de vidrio.

e) Reactivos: Los reactivos utilizados fueron de grado reactivo y/o para análisis ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$; NaOH; HCl; HNO_3 ; NH_4Cl , alcohol etílico).

Tabla 12
Equipos e Instrumentos de Laboratorio

EQUIPO	MODELO	APLICACIÓN
Microscopio de barrido Electrónico. de espectroscopia de Rx con energía dispersiva	(PHENOM WORLD) DE THERMO FISHER SCIENTIFIC;	Determinar morfología y composición zeolita
Espectrofotómetro ICP-OES Muestreador Recirculador	ICAP 6500 DUO ASX 520 Thermoflex 900	Determinación metales pesados
Balanza Analítica	(OHAUS-PIONER- TM/PA214) de 0,1mg	Pesada de materiales
Equipo medidor de pH	(SPER SCIENTIFIC- BENCH TOP METERS/ 860031, 860032 and 860033)	Determinación pH muestras
Equipo de test de Jarras de la UNAC	Convencional (0- 250rpm)	Agitación de muestras
Estufa	MEMMERT 60L (20-250°C)	Secado de materiales y reactivos

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Técnicas de Laboratorio

Para determinar el plomo presente en aguas contaminadas se utilizaron, las técnicas estandarizadas para análisis de aguas potables y residuales, dadas por APHA, AWWA WPCF (Standard Methods) for the examination of water and wastewater 21 edición, 2002, ver Tabla 13.

Tabla 13. *Técnicas analíticas- Laboratorio*

Parámetro	Unid.	Norma	Técnica Analítica
Temperatura	°C	2550	Termómetro
pH	-----	4500-H ⁺ -B	Electrométrico
Pb ²⁺	ug/L	3125B	ICP (Inductively Coupled Plasma)
Na ⁺	mg/L	3500-Na-B	A.A(Flame emisión photometric)
K ⁺	mg/L	3500-K-B	A.A(Flame emisión photometric)
Ca ²⁺	mg/L	365	ICP (Inductively Coupled Plasma)
Mg ²⁺	mg/L	384	ICP (Inductively Coupled Plasma)
Morfología del cristal	-----	Barrido electrónico	Microscopia de barrido electrónico.

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Procedimientos

La prueba experimental para la recolección de los datos se llevó a cabo en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales- Universidad Nacional del Callao.

Los análisis para determinar la morfología de la zeolita, así como su composición se realizaron en el laboratorio de Ciencias de la Universidad de Ingeniería del Perú.

Los análisis para evaluar la concentración de K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Pb²⁺ se realizaron en los laboratorios de INASA, laboratorio acreditado por INACAL.

3.5.1 Caracterización de la zeolita Natural

El proceso se inició con la limpieza del material seguidamente se trituró, tamizó con tamices de malla 20, 30, 40, 50, 60 del sistema (ASTM. E.11-61), separándose para el estudio el tamaño de partícula de malla 60 (apertura de malla 0,25 mm), seguidamente

se lavó con agua bidestilada y se secó en estufa a 100 °C durante 24 horas, obteniéndose partículas finas de color blanquecino.

Evaluación de la morfología superficial de la zeolita: La evaluación de la morfología de la zeolita, se realizó utilizando un microscopio de barrido electrónico, el cual tiene incorporado un sistema de espectroscopía de Rx con energía dispersiva, que permite visualizar la morfología superficial de la zeolita natural e identificar la composición elemental del material en estudio.

Determinación de los cationes intercambiables de la Zeolita (C.I): Para determinar la capacidad de intercambio de la zeolita en estudio, se colocó 1.0 g de zeolita natural de malla 30 (abertura de malla 0,595mm), lavada con alcohol y secada a 100°C por 24 horas, en un vaso de precipitado de un litro, se agregó 500 mL de una solución de NH₄Cl 0,25 mol/L, se agito durante 360 minutos y se dejó en contacto por 24 horas, seguidamente se separó el adsorbato mediante un proceso de filtrado, determinándose en el filtrado la concentración de iones intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺), que fueron reemplazados por el ion NH₄⁺ en el adsorbato. La concentración de iones intercambiables presentes en la solución se determinó con el método EPA 200.7. Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry y para determinar la capacidad de intercambio iónico se utilizó la siguiente formula.

$$CI = \frac{(Co \times Vs)}{P_{eq.} \times M \times m.Z} \quad (9)$$

CI= Capacidad de Intercambio

C_o = concentración del metal en la solución

V_s = volumen de la solución

Peq. M= peso equivalente del metal

m.Z= masa zeolita

3.5.2 Factores que influyen en la cinética de remoción y de adsorción

Preparación de soluciones estándar de plomo. Se preparó una solución “stock” de 100 mg/L de Pb^{2+} , utilizando $Pb(NO_3)_2$ grado analítico marca Merck, con agua desionizada, a partir de este “stock” se prepararon soluciones de 50 mg/L Pb(II) ; 25 mg/L Pb(II) ; 10 mg/L Pb(II) ; 5 mg/L Pb(II) ; 1 mg/L Pb(II).

Para evaluar los factores que afectan la cinética de remoción se trabajó en intervalos de 0 a 360 minutos de tiempo de contacto; variándose el pH; el tamaño de partícula; la concentración de la solución y masa del adsorbente, elaborándose las curvas de correlación para determinar cómo estos factores influyen en la cinética de adsorción de la zeolita cuando interactúa con el plomo como catión contaminante.

La determinación de las concentraciones de plomo residual en las aguas contaminadas se realizó por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP- OES).

La cantidad de plomo adsorbido por la zeolita natural (q_e), durante el proceso de remoción se determinó:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (10)$$

Donde:

C_o = Concentración inicial

C_e = Concentración en el equilibrio

q_e = Cantidad de plomo adsorbido en el equilibrio

m = Masa en gramos zeolita

V = Volumen de la solución tratada

El porcentaje de remoción de los metales se determinó:

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100$$

a) Influencia del pH en la cinética de remoción y de adsorción: Los ensayos de adsorción de plomo se realizaron en un sistema por lotes en cada caso se utilizaron 2,5 g de zeolita natural en contacto con 250 mL de solución de plomo de 5 mg/L Pb (II); manipulándose la variable pH, a condiciones constantes de: Tamaño de partícula; dosis de adsorbente; concentración inicial de plomo (C_i); temperatura y velocidad de agitación; determinándose la concentración final de plomo (C_e) en el agua tratada por espectrofotometría, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14
Influencia del pH en la cinética de remoción de plomo

pH	Concentración de plomo en el equilibrio (Ce) (mg/ L)						
	00 min.	5min	15min.	30min	60min	180min	360min
X1=3,30	4,6695	1,5292	1,1132	0,7115	0,4664	0,1982	0,2355
X2=5,00	4,8452	0,0695	0,0574	0,0330	0,0441	0,0482	0,0811
X3=7,21	3,8847	0,0394	0,0553	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676

Nota: Masa zeolita: 2,5 g; Tamaño de partícula N°30; Velocidad de agitación: 150 rpm; Volumen de muestra: 250 mL; Temperatura: 21 °C; Concentración: 5 mg/L.
Fuente: Elaboración propia.

b) Influencia del tamaño de partícula en la cinética de remoción y adsorción:

Los ensayos de adsorción de plomo se realizaron en un sistema batch en cada caso se utilizará 2,5g de zeolita natural en contacto con 250 mL de solución de plomo de 5mg/L Pb (II); manipulándose la variable tamaño de partícula de malla (20; 30; 50), según norma ASTM, E. 11-61, manteniéndose a condiciones constantes: dosis de adsorbente; pH ; temperatura y velocidad de remoción, los resultados determinan la influencia del tamaño de la partícula en la capacidad de adsorción de la zeolita natural, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15
Influencia del tamaño de partícula en la cinética de remoción y de adsorción

Tamaño Part. Sistema ASTM	Concentración de plomo en el equilibrio (Ce) (mg/ L)						
	0 min.	5min	15min	30min	60min.	180 min	360 min
X ₁ = Malla 20 (0,841mm)	2,7704	0,0460	0,0370	0,0566	0,0561	0,0502	0,0582
X ₂ =Malla 30 (0,595mm)	3,8847	0,0394	0,0553	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676
X ₃ = Malla 60 (0,297mm)	4,6376	0,0324	0,0150	0,0206	0,0595	0,0634	0,2209

Nota: Masa zeolita: 2,5g; pH: 7,21; Tamaño de partícula N°30, Velocidad de agitación: 150rpm;
 Volumen de muestra: 250 mL; Temperatura: 21°C; Concentración:5mg/L.
 Fuente: Elaboración propia.

c) Evaluación de la cinética de remoción en función a la masa del adsorbente. Los ensayos de adsorción de plomo se realizarán en un sistema batch en cada caso se utilizará (2,5; 5; 10) gramos de zeolita natural), la que se colocó en contacto con 250 mL de solución de plomo de 5 mg/L Pb (II); manteniéndose a condiciones constantes: pH: Tamaño de partícula; temperatura y velocidad de agitación. Evaluándose la concentración de plomo en el agua tratada después de cada prueba realizada Tabla 16.

Tabla 16
Influencia de la masa del adsorbente en la cinética de remoción de plomo

Masa Adsorbente	Concentración de plomo en el equilibrio (Ce) (mg/ L)						
	0 min.	5min	15min	30min	60min	180 min	360 min
X ₁ = 2,5 g	3,8847	0,0394	0,0553	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676
X ₂ = 5,0 g	4,9032	0,0401	0,0293	0,0471	0,0370	0,0341	0,0378
X ₃ =10,0 g	4,7824	0,0345	0,0563	0,0129	0,0433	0,0225	0,0317

Nota: pH: 7,21; Tamaño de partícula N°30, Velocidad de agitación: 150 rpm Volumen de muestra: 250 mL; Temperatura: 21 °C; Concentración:5 mg/L.
Fuente: Elaboración propia.

d) Evaluación de la cinética de remoción y adsorción en función a la concentración de plomo en la solución. Las pruebas de adsorción de plomo se realizarán en un sistema batch en cada caso se trabajará con soluciones de 250 mL a las siguientes concentraciones (1,0056; 3,8847; 8,0864) mg/L Pb (II); manteniéndose a condiciones constantes: pH, Tamaño de partícula; tiempo de contacto, temperatura y velocidad de agitación, masa del adsorbente. Evaluándose la concentración de plomo en el agua tratada, ver Tabla 17.

Tabla 17
Influencia de la concentración de solución en la cinética de remoción de plomo

Conc.de la solución mg/L	Concentración de plomo en el equilibrio (Ce) (mg/ L)						
	0 min.	5min	15min	30min	60min.	180 min	360 min
X ₁ = 1,0056	1,0056	0,0202	0,0671	0,0166	0,0823	0,0259	0,0281
X ₂ =3,8847	3,8847	0,0394	0,0553	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676
X ₃ =8,0864	8,0864	0,3989	0,1457	0,0876	0,0638	0,09588	0,1491

Nota: Masa zeolita: 2,5 g; pH: 7,21; Tamaño de partícula N°30, Velocidad de agitación: 150 rpm Volumen de muestra: 250 mL; Temperatura: 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Determinación de la capacidad de adsorción de la zeolita natural Yura

–Arequipa- Perú

Para evaluar la capacidad de adsorción se realizaron experimentos por lotes con las muestras de zeolita de la zona de Yura- Arequipa, para lo cual se prepararon soluciones de $PbNO_3$ de (1,0056; 2,7704 3,8847; 4,3236; 8,0864; 18,6508; 40,6448) mg/L, colocándose 2,5 gramos de zeolita de malla 30 en un volumen de 250 mL de la solución preparada a pH=7 y temperatura ambiente; sometiéndose a agitación en un equipo de jarras por 8 horas, una vez transcurrido el tiempo de contacto, se separó el adsorbente de la solución tratada mediante filtrado, determinarse la concentración de plomo no removido en la muestra de agua tratada. A partir de la concentración inicial y la concentración de la muestra tratada en el equilibrio, se determinó la capacidad de adsorción utilizando las ecuaciones de (1-8) (Motsi, 2010). Se elaboraron las isothermas de adsorción y se compararon con los modelos de Langmuir y freundlich, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18
Evaluación de la Capacidad de adsorción de la zeolita natural

Muestra	1	2	3	4	5	6
Co mg/L	1,0056	3,8847	4,3236	8,0864	18,6508	40,6448
Ceq. mg/L	0,0281	0,0676	0,0941	0,1491	0,3052	5,0567

Nota: Tamaño partícula: malla 30; Veloc. de agitación: 150 rpm; Vol. muestra: 250 mL; Masa zeolita: 2,5 g; pH= 7,21; Temperatura: 21 °C; Tiempo de contacto: 360 minutos.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Determinación de la eficiencia de la zeolita natural en la remoción de plomo

Para evaluar la eficiencia en la remoción de la zeolita natural se realizaron 02 pruebas.

1.- La primera prueba consistió en tomar 11 muestras de la misma concentración inicial de plomo de 4,3236 mg/L; colocándose a cada muestra 2,5 gramos de zeolita de malla 30 en matraz erlenmeyer de 250 mL a pH=7,21 y temperatura 23 °C ; sometándose a agitación en un test de jarras por 6 horas cada una de las muestras, una vez transcurrido el tiempo de contacto, se separó el adsorbente de la solución tratada mediante filtrado, determinarse la concentración de plomo no removido en la muestra de agua tratada, como se muestra en la Tabla 19. A partir de la concentración inicial y la concentración final del plomo presente en la muestra se determinó el porcentaje de remoción de plomo con la ecuación:

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (11)$$

Tabla 19

Evaluación del porcentaje de remoción plomo utilizando como adsorbente la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú

Muestra	Tiempo (min)	muestreo (h)	Muestra	Concentración mg/L
1	00	10:00	Concentración. inicial	4,3236
2	360	16:00		0,0575
3	360	16:00		0,0451
4	360	16:00	Concentración en el equilibrio	0,0930
5	360	16:00		0,0639
6	360	16:00		0,0378
7	360	16:00		0,0317
8	360	16:00		0,0743
9	360	16:00		0,0942
10	360	16:00		0,1092
11	360	16:00		0,0941

Nota: Concentración. Inicial: 4,3236; pH: 7,21; Masa zeolita: 2,5 g; Velocidad de remoción: 150 rpm; Tamaño Partícula: Malla N° 30; Volumen de muestra: 250 mL; Temperatura: 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

2.- En la segunda prueba se tomaron muestras a diferente tamaño de partícula, masa de adsorbente y concentración inicial de la solución, evaluándose en diferentes tiempos de contactos haciendo un total de 36 repeticiones, como se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20
Evaluación del potencial de remoción plomo de la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú

Dimensión		Concentración Plomo (Ceq.) (mg/ L)			
		1	2	3	4
Tamaño partícula	Malla 20	0,0566	0,0561	0,0502	0,0582
	Co: 2,7704				
	Malla 30	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676
	Co: 3,8847				
Cantidad de masa: gramos	Malla 60	0,0206	0,0595	0,0634	0,2209
	Co:4,6376				
	Masa:2,5 g	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676
	Co: 3,8847				
Concentrac ión de la solución: mg/L	Masa:5 g	0,0471	0,0370	0,0341	0,0378
	Co:4,9032				
	Masa:10 g	0,0129	0,0433	0,0225	0,0317
	Co: 4,7824				
Concentrac ión de la solución: mg/L	Co:1,0056	0,0166	0,0823	0,0259	0,0281
	Co:3,8847	0,0408	0,0302	0,0373	0,0676
	Co:8,0864	0,0876	0,0638	0,09588	0,1491

Nota: pH: 7,21; Velocidad de remoción: 150 rpm; Volumen de muestra: 250 mL; Temperatura: 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Evaluación del cumplimiento del ECA - Plomo categoría I-subcategoría A1; agua para consumo humano

Para evaluar la eficiencia en la remoción de la zeolita natural se tomaron muestras del río Chillón a la altura del km 74,5 de la Carretera Canta, cerca al poblado Yaso.

Se colocaron 5 gramos de zeolita de malla 30, en un volumen de 500 mL de la muestra recolectada del río Chillón de pH=7,2 y a una temperatura de 23 °C; sometiéndose a agitación de 150 rpm en test de jarras por un tiempo de contacto de 3 horas, una vez transcurrido el tiempo de contacto, se separó el adsorbente de la solución tratada mediante filtrado, determinarse la concentración de plomo no removido en la muestra de agua tratada y comparándose con el ECA categoría 1, subcategoría A: (Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable, A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección) como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21
Evaluación del cumplimiento del ECA

Muestra	Tiempo (min)	Hora muestreo	Muestra: Agua del río Chillón km. 74.5 carretera Canta	Concentración mg/L
1	00	10:00	Conc. inicial antes tratamiento	0,0233
2	180	13:00	Concentración después del tratamiento	0,0054
3	180	13:00		0,0012
4	180	13:00		0,0009

Nota: Masa zeolita: 5 g; tamaño de partícula malla:30; Volumen solución: 500 mL; 150 rpm; pH: 7,2; Temperatura:23 °C.

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Análisis de datos

3.6.1 Estadísticos utilizados en el análisis de datos

Para el análisis de los datos, se utilizó el programa de Minitab y para la validación de las hipótesis formuladas se utilizó el estadístico paramétrico: (distribución T de

Student) de muestras relacionadas, con un nivel de significancia del 5%, y 95% de confianza, con el nivel crítico de prueba se definieron las zonas de aceptación y de rechazo; determinándose la probabilidad de error con el cálculo del p-valor tomando la decisión, en función a la probabilidad del error, el cual se comparó con el nivel de significancia y el propósito del estudio, para aceptar o rechazar la hipótesis planteada (Córdova Zamora, 2003).

Para evaluar los factores físico químico que influyen en el proceso de adsorción del plomo por la zeolita natural; se utilizaron gráficas de correlación y de dispersión. (Hernandez Sampieri, 2014)

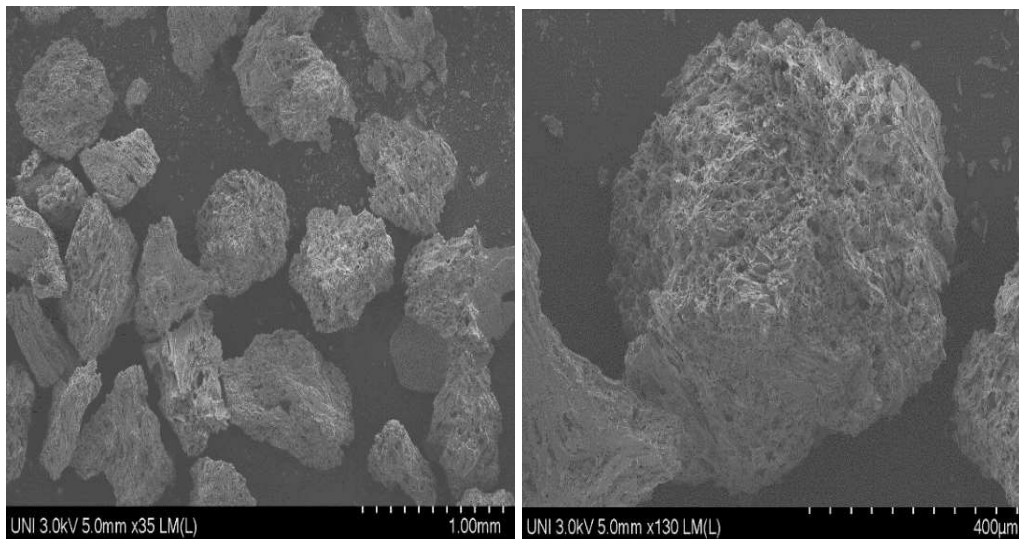
El procesamiento de datos para evaluar la capacidad de adsorción de la zeolita natural y evaluar el modelo matemático de ajuste a las medidas de correlación ($q_e - C_e$) experimentales, se utilizó el programa de Manlab, para obtener los coeficientes de determinación R^2 y los ajustes a los modelos linearizados de Langmuir y Freundlich.

IV Resultados

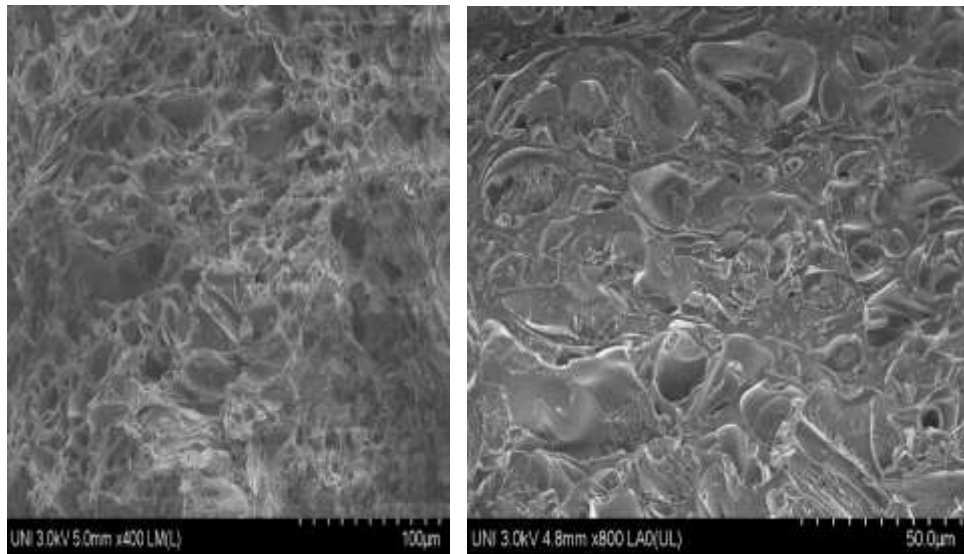
4.1 Composición Fisicoquímica de la Zeolita Natural

4.1.1. Evaluación de la morfología superficial y composición química de la zeolita Natural

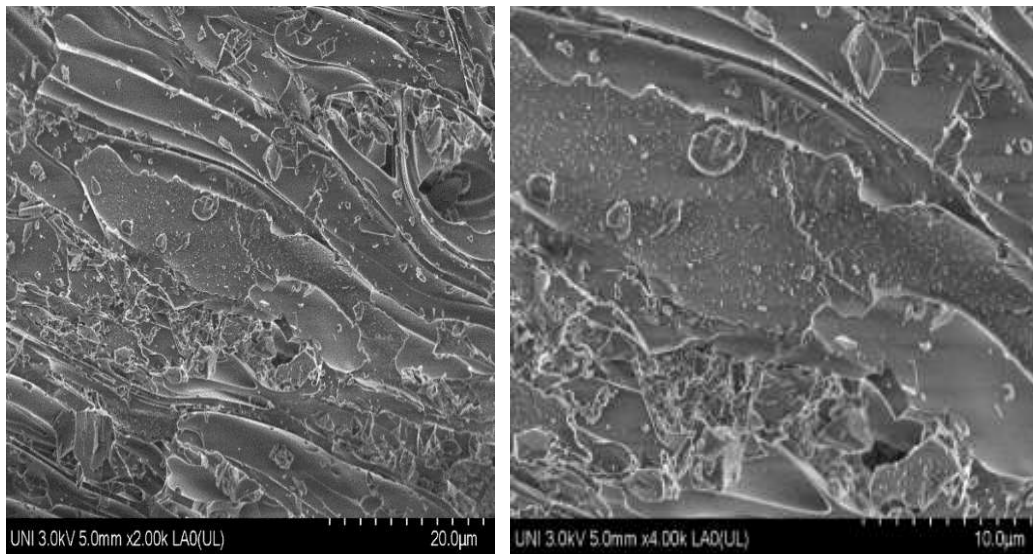
Las Figuras 25, 26, 27 y 28, muestran las imágenes de la morfología por microscopía de barrido electrónico, donde se observan la porosidad del mineral y cristales en forma de placas con una geometría variable



*Figura 25. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 1 mm y 400 um.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 26. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 100 µm y 50 µm.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 27. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 20 µm y 10 µm.
Fuente: Elaboración propia.*

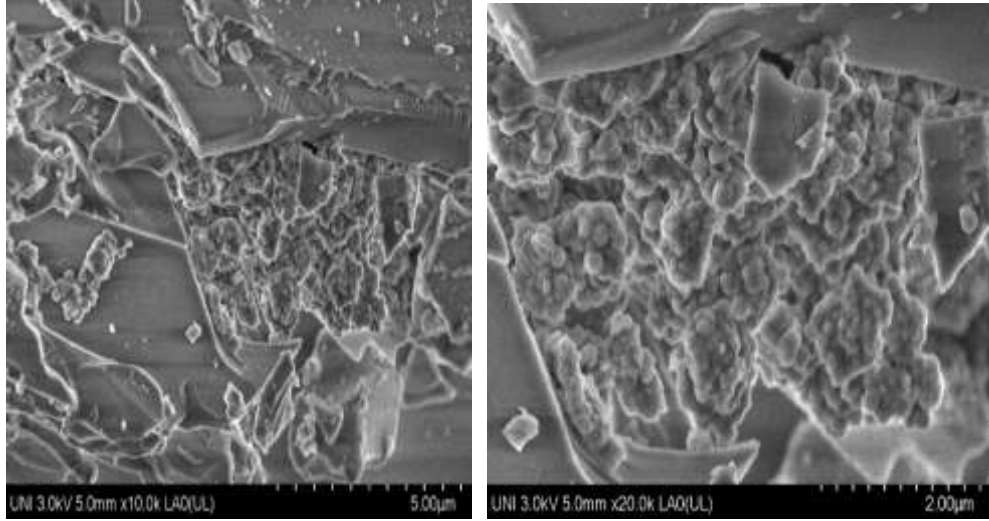


Figura 28. Morfología de la zeolita Natural Yura-Arequipa de 5 μm y 2 μm .
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 29 y la Tabla 22 nos muestran el espectro de la zeolita natural por espectroscopia de energía dispersiva y la composición porcentual atómica de la zeolita en estudio, observándose una relación Si/ Al de 3,347 y la presencia de cationes intercambiables como $\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$.

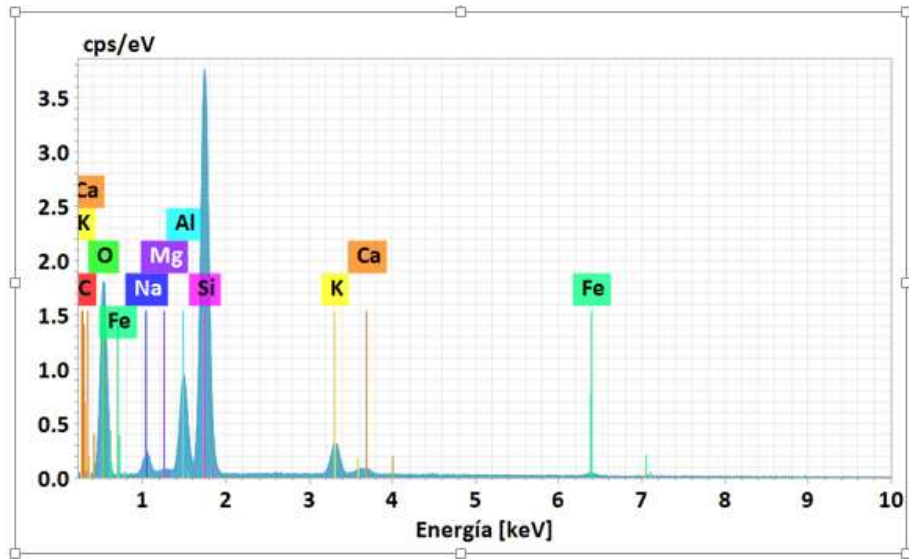


Figura 29. Espectro zeolita Natural por espectroscopia de Energía dispersiva.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22

Composición atómica porcentual de la zeolita natural Yura-Arequipa-Perú

Elemento	Número atómico	Prueba 1 % átomos	Prueba 2 % átomos	promedio % átomos
Carbono	6	2,83	1,97	2,400
Oxígeno	8	66,29	66,12	66,210
Sodio	11	2,56	2,48	2,520
Magnesio	12	0,34	0,37	0,355
Aluminio	13	5,94	6,19	6,065
Silicio	14	19,94	20,66	20,300
Potasio	19	1,59	1,69	1,640
Calcio	20	0,30	0,33	0,315
Hierro	26	0,20	0,19	0,195
Total, porcentaje	-----	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 30, muestra la morfología zeolita natural después de la adsorción del plomo, por microscopía de barrido electrónico, donde se observan la porosidad y canales por donde se desplazan los cationes intercambiables, asimismo el espectro en las figuras 30, y 31, así como en la Tabla 23, valida la presencia de plomo adsorbido por el cristal en un porcentaje atómico de 0,030%.

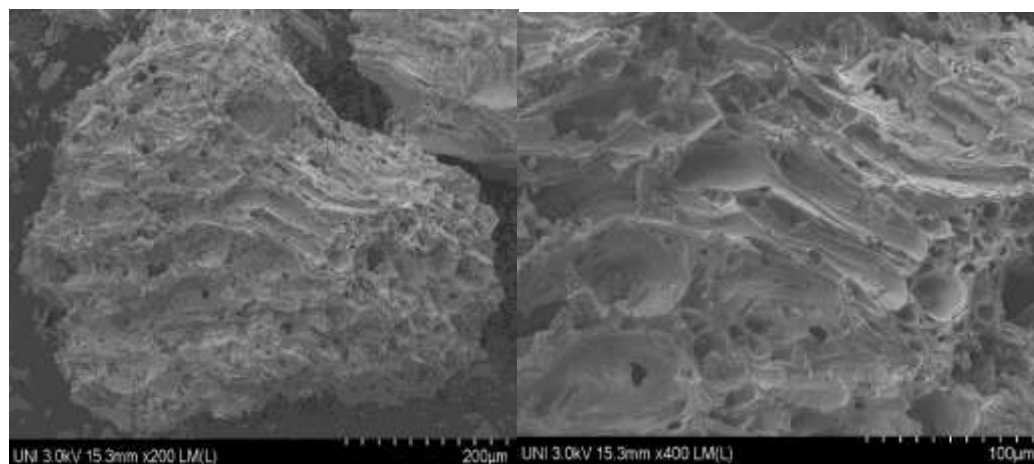


Figura 30. Morfología de la zeolita Natural después de adsorción de Plomo de 200 um y 100 um.
Fuente: Elaboración propia.

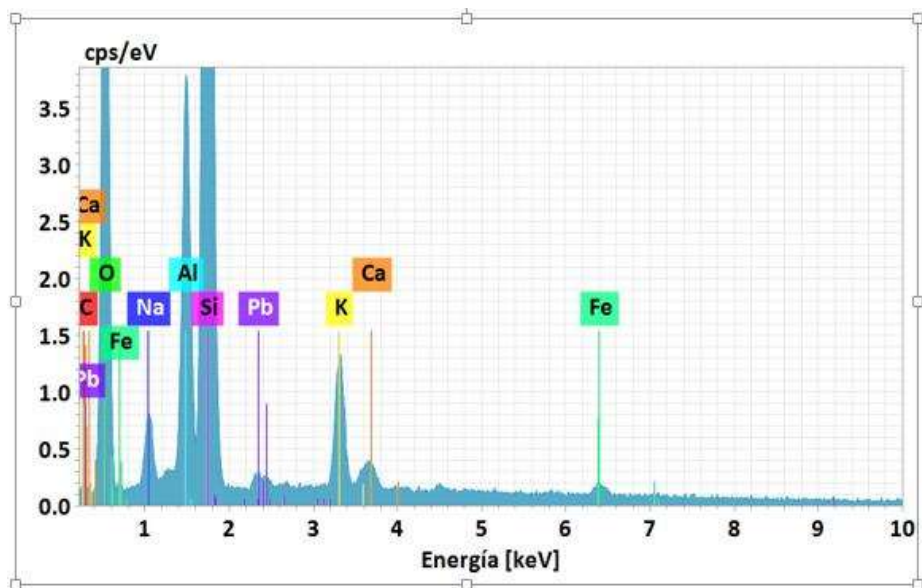


Figura 31. Espectro zeolita natural después del proceso de adsorción de plomo.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23
Composición zeolita natural después del proceso de adsorción de plomo

Elemento	Número atómico	Prueba 1 % átomos	Prueba 2 % átomos	promedio % átomos
Carbono	6	2,70	2,26	2,485
Oxígeno	8	66,37	67,10	66,760
Sodio	11	2,02	2,39	2,210
Aluminio	13	5,79	5,92	5,870
Silicio	14	20,57	19,93	20,270
Potasio	19	1,87	1,63	1,770
Calcio	20	0,34	0,33	0,335
Hierro	26	0,29	0,22	0,270
Plomo	82	0,05	0,01	0,030
Total, porcentaje	-----	100,00	100,00	100,000

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Determinación de la capacidad de intercambio iónico (C.I)

Las pruebas realizadas en solución de NH_4^+ 0,10M, demostraron una capacidad de intercambio iónico total de 0,2936 meq/L, siendo los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) , observándose una capacidad de intercambio iónico de 8,317 mg Ca^{2+} ; 2,265 mg Na^+ , 1,15 mg K^+ ; 0,524 mg Mg^{2+} por gramo de zeolita, que fueron desplazados por el ion NH_4^+ en las pruebas realizadas como podemos observar en las Tabla 24 y25.

Tabla 24
Cationes intercambiables (mg/L) de la zeolita natural

Muestra	Código de Muestra	Concentración de metales intercambiables (mg/L)			
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
Blanco (muestra)	MA-NH4-01	2,463	0,200	0,620	2,130
Muestra 1	MA-NH4-02	10,810	0,693	1,810	4,410
Muestra 2	MA-NH4-03	10,750	0,755	1,730	4,380
Promedio	_____	10,780	0,724	1,770	4,395
(mg M /g Z)	_____	8,317	0,524	1,150	2,265

Nota: Masa zeolita= 1 g
Tiempo de contacto = 360 minutos
pH de la solución: 7,21
Fuente: Elaboración propia.

Solución $\text{NH}_4 \text{Cl}$ =0,25 M
Volumen solución NH_4Cl 0,25

Tabla 25
Capacidad de intercambio iónico zeolita natural

Muestra	Capacidad de Intercambio iónico meq catión/g zeolita				Capacidad Intercambio Total, meq/g
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	
Zeolita Natural	0,2079	0,0218	0,0147	0,0492	0,2936

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Factores que influyen en la cinética de remoción

Los resultados de las pruebas realizadas, mostraron una velocidad de adsorción muy rápida en los primeros minutos, observándose una mayor tasa de remoción del plomo de 98.6 % en los primeros 5 minutos, luego se incrementa gradualmente hasta el 99.3% a los 30 minutos, alcanzando el equilibrio a los 60 minutos, presente en la muestras de agua en los primeros minutos, debido a que los sitios de adsorción en un primer momento están libres y permite que el catión interactúe con los cationes intercambiables.

4.2.1 Influencia del pH en el porcentaje de remoción de plomo

Las pruebas realizadas que se muestran en la Tabla 26 y Figura 32, nos muestran que para un tiempo de contacto de 5 minutos el porcentaje de remoción es de 98,6% a pH = 5 y 67,3% a pH= 3,3, demostrándose la influencia de la concentración de H_3O^+ en el proceso de remoción.

Tabla 26
Influencia del pH en el porcentaje de remoción de plomo de aguas contaminadas

Tiempo minutos	pH = (3,30)		pH = (5,00)		pH = (7,21)	
	Conc. mg/L	%	Conc. mg/L	%	Conc. mg/L	%
00	4,6695	0,00	4,8452	0,00	3,8847	0,00
5	1,5292	67,3	0,0695	98,6	0,0394	99,0
15	1,1132	76,2	0,0574	98,8	0,0553	98,6
30	0,7115	84,8	0,033	99,3	0,0408	98,9
60	0,4664	90,0	0,0441	99,0	0,0302	99,2
180	0,1982	95,8	0,0482	99,0	0,0373	99,0
360	0,2355	95,0	0,0811	98,3	0,0676	98,3

Nota: Masa 2,5 gramos, 150 RPM, tamaño # 30, Ci = 5 ppm, Volumen 250 ml
Fuente: Elaboración propia.

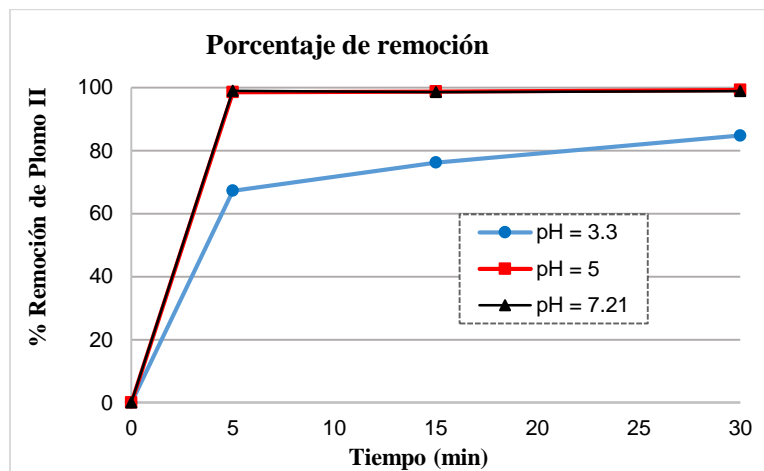


Figura 32. Influencia del pH de la solución en el porcentaje de remoción.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Influencia del pH en cinética de remoción del plomo

La gráfica de correlación concentración de la solución versus tiempo de contacto nos muestra que la velocidad de remoción sigue una ecuación exponencial presentando una velocidad de remoción muy alta en los primeros 5 minutos; llegándose a una tasa de

remoción de $0,9551 \text{ mg Pb/Lmin}^{-1}$ a un $\text{pH} = 5$, como se indica en la Tabla 27 y Figura 33.

Tabla 27
Influencia del pH en la cinética de remoción de plomo

Tiempo minutos	pH = (3,30)		pH = (5,00)		pH = (7,21)	
	Concent. mg/L	Tasa. Rem. mg/Lmin^{-1}	Concent. mg/L	Tasa. Rem. mg/Lmin^{-1}	Concent. mg/L	Tasa. Rem. mg/Lmin^{-1}
00	4,6695	0,0000	4,8452	0,0000	3,8847	0,0000
5	1,5292	0,6286	0,0695	0,9551	0,0394	0,7690
15	1,1132	0,0416	0,0574	0,0021	0,0553	0,0016
30	0,7115	0,0027	0,033	0,0016	0,0408	0,0009
60	0,4664	0,0008	0,0441	0,0004	0,0302	0,0004

Fuente: Elaboración propia.

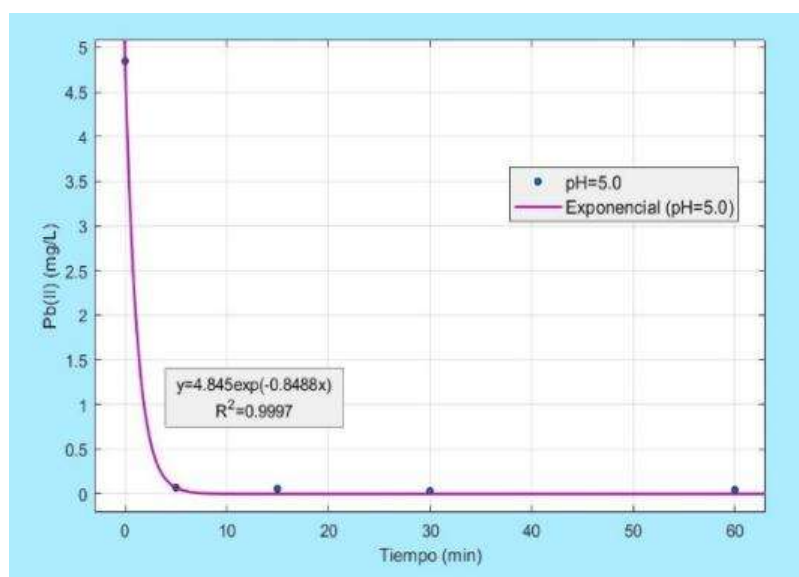


Figura 33. Cinética de remoción del plomo a $\text{pH}= 5$.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se observa que para un tiempo de contacto de 5 minutos una velocidad de remoción de 0,7690 mg Pb/Lmin⁻¹ para un pH = 7,21 y 0,6286 mg Pb/Lmin⁻¹ para un pH = 3,3, como se indica en las Figuras 34 y 35.

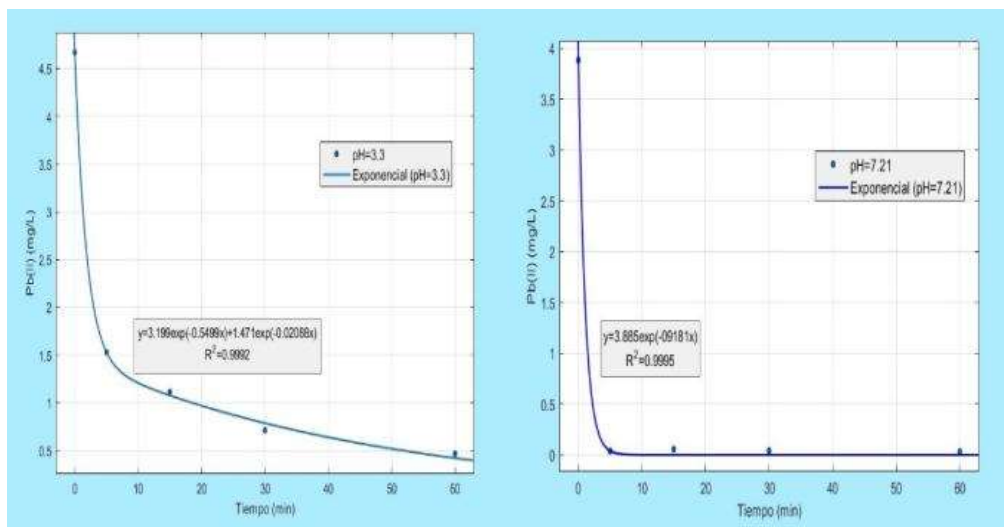


Figura 34. Influencia del pH de la muestra de agua en la cinética de remoción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.

Fuente: Elaboración propia.

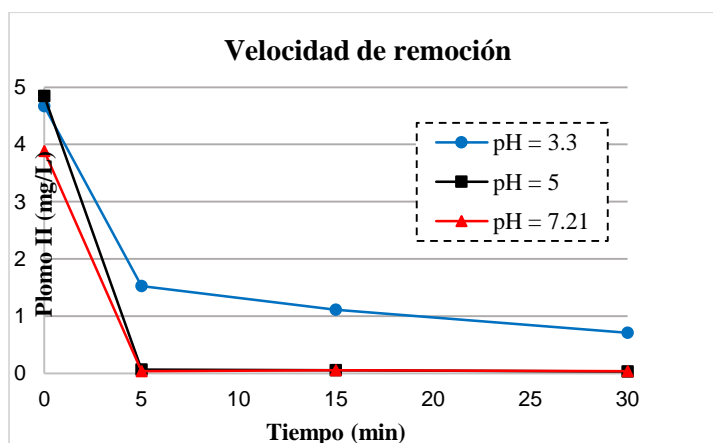


Figura 35. Velocidad de remoción de plomo a diferentes concentraciones de solución (zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú).

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Influencia del pH de la solución en la cinética de adsorción de plomo

por la zeolita natural

Las pruebas realizadas que se indica en la Tabla 28 y Figura 36, nos muestra que la concentración de H_3O^+ presentes en la solución, influye en la cinética de adsorción de plomo, lográndose en un tiempo de 5 minutos una adsorción de 1,9103 mg Pb/gZ a pH= 5 y 1,2561 mg Pb/gZ a pH= 3,3, como se puede observar en la Figura 36.

Tabla 28
Influencia del pH en la cinética de adsorción de plomo

Tiempo (minutos)	pH = (3,30)		pH = (5,00)		pH = (7,21)	
	Conc. mg/L	q (mgPb/gZ)	Conc. mg/L	q (mgPb/gZ)	Conc. mg/L	q (mgPb/gZ)
00	4,6695	---	4,8452	---	3,8847	---
5	1,5292	1,2561	0,0695	1,9103	0,0394	1,5381
15	1,1132	1,4225	0,0574	1,9151	0,0553	1,5317
30	0,7115	1,5832	0,033	1,9248	0,0408	1,5376
60	0,4664	1,6812	0,0441	1,9204	0,0302	1,5418
180	0,1982	1,7885	0,0482	1,9188	0,0373	1,5389
360	0,2355	1,7736	0,0811	1,9056	0,0676	1,5268

Nota: Masa 2,5 gramos, 150 RPM, tamaño # 30, Volumen 250 ml, Temperatura: 22 °C.
Fuente: Elaboración propia.

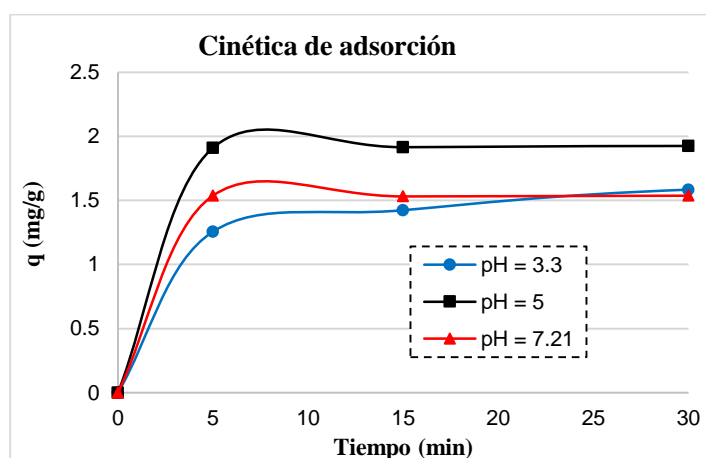


Figura 36. Influencia del pH de la solución en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.
Fuente: Elaboración propia.

Prueba de hipótesis: Valoración de la influencia del pH en la cinética de adsorción del plomo por la zeolita natural en estudio.

H_0 =La cinética de adsorción de Pb^{2+} de la zeolita natural a pH: 3,3 = pH: 5

H_1 =La cinética de adsorción de Pb^{2+} de la zeolita natural a pH: 3,3 < pH 5

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 < \mu_2$

Se supuso igualdad de varianzas para el análisis.

Tabla 29
Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis

N° muestras	pH	Media $\mu = q$	Desviación. Estandar.	Error estándar de la media
$\mu_1 = 6$	3,3	1,584	0,210	0,086
$\mu_2 = 6$	5,0	1,91586	0,00703	0,0029

Nota: μ : media de la cinética de adsorción de Plomo
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30
Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	Límite superior de 95% para la diferencia
-0,3317	0,1487	-0,1761

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31
Prueba hipótesis

Valor T	GL	Valor p
-3.86	10	0.002

Fuente: Elaboración propia.

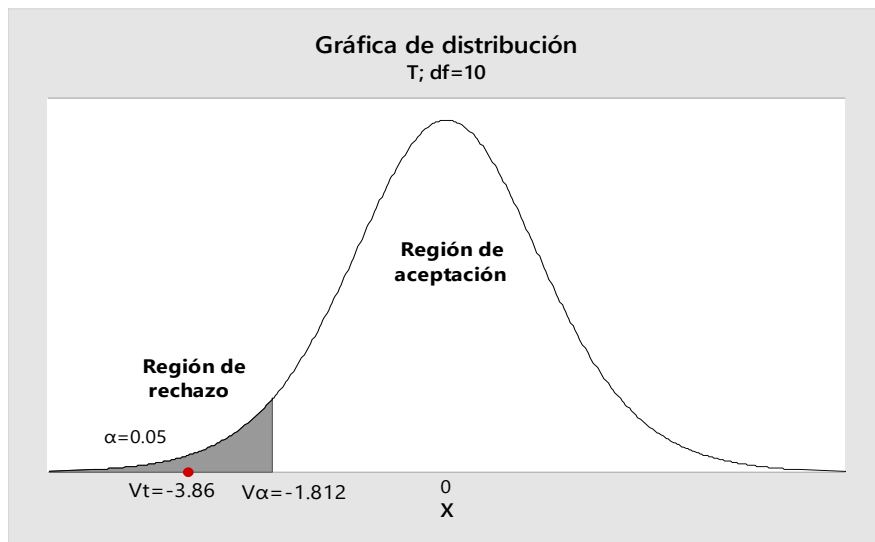


Figura 37. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo
Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 37, el valor T de la prueba de hipótesis -3.86 es menor que -1,812 y cae en la zona de rechazo para H_0 por lo tanto se rechaza el H_0 y se acepta H_1 . Asimismo, se observa que el valor $p = 0,002$, es menor que el nivel de significancia: 0,05 por lo tanto se acepta la H_1 .

4.2.4 Influencia del tamaño de partícula de la zeolita en la cinética de adsorción de plomo

Los resultados de la Tabla 32 y Figura 38, muestran que el tamaño de partícula de malla 60 presenta una mayor cinética de adsorción de 1,84 mg de Pb /g Z frente a 1,0897 mg de Pb / g Z para el tamaño de partícula de malla 20, para un mismo tiempo de contacto.

Tabla 32
Influencia del tamaño de partícula en la cinética de adsorción del Plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales

Tiempo (min)	Malla N° 20		Malla N° 30		Malla N° 60	
	Conc. mg/L	q (gPb/gZ)	Conc. mg/L	q (mgPb/gZ)	Conc. mg/L	q mgPb/gZ)
00	2,7704	-----	3,8847	-----	4,6376	-----
5	0,046	1,0897	0,0394	1,5381	0,0324	1,8400
15	0,037	1,0934	0,0553	1,5317	0,015	1,8490
30	0,0566	1,0855	0,0408	1,5376	0,0206	1,8468
60	0,0561	1,0857	0,0302	1,5418	0,0595	1,8312
180	0,0502	1,0881	0,0373	1,5389	0,0634	1,8296
360	0,0582	1,0848	0,0676	1,5268	0,2209	1,7666

Masa 2,5 gramos, 150 RPM, pH: 7,21, Vol.muestra: 250 ml; temperatura: 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

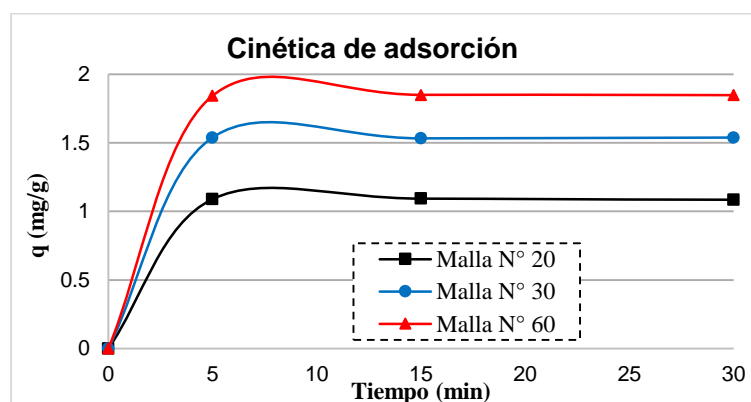


Figura 38. Influencia del tamaño de partícula en la cinética de Adsorción de plomo por la zeolita natural.

Fuente: Elaboración propia.

Prueba de hipótesis: Valoración de la influencia del tamaño de partícula de la zeolita en la cinética de adsorción:

H_0 = El tamaño de partícula de malla 60 de zeolita natural presenta igual cinética de adsorción del plomo presente en las aguas contaminadas, que la de malla 20.

H_1 = El tamaño de partícula de malla 20 de zeolita natural presenta una menor cinética de adsorción del plomo presente en las aguas contaminadas que la de malla 60.

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 < \mu_2$

Se supuso igualdad de varianzas para este análisis.

Tabla 33
Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis

N° muestras	Malla	Media $\mu = q$	Desviación. Estandar.	Error estándar de la media
$\mu_1 = 6$	20	1,08789	0,00325	0,0013
$\mu_2 = 6$	60	1,8276	0,0309	0,013

Nota: μ : media de la capacidad de adsorción de Plomo (mgPb/g Z)
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34
Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	Límite superior de 95% para la diferencia
-0,7397	0,0220	-0,7167

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35
Prueba hipótesis

Valor T	GL	Valor p
-58,36	10	0,000

Fuente: Elaboración propia.

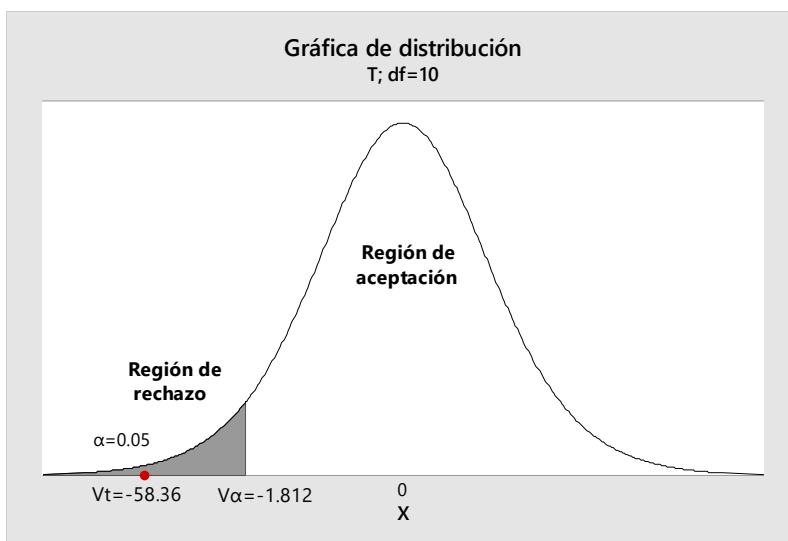


Figura 39. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.
 Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 39 el V_t es menor que el valor V_α , por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 donde $\mu_1 < \mu_2$. Asimismo, se observa que $V_p <$ que el nivel de significancia por lo tanto se acepta H_1 . Demostrándose que el tamaño de partícula de la

zeolita influye significativamente en el proceso de adsorción del plomo presente en aguas contaminadas y que a menor tamaño de partícula mayor será la cinética de adsorción del plomo por la zeolita.

4.2.5 Evaluación de la capacidad de adsorción en función a la masa del adsorbente

Las pruebas realizadas que se muestran Tabla 36, muestran que el porcentaje de remoción se incrementa en solo 0,1 % para una masa de 10 gramos respecto a la de 5 gramos; no mejorando de forma efectiva con el aumento de la masa del adsorbente.

Tabla 36
Influencia de la masa del adsorbente en el porcentaje de remoción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales

Tiempo minutos	2,5 gramos		5 gramos		10 gramos	
	Concentración mg/L	%	Concentración mg/L	%	Concentración mg/L	%
00	3,8847	-	4,9032	-	4,7824	-
5	0,0394	99,0%	0,0401	99,2%	0,0345	99,3%
15	0,0553	98,6%	0,0293	99,4%	0,0563	98,8%
30	0,0408	98,9%	0,0471	99,0%	0,0129	99,7%
60	0,0302	99,2%	0,037	99,2%	0,0433	99,1%
180	0,0373	99,0%	0,0341	99,3%	0,0225	99,5%
360	0,0676	98,3%	0,0378	99,2%	0,0317	99,3%

Nota: Tamaño de partícula malla N° 30; 150 RPM, pH: 7,21; volumen muestra: 250 ml; temperatura: 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se observa que existe una relación mg de plomo/gramo de zeolita mucho mayor cuando se utiliza menor masa del adsorbente, lo que indica que a mayor masa de adsorbente habrá más sitios disponibles a ser llenados, como se observa en la Tabla 37 y Figura 40.

Tabla 37

Influencia de la masa del adsorbente en la cinética de adsorción de plomo por zeolitas Naturales

Tiempo (minutos)	2,5 gramos		5 gramos		10 gramos	
	Conc. mg/L	q = (mgM/gZ)	Conc. mg/L	q = (mgM/gZ)	Conc. mg/L	q = (mgM/gZ)
00	3,8847	-----	4,9032	-----	4,7824	-----
5	0,0394	1,5381	0,0401	0,9726	0,0345	0,4747
15	0,0553	1,537	0,0293	0,9747	0,0563	0,4726
30	0,0408	1,5376	0,0471	0,9712	0,0129	0,4769
60	0,0302	1,5418	0,0370	0,9730	0,0433	0,4739
180	0,0373	1,5389	0,0341	0,9738	0,0225	0,4759
360	0,0676	1,5268	0,0378	0,9731	0,0317	0,4750

Tamaño de partícula malla N° 30; 150 RPM, pH: 7,21, volumen muestra; 250 ml; temperatura: 21°C
Fuente: Elaboración propia.

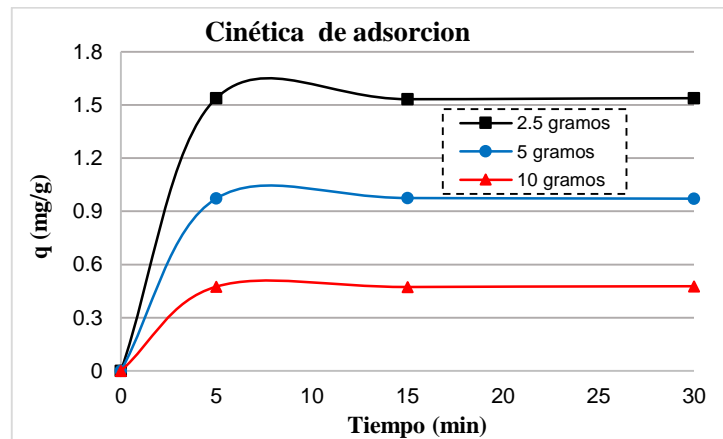


Figura 40. Influencia de la masa del adsorbente en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.
Fuente: Elaboración propia.

Prueba de hipótesis: Valoración de la influencia de la masa del adsorbente en la cinética de adsorción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales.

H_0 = El tamaño de masa no influye en la relación mg de plomo adsorbido por gramo de zeolita.

H_1 = El tamaño de masa si influye en la relación mg de plomo adsorbido por gramo de zeolita.

Hipótesis nula $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$

Se supuso igualdad de varianzas para este análisis.

Tabla 38
Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis

N° muestras	Masa	Media $\mu = \bar{q}$	Desviación. Estandar.	Error estándar de la media
$\mu_1 = 6$	2,5	1,53584	0,00550	0,0022
$\mu_2 = 6$	10	0,47489	0,00153	0,00062

Nota: μ : media de la capacidad de adsorción de Plomo (mgPb/g Z)
Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 39
Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	Límite superior de 95% para la diferencia
1,06095	0,00403	1,05673

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 40
Prueba hipótesis

Valor T	GL	Valor p
455,56	10	0,000

Fuente: Elaboración propia.

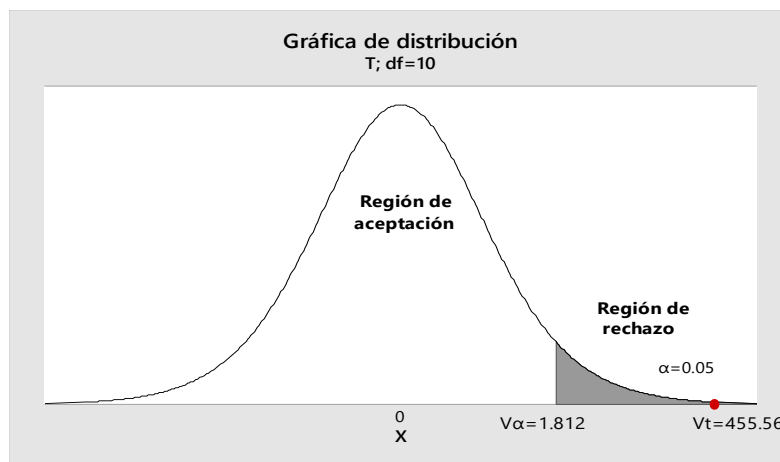


Figura 41. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 41 el Vt es mayor que el valor $V\alpha$ entonces se rechaza H_0 y se acepta H_1 donde $\mu_1 > \mu_2$. Asimismo, se observa que $Vp <$ que el nivel de significancia por lo tanto se acepta H_1 . Los resultados estadísticos validan la hipótesis formulada, demostrándose que la masa de la zeolita influye significativamente en la relación mg plomo adsorbido por gramo de zeolita más no en el porcentaje de remoción.

4.2.6 Evaluación de la cinética de adsorción en función a la concentración de plomo en la solución

Los resultados de las pruebas realizadas muestran que la cinética de adsorción del plomo por la zeolita depende de la concentración inicial de la muestra de agua, observándose en los primeros 5 minutos de tiempo de contacto una adsorción de 3,0750 mg de plomo/ gramo de zeolita, para una concentración inicial de 8,0864 mg/L mientras que para una concentración de 1,0056 mg/L se obtuvo una adsorción de 0,3941 mg plomo/gramo de zeolita como se muestra en la Tabla 41 y Figura 42.

Caso contrario ocurre con el porcentaje de remoción, donde se observa un porcentaje de remoción del 98% para una concentración de 1,0056 mg/L, incrementándose a un 99% para una concentración de 3,8847 mg/L y disminuyendo a un 95 % a una concentración de 8,0864 mg/L, Tabla 42 y Figura 43.

Tabla 41
Influencia de la concentración de la solución en la cinética de adsorción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales

Tiempo (minutos)	1,0056 mg/L		3,8847 mg/L		8,0864 mg/L	
	Conc. mg/L	q (mgM/gZ)	Conc. mg/L	q (mgM/gZ)	Conc. mg/L	q (mgM/gZ)
00	1,0056	----	3,8847	----	8,0864	----
5	0,0202	0,3941	0,0394	1,5381	0,3989	3,0750
15	0,0671	0,3754	0,0553	1,5317	0,1457	3,1762
30	0,0166	0,3956	0,0408	1,5376	0,0876	3,1995
60	0,0823	0,3693	0,0302	1,5418	0,0638	3,2090
180	0,0259	0,3918	0,0373	1,5389	0,09588	3,1962
360	0,0281	0,3900	0,0676	1,5268	0,1491	3,1749

Nota: Masa 2,5 g zeolita; malla N° 30; 150 RPM, pH: 7,21; temperatura, 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

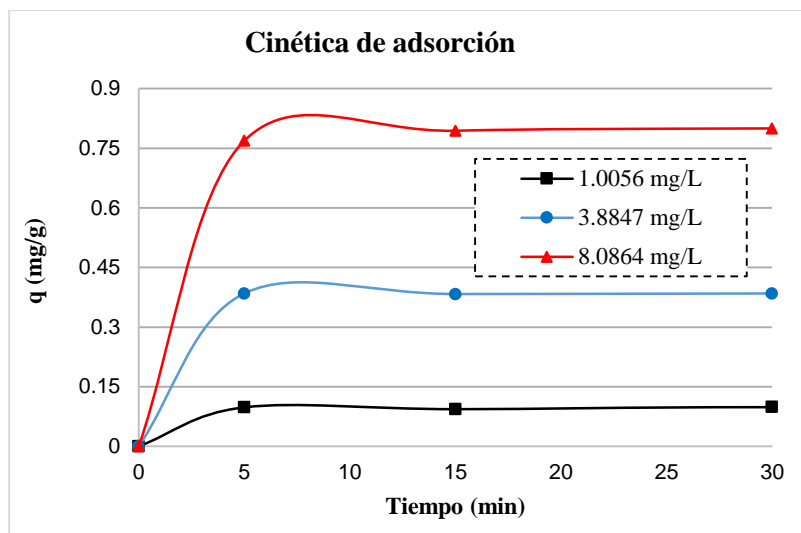


Figura 42. Influencia de la concentración de la solución en la cinética de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42

Influencia de la concentración de la solución en el porcentaje de remoción del plomo en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales

Tiempo (minutos)	1,0056 mg/L		3,8847 mg/L		8,0864 mg/L	
	Conc. mg/L	%	Conc. mg/L	%	Conc. mg/L	%
00	1,0056	-	3,8847	-	8,0864	-
5	0,0202	98,0%	0,0394	99,0%	0,3989	95,1%
15	0,0671	93,3%	0,0553	98,6%	0,1457	98,2%
30	0,0166	98,3%	0,0408	98,9%	0,0876	98,9%
60	0,0823	91,8%	0,0302	99,2%	0,0638	99,2%
180	0,0259	97,4%	0,0373	99,0%	0,09588	98,8%
360	0,0281	97,2%	0,0676	98,3%	0,1491	98,2%

Nota: Masa 2,5g zeolita; partícula malla 30, 150 RPM, pH: 7,21; temperatura: 21 °C.
Fuente: Elaboración propia.

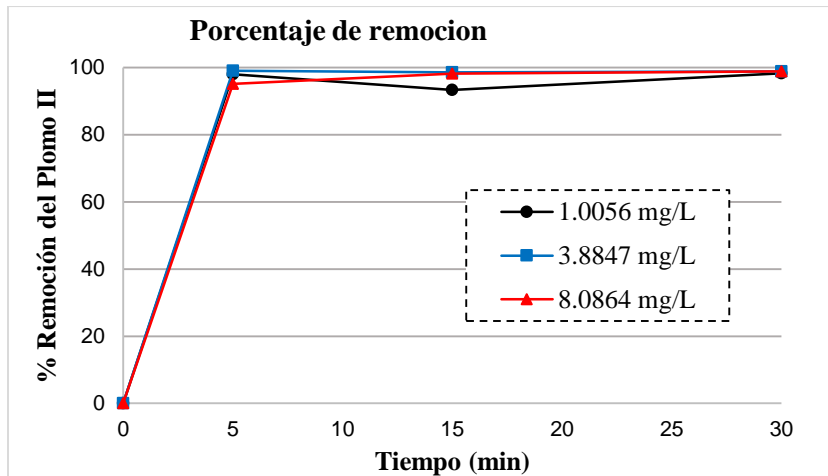


Figura 43. Influencia de la concentración de plomo en el porcentaje de remoción en aguas contaminadas, tratadas con zeolitas Naturales.
Fuente: Elaboración propia.

Prueba de hipótesis: Prueba de T e IC de dos muestras de 1,0056 mg/L y 8.0864mg/L, para valorar la influencia de la concentración de la solución en la adsorción de plomo por la zeolita natural en estudio.

H_0 = La concentración de la solución no influye en la cinética de adsorción del plomo por la zeolita natural en estudio.

H_1 = La concentración de la solución si influye significativamente en la adsorción del plomo por la zeolita natural en estudio.

Se propuso igualdad de varianzas para este análisis.

Hipótesis nula

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

Hipótesis alterna

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$$

Tabla 43

Estadística descriptiva de la prueba de hipótesis

Nº muestras	Concentración mg/L	Media $\mu = q$	Desviación. Estandar.	Error estándar de la media
$\mu_1 = 6$	1,0056	0,3862	0,0110	0,0045
$\mu_2 = 6$	8,0864	3,1718	0,0493	0,020

Nota: μ : media de la capacidad de adsorción de Plomo (mg Pb/g Z)

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 44

Estimación de la diferencia

Diferencia	Desv.Est. agrupada	Límite superior de 95% para la diferencia
-2,7856	0,0357	-2,7482

Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 45

Prueba hipótesis

Valor T	GL	Valor p
-135,07	10	0,000

Fuente: *Elaboración propia.*

La prueba estadística que se muestra en la Figura 44, indica un valor de V_t menor que el valor V_α , por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 donde $\mu_1 < \mu_2$, asimismo, se observa que V_p es $<$ que el nivel de significancia (V_α), por lo tanto, se acepta H_1 .

Demostrándose que la concentración de $[Pb^{2+}]$ en la solución influye significativamente en la capacidad de adsorción del plomo por la zeolita natural.

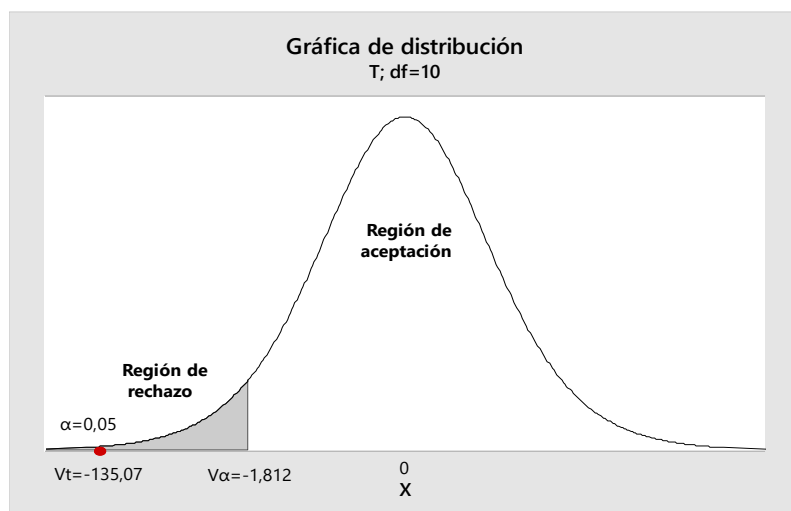


Figura 44. Distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Determinación de la capacidad de adsorción de la zeolita natural Yura –Arequipa-

Perú.

Los resultados equilibrio de adsorción nos indican que la capacidad máxima de adsorción (q_m) de la zeolita natural de Yura-Arequipa- Perú, es de 3,55 mg Pb^{2+} /gramo de zeolita tal como se muestra en la Tabla 46; asimismo la gráfica Figura 45 nos da como resultado una isoterma cóncava, lo que nos indica que el proceso de adsorción Pb^{2+} / zeolita es favorable.

Tabla 46
Evaluación de la Capacidad de adsorción de la zeolita Natural de Yura Arequipa Perú

Muestra	Co (mg/L)	Ce (mg/L)	(Co - Ce) (mg/L)	q_e $= \frac{(Co - Ce)V}{m}$ (mg Pb/g Z)
1	1,0056	0,0281	0,9474	0,0947
2	2,7704	0,0582	2,7122	0,2712
3	3,8847	0,0676	3,8171	0,3817
4	4,3236	0,0941	4,2295	0,4229
5	8,0864	0,1491	7,9373	0,7937
6	18,6508	0,3052	18,3456	1,8345
7	40,6448	5,0567	35,5881	3,5588

Nota: Masa zeolita: 2,5g; tamaño partícula: malla # 30; RPM: 150; pH: 7,21; Temperatura: 21 °C, V= Volumen de muestra 0,25 L; 360 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

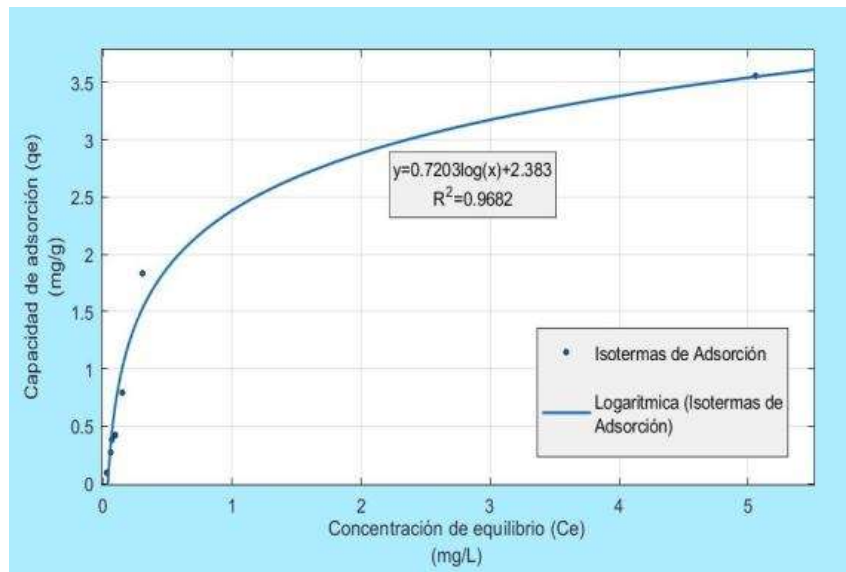


Figura 45. Isotherma de adsorción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.

Fuente: Elaboración propia.

Los ajustes lineales de los modelos de isotermas; reportaron, una constante de determinación para Langmuir $R^2 = 0,9825$ mayor que el de Freundlich $R^2 = 0,848$, tal como se muestra en las Figuras 46 y 47, con la Tabla 47.

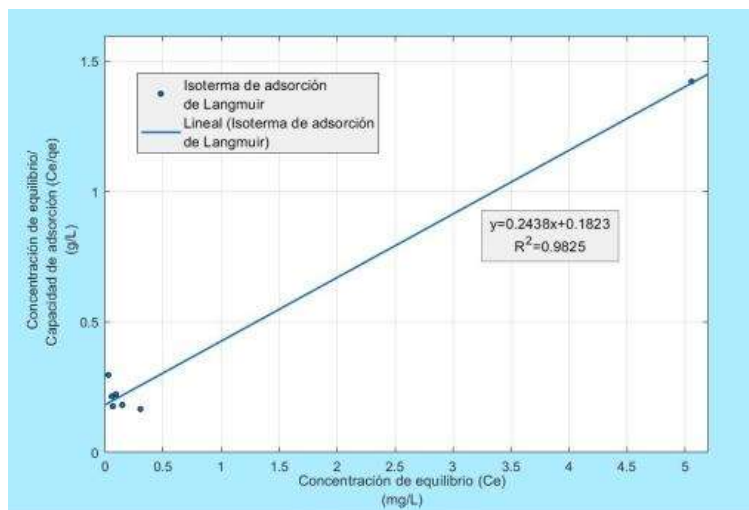


Figura 46. Isotherma (lineal) de adsorción de Langmuir, de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.

Fuente: Elaboración propia.

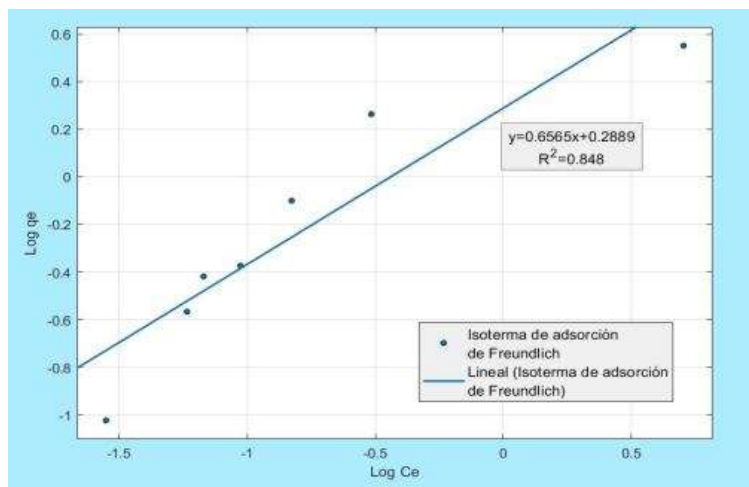


Figura 47. Isotherma (lineal) de adsorción de Freundlich del plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47
Constantes de Isotermas

LANGMUIR			FREUNDLICH		
qm					
mgPb/g Z	K _L (L/mg)	R ²	1/n	K _f (L/mg)	R ²
3,5581	0,8676	0,9825	0,6565	0,2889	0,848

Nota: K_L: constante de Langmuir; K_f : constante de Freundlich 1/n
Fuente: Elaboración propia.

El factor de separación (R_L), obtenido de la ecuación de Langmuir donde muestra valores que van de 0,0275 hasta 0,5347, lo que indica que el proceso de adsorción de la zeolita por el plomo es favorable, dado que los valores de R_L son mayores que cero y menores que uno. Asimismo, la gráfica de correlación muestra que la adsorción del plomo por la zeolita natural fue muy rápida en los primeros 5 minutos y la cobertura superficial (θ) va aumentando conforme se incrementa la concentración que va de un valor de 0,4650 hasta un valor de 0,9724, observándose la influencia de la concentración en la cobertura superficial de la zeolita como adsorbente Tabla 48.

Tabla 48
Cobertura superficial versus concentración de la solución

Muestra	Co (mg/L) [Pb ²⁺]	$RL = \frac{1}{1 + K_L C_o}$	$(\theta) = \frac{K_L C_o}{1 + K_L C_o}$
1	1,0056	0,53	0,4659
2	2,7704	0,29	0,7058
3	3,8847	0,22	0,7711
4	4,3236	0,21	0,7900
5	8,0864	0,12	0,8752
6	18,6508	0,058	0,9417
7	40,6448	0,027	0,9724

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Determinación del potencial de remoción de la zeolita natural

4.4.1 Muestra de agua contaminada tratada con zeolita, con diez repeticiones

Los resultados de remoción de plomo se muestran en la tabla 49, donde se observa que la zeolita natural de Yura-Arequipa Perú, presenta un porcentaje de remoción de plomo en promedio mayor al 98 %.

Tabla 49
Evaluación del potencial de remoción de plomo de la Zeolita natural

N° Pruebas	Muestra Agua contaminada con plomo	Concentración mg/L	Porcentaje de remoción %
	Sin tratamiento	4,3236	0,000
1	Tratada con zeolita natural	0,0575	98,67
2		0,0451	98,95
3		0,0930	97,84
4		0,0639	98,52
5		0,0378	99,12
6		0,0317	99,26
7		0,0743	98,28
8		0,0942	97,82
9		0,1092	97,47
10		0,0941	97,82
Promedio		0,07008	98,375

Masa zeolita: 2,5 g; partícula malla: 30; 150 RPM, pH: 7,21, temperatura: 21 °C.

Fuente: *Elaboración propia.*

Prueba de hipótesis para validar el potencial de remoción de la zeolita natural. Para un nivel de significancia del 5% y un tamaño de muestra de 10 repeticiones, se propusieron las siguientes hipótesis:

H_0 = La zeolita natural de Yura-Arequipa –Perú, presenta un potencial de remoción de plomo presente en aguas contaminadas igual al 98%.

H_1 = La zeolita natural de Yura-Arequipa –Perú, presenta un potencial de remoción de plomo presente en aguas contaminadas mayor al 98%.

Hipótesis nula $H_0: \mu = 98\%$ remoción de plomo

Hipótesis alterna $H_1: \mu > 98\%$ remoción de plomo

Tabla 50
Resultados estadística de la prueba de hipótesis

	Media	Desviación.	Error	Límite		
N° muestras	μ	Estandar.	estándar de la media	inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
10	98,375	0,624	0,197	98,013	1,90	0,045

Nota: μ : media de % Remoción de Plomo.
Fuente: Elaboración propia.

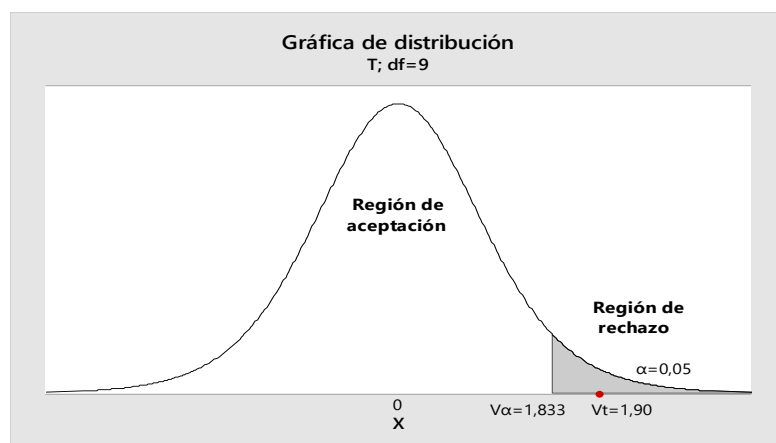


Figura 48. Distribución de datos y valores críticos del porcentaje de remoción de plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú.
Fuente: Elaboración propia.

La prueba estadística muestra que $V_T = 1,90 >$ que el $V_\alpha = 1,833$ encontrándose H_0 en el área de rechazo; por lo tanto, se acepta H_1 y se concluye que el porcentaje promedio de remoción de la zeolita natural es mayor al 98 % con nivel de confianza del 95%. Asimismo, el resultado estadístico nos indica que el p valor = 0,045, es menor que el nivel de significancia 0,05, por lo tanto, se acepta H_1 y se rechaza H_0 , encontrándose en la región de aceptación como se muestra en la figura 48.

La estadística nos reporta un error estándar (\mathcal{E}) de 0,197, lo que indica que el valor promedio (μ) de la población de muestra es de $98,375 \pm 0,197$ con un intervalo de confianza del 95%; encontrándose un límite inferior de 98,013 y con una probabilidad del 5% de significancia que no se encuentre en ese rango.

4.4.2 Muestra de agua contaminada tratada con zeolitas naturales con 36 repeticiones

De la zona de Yura-Arequipa-Perú, con 36 repeticiones. Los resultados de las pruebas realizadas para determinar el porcentaje de remoción mostraron que la zeolita natural presenta un porcentaje de remoción mayor a un 98%, independientemente de la concentración de la solución, tamaño de partícula y cantidad de masa como se muestra en la Tabla 51.

Tabla 51
Evaluación del potencial de remoción de plomo de la Zeolita natural de Yura-Arequipa-Perú

Muestra		Porcentaje de remoción Zeolita Natural (%)			
Parámetro	Dimensión	1	2	3	4
Tamaño partícula	Malla 20	98,0	98,0	98,2	97,9
	Malla 30	98,9	98,2	99,0	98,3
	Malla 60	99,6	98,7	98,6	95,2
Cantidad de masa: gramos	2 g	98,9	99,2	99,0	98,3
	5 g	99,0	99,2	99,3	99,2
	10 g	99,7	99,1	99,5	99,3
Concentración de la solución: mg/L	1,0056	98,3	91,8	97,4	97,2
	3,8847	98,9	99,2	99,0	98,3
	8,0864	98,9	99,2	98,8	98,2

Nota: Temperatura: 21 °C; pH: 7,21; Velocidad de remoción, 150 rpm; Volumen de muestra: 250 mL. Tiempo de contacto: 60 minutos.
 Fuente: Elaboración propia.

Para la hipótesis formulada:

Hipótesis nula $H_0: \mu = 98\%$ remoción de plomo

Hipótesis alterna $H_1: \mu > 98\%$ remoción de plomo

Para un nivel de significancia del 5% y un tamaño de muestra de 36 repeticiones se obtiene un $V\alpha = 1,69$ y $V_T = 1,84$; mostrándose los resultados de prueba de hipótesis en la Tabla 52 y en la Figura 49.

Tabla 52
Resultados estadística de la prueba de hipótesis

N° muestras	Media μ	Desviación. Estandar.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ	Valor T	Valor p
36	98,431	1,407	0,235	98,034	1,84	0,037

Fuente: Elaboración propia.

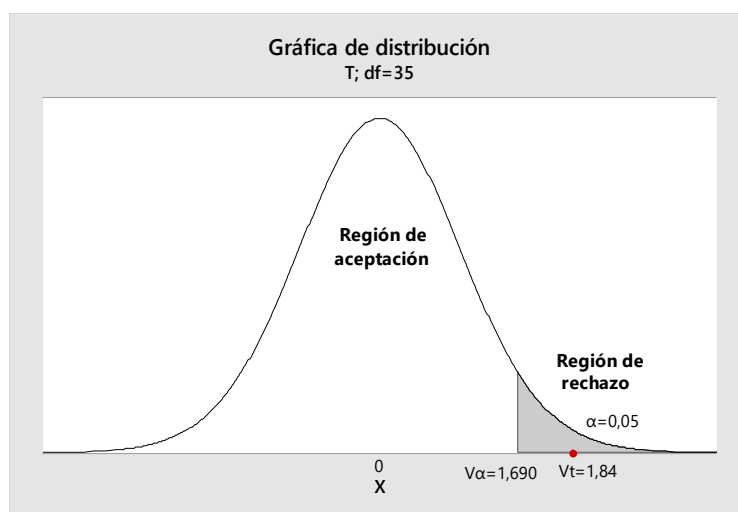


Figura 49. Gráfica de distribución y valores críticos (Tamaño muestra 36 y $\alpha=0,05$).

Fuente: Elaboración propia.

- a) Los resultados estadísticos muestran que $V_T=1,84$ es mayor que el $V\alpha = 1,690$ encontrándose H_0 en el área de rechazo; Por lo tanto, se acepta H_1 y se concluye que el porcentaje promedio de remoción de la zeolita natural es mayor al 98 % con un nivel de confianza del 95%.

b) El resultado de la prueba estadística nos indica que el p valor = 0,037, es menor que el nivel de significancia 0,05, por lo tanto, se acepta H_1 , encontrándose en la zona de aceptación como se muestra en la Figura 49 y se rechaza la hipótesis H_0 .

c) La estadística nos reporta un error estándar (ϵ) de 0.235, lo que indica que el valor promedio (μ) de la población de muestra es de $98,431 \pm 0,235$ con un intervalo de confianza del 95%; encontrándose un valor límite inferior de 98,034% y con una probabilidad del 5% de significancia que no se encuentre en ese rango.

4.5 Evaluación del cumplimiento del ECA - Plomo

Los resultados que se muestran en la Tabla 53 y Figura 50, nos indican que las muestras de aguas superficiales del río Chillón tratadas con zeolitas naturales de la zona Yura-Arequipa-Perú, eliminan el plomo de estas aguas cumpliendo con los límites máximo permisible, tal como lo indica la guía de calidad de agua para consumo humano y el ECA categoría A1 subcategoría A1. “Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección y que reúnen las condiciones para ser destinadas al abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de acorde con la normativa vigente”, (MINAM, D.S. 004, 2017) .

Tabla 53

Calidad del agua superficial tratada con zeolitas naturales para uso de consumo humano; Carretera Canta km. 74,5

Muestra	Tiempo Tratam. (min)	Muestra: Agua del río Chillón km. 74,5 carretera Canta	Concentración agua superficial mg/L	ECA Categoría 1 Subcategoría A1 mg/L	
MST		Muestra agua superficial sin tratamiento	0,0233	>0,010	No cumple
ECA:			0,010	0,010	
MT01	180	Muestra agua tratada con zeolita natural	0,0054	<0,010	Cumple
MT02	180		0,0012	<0,010	Cumple
MT03	180		0,0009	<0,010	Cumple
Promedio		Agua tratada	0,0025	<0,010	Cumple

Temperatura: 21°C; pH: 7,21; Velocidad de remoción: 150 rpm; Volumen de muestra: 250 mL. tiempo de contacto:60 minutos.

Fuente: Elaboración propia.

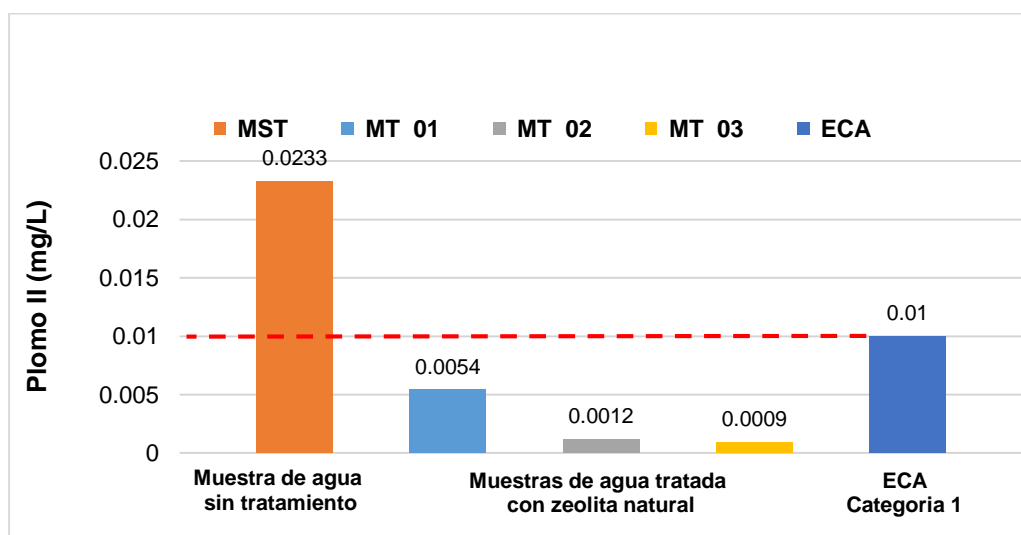


Figura 50. Calidad del agua superficial tratada con zeolita natural para uso de consumo humano

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Análisis e Interpretación

4.6.1 Composición Físicoquímica de la zeolita natural

Evaluación de la composición físicoquímica y morfológica: La Evaluación de la morfología superficial de las Figuras 25, 26, 27 y 28, nos muestra que la superficie del mineral es microporosa, con canales que permiten la transferencia del metal entre el espacio intracristalino y el medio circundante, propiedad conocida como selectividad geométrica (Costafreda, 2011). El espectro y composición química del mineral (Figura 29 y Tabla 22), nos muestra la presencia atómica del oxígeno seguida del silicio y aluminio; calcio, sodio, potasio y magnesio; con una relación Si/ Al de 3,347, lo que demuestra que átomos de Si^{4+} han sido remplazados por átomos de Al^{3+} dando lugar a la aparición de una carga negativa que es balanceada por cationes intercambiables, encontrándose en su estructura los iones (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), que pueden ser remplazados por metales pesados en el proceso de adsorción.

Las Figuras 30 y 31, con la Tabla 23, nos muestran la presencia de plomo en la estructura y composición del mineral, demostrando que la zeolita natural en estudio tiene la capacidad de adsorber plomo como producto del intercambio iónico entre el plomo presente en la muestra de agua y los cationes presentes en la zeolita natural (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

4.6.2 Evaluación de la capacidad de intercambio iónico (C.I)

Las pruebas realizadas indican que la zeolita en estudio presenta una capacidad de intercambio iónico total de 0,293 meq de metal/g de zeolita natural, como se muestra en

las Tablas 24 y 25, encontrándose los cationes intercambiables: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ y una relación Si/ Al de 3,347, demostrándose la presencia de cationes intercambiables que neutralizan el desbalance de carga negativa que se da cuando el aluminio reemplaza al silicio en la estructura del cristal, cationes que son reemplazados en el proceso de adsorción por el plomo presente en las aguas contaminadas; característica que hacen de la zeolita natural en estudio, de Yura –Arequipa- Perú, un adsorbente seguro para la remoción de plomo presente en aguas contaminadas.

4.6.3 Factores que influyen en el proceso de adsorción

Influencia del pH en la cinética de remoción: Las pruebas experimentales obtenidas en las Figuras 32 y 36, muestran que a pH menores a 3, el porcentaje de remoción como la capacidad de adsorción de la zeolita natural disminuye; debido a que a pH bajos predominan los iones H_3O^+ en la solución y compiten con los cationes por los mismos sitios intercambiables ocupando los sitios activos antes que los iones metálicos. Asimismo se observa que a pH= 5 se logra una mayor capacidad de adsorción de plomo y una velocidad máxima de remoción de $0,955 \text{ mg Pb/Lmin}^{-1}$, dado a que la especie de Pb^{2+} predomina en ese rango de pH, como se observa en el diagrama de especiación del plomo (Figura 9) y disminuye la concentración de iones H_3O^+ , lo que facilita el acceso de iones metálicos a los sitios activos en la superficie del adsorbente; caso contrario ocurre a pH > a 5, la capacidad de adsorción disminuye debido a que no todo el plomo se encuentra como Pb^{2+} sino parte de este metal se encuentra como $\text{Pb}(\text{OH})^-$.

Las pruebas estadísticas demuestran que el pH es uno de los parámetros que determina el proceso de adsorción del plomo por la zeolita natural como se muestra en la Figura 37 de distribución de datos y valores críticos de adsorción de plomo.

Influencia del tamaño de partícula en la cinética de remoción La correlación de los datos tamaño de partícula versus tiempo de contacto, Figura 38 nos muestra que a menor tamaño de partícula mayor tasa de adsorción del plomo por la zeolita para un mismo tiempo, demostrando que la adsorción de cationes, no solo tiene lugar en la superficie exterior sino también en el interior de la partícula; donde las partículas más pequeñas permiten una mayor difusión intra-partícula, por darse mayor accesibilidad del metal a los sitios internos; acortando la distancia de difusión que tiene que recorrer para llegar al sitio de intercambio catiónico.

La prueba estadística demuestra que el tamaño de partícula de la zeolita influye significativamente en el proceso de adsorción del plomo presente en aguas contaminadas y que a menor tamaño de partícula mayor será la cinética de remoción del plomo por la zeolita.

Evaluación de la cinética de remoción en función a la masa del adsorbente:

La tabla 36 nos muestra que el aumento de la masa del adsorbente no mejora de forma efectiva el porcentaje de remoción; asimismo se observa en la Figura 40, que el aumento de la masa del adsorbente disminuye la relación mg de plomo/ gramo de zeolita, demostrando que a mayor cantidad de masa existen más sitios disponibles para la adsorción de metales (plomo), por unidad de masa del adsorbente. Asimismo, los

resultados estadísticos demuestran que la cantidad de masa utilizada en el proceso de adsorción influye significativamente en la relación mg plomo adsorbido por gramo de zeolita y que es inversamente proporcional a la cantidad de masa adsorbida Figura 40.

Evaluación de la cinética de remoción en función a la concentración de plomo en la solución: La Figura 42 muestra que la cinética de adsorción del plomo por la zeolita es directamente proporcional a la concentración de plomo en la solución, generándose una diferencia entre la concentración inicial y la interfaz sólido – líquido bastante alta que permite superar inicialmente la resistencia a la transferencia de masa asociada a la adsorción de plomo por la zeolita natural, dando como resultado una tasa de adsorción muy alta en un primer momento seguida de un proceso lento que se debe a la difusión del plomo en los canales interiores de la zeolita, hasta que esta alcance el punto de saturación. Caso contrario ocurre con el porcentaje de remoción que casi no se ve afectado cuando se incrementa la concentración de la solución figura 43. Asimismo, el resultado de la prueba estadística valida la influencia de la $[Pb^{2+}]$ de la solución en la capacidad de adsorción del plomo por la zeolita natural.

4.7 Determinación de la capacidad de adsorción de la zeolita natural

Los resultados de equilibrio de adsorción mostrados en la Figura 45, nos indican que la capacidad de adsorción (q_m) de la zeolita natural de Yura-Arequipa- Perú, es de 3,55 mg Pb^{2+} /gramo de zeolita. La correlación de los datos de metal adsorbido por gramo de zeolita ($q_e = \text{mgPb/g Z}$) versus la concentración en el equilibrio ($C_e = C_e \text{ (mg/L)}$), nos da como resultado una isoterma cóncava, lo que nos indica que el proceso de adsorción Pb^{2+} / zeolita es favorable, (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

La correlación linealizada de los datos se ajustó mejor a la isoterma de Lagmuir con una constante de determinación $R^2 = 0,9825$ mayor que el de Freundlich $R^2 = 0,848$, tal como se muestra en las Figura 46 y 47 con la Tabla 47.

El factor de separación (R_L), obtenido de la ecuación de Langmuir nos muestra valores que van de 0,0275 hasta 0,5347, lo que indica que el proceso de adsorción de la zeolita por el plomo es favorable, dado que los valores de R_L son mayores que cero y menores que 1. Asimismo, la gráfica de correlación muestra que la adsorción del plomo por la zeolita natural es muy rápida en los primeros 5 minutos y la cobertura superficial (θ) va aumentando conforme se incrementa la concentración de la solución que va de un valor de 0,4650 hasta un valor de 0,9724, muy cercano a la cobertura total del adsorbente como se muestra en la Tabla 48.

4.8 Determinación del potencial de remoción de la zeolita natural

1.- La aplicación del estadístico T de Student, a las pruebas realizadas para una muestra con 10 repeticiones bajo las mismas condiciones, con un nivel de significancia del 5%; mostraron un valor de $V_T = 1,90 >$ que el $V_\alpha = 1,833$, encontrándose H_0 en el área de rechazo y siendo el p valor = 0,045, menor que el nivel de significancia 0,05, por lo tanto, se acepta H_1 y se rechaza H_0 , como se muestra en la Figura 45. También la estadística nos reporta un error estándar (ϵ) de 0,197, indicando que el valor promedio (μ) de la población de muestra es de $98,375 \pm 0,197$ con un intervalo de confianza del 95% y con una probabilidad del 5% de significancia que no se encuentre en ese rango.

2.- La aplicación del estadístico T de Student para determinar el potencial de remoción variando; tamaño de partícula, masa del adsorbente y concentración de la solución con un tamaño de muestra de 36 pruebas y para un nivel de significancia del 5% reportaron, valores de $V_T = 1,84$ mayor que el $V_\alpha = 1,690$ y el p valor = 0,037, menor que el nivel de significancia 0,05, por lo que se rechazó H_0 y acepta H_1 encontrándose en la región de aceptación como se muestra en la Figura 46; asimismo la estadística nos reporta un error estándar (ϵ) de 0,235, lo que indica que el valor promedio (μ) de la población de muestra es de $98,431 \pm 0,235$ con un intervalo de confianza del 95%; encontrándose un valor límite inferior de 98,034% y con una probabilidad del 5% de significancia que no se encuentre en ese rango. Los resultados de las pruebas estadísticas validan que la zeolita natural presenta un porcentaje de 98% de remoción, independientemente de la concentración de la solución, tamaño de partícula y cantidad de masa como se muestra en la Tabla 51, Figura 49.

4.9 Evaluación del cumplimiento del ECA - Plomo

Los resultados de las aguas superficiales del río Chillón, carretera Canta km 74,5; mostraron una concentración promedio de plomo (II) = 0,0233 mg/L, valor que supera los límites máximos permisibles de calidad de agua para consumo humano; ECA categoría A1 subcategoría A1. “Aguas que pueden ser empleadas para el abastecimiento de agua para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente”, (MINAM, D.S. 004, 2017). Asimismo, se observa que estas aguas tratadas con zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa Perú presentaron valores promedio de plomo (II) muy por debajo de los límites máximo permisible como se muestra en la figura

50; cumpliendo con la normativa de la guía de calidad del agua para consumo humano y el ECA categoría A1 subcategoría A1.

V Discusión de resultados

5.1 Composición Físicoquímica de la zeolita natural

5.1.1 Evaluación de la composición físicoquímica y morfológica

Los análisis por microscopía de barrido electrónico de las Figuras 25, 26, 27 y 28; nos muestran un mineral de estructura microporosa, con canales, cavidades y de estructura abierta que tiene gran capacidad para incorporar y ceder agua y cationes permitiendo la transferencia del metal entre el espacio intracristalino y el medio circundante, características típicas de una zeolita, tal como lo indica (Costafreda, 2011).

Los resultados por espectroscopia de energía dispersiva, Figura 29 y la Tabla 22, mostraron que el cristal está formado estructuralmente por oxígeno, silicio, aluminio; con una relación Si/ Al de 3,347 y cationes de compensación, lo que demuestra que átomos de Si^{4+} han sido remplazados por átomos de Al^{3+} dando lugar a la aparición de una carga negativa que es equilibrada por cationes intercambiables que se encuentran en su estructura cristalina (Ca^{2+} Mg^{2+} K^+ Na^+), asegurando una apertura de poros que discriminan el paso de moléculas a través de ellas, por lo que son conocidas como tamices moleculares según, (Payra & Dutta, 2003). Presenta un espectro y una composición porcentual atómica: (O: 66%; Si: 20,3%; Al: 6,07%; Na: 2,52%; K: 1,64%; Mg: 0,355; Ca: 0,31 similar a lo reportado por (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013), donde indica que la presencia de los iones de intercambio como Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ en la estructura de la zeolita aseguran su utilización como medio adsorbente de intercambio iónico en el proceso de tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Asimismo (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001), indica que la selectividad por el plomo depende

de la composición de la zeolita y que esta decrece conforme se incrementa la relación Si/Al en la estructura de la zeolita natural.

5.1.2 Evaluación de la capacidad de intercambio iónico (C.I)

Los resultados de las pruebas utilizando solución de NH_4^+ , mostraron la presencia de cationes intercambiables en la estructura del cristal, en la siguiente relación $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$; y una capacidad de intercambio de 0,293 meq de metal/g de zeolita natural, cantidad que está directamente relacionada con la cantidad de aluminio presente en la red del cristal y depende de la composición química y naturaleza micro porosa del cristal y el tipo del catión a ser adsorbido (Tamaño, carga iónica y forma), tal como lo indica (Rodríguez & Rodríguez, 1997) en la eliminación de metales tóxicos con zeolitas naturales. La presencia de cationes intercambiables como Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; K^+ ; Na^+ en la zeolita en estudio, nos muestra que esta, presenta selectividad por el plomo, como lo indica (Chabalina & Martínez, 2014), en el estudio remoción de Pb^{2+} en cama empacada empleando zeolita natural donde demuestra que la afinidad de la zeolita por el Pb^{2+} , es mucho mayor que la del Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; K^+ ; Na^+ ; lo cual hace de este adsorbente natural un seguro agente con gran afinidad por Pb^{2+} .

5.2. Factores que influyen en el proceso de adsorción

Los resultados mostraron que la velocidad de remoción sigue una ecuación exponencial presentando una velocidad de remoción muy alta en los primeros 5 minutos; llegándose a una tasa de remoción de $0,9551 \text{ mg Pb/L min}^{-1}$ a un $\text{pH} = 5$, como se muestra en la Tabla 27 y Figura 33, seguida de una tasa de remoción más lenta, confirmando que

en los primeros minutos los sitios de adsorción están disponibles y los cationes interactúan fácilmente con estos repercutiendo en el coeficientes de transferencia de masa externa y la difusividad intrapartícula, (Motsi, 2010)

5.2.1 Influencia del pH en la cinética de remoción

Los resultados que se muestran que el pH es uno de los parámetros que controla el proceso de adsorción del plomo presente en la solución, dado que este determina la carga superficial del adsorbente y la protonación del electrolito, influyendo significativamente tanto en el carácter de los iones como en el carácter estructural de la zeolita; observándose en las pruebas realizadas que a $\text{pH} < 5$, predominan los iones H_3O^+ los que compiten por los sitios activos con el plomo; mientras que a un $\text{pH} > 5$ no todo el plomo se encuentra como Pb^{2+} sino parte de este metal se encuentra como $\text{Pb}(\text{OH})^-$ hidrox-complejos, disminuyendo la carga neta del ion y también la afinidad con el adsorbente (Cuizano, Reyes, Domínguez, Llanos, & Navarro, 2010). Caso contrario ocurre a $\text{pH} = 5$ como se muestran en las Figuras 33, 34 , 35 y 36, donde se observa que a $\text{pH} = 5$ la remoción presenta una tasa de $0,9551 \text{ mgPb/Lmin}^{-1}$ y la cinética de adsorción es de $1,9151 \text{ mg Pb/g Z}$, a este pH predomina la especie de Pb^{2+} , como se observa en el diagrama de especiación del plomo de la Figura 9 y disminuye la concentración de iones H_3O^+ , lo que facilita el acceso de iones metálicos a los sitios activos en la superficie del adsorbente; por lo que el uso de zeolita para tratar los drenajes ácidos de mina debe limitarse a soluciones ligeramente ácidas, confirmándose que el valor del pH determina la adsorción de, (Tejada, Villabona, & Gárces, 2015) .

5.2.2 Influencia del tamaño de partícula de la zeolita en la cinética de adsorción de plomo

Los resultados mostraron que el tamaño de partícula influye significativamente en el proceso de adsorción y que a medida que este disminuye se incrementa la capacidad de adsorción como se muestra en la Figura 38, demostrando que la adsorción de cationes, no solo tiene lugar en la superficie exterior sino también en el interior de la partícula; donde las partículas más pequeñas permiten una mayor difusión intrapartícula, por darse mayor accesibilidad del metal a los sitios internos; acortando la distancia de difusión que tiene que recorrer para llegar al sitio de intercambio catiónico; corroborándose lo indicado por (Motsi, 2010).

5.2.3 Influencia del tamaño de masa en la cinética de adsorción de plomo

Las pruebas realizadas muestran que el incremento de masa del adsorbente no incrementa significativamente el porcentaje de adsorción, similar a lo encontrado por (Taha M.Elmosri, 2014) en el estudio de cinética de adsorción del plomo en agua por adsorbentes naturales, caso contrario el aumento de la masa del adsorbente disminuye la relación mg de plomo/ gramo de cómo se observa en la Figura 40, comprobándose que a mayor cantidad de masa existen más sitios disponibles para la adsorción de metales (plomo).

5.2.4. Influencia de la concentración de la solución en la cinética de adsorción de plomo

Los resultados muestran que la cinética de adsorción del plomo por la zeolita depende de la concentración inicial de la solución mostradas en las Figura 40 y 41 , donde

se observa que la cinética de adsorción del plomo por la zeolita es directamente proporcional a la concentración de plomo en la solución, generándose una diferencia entre la concentración inicial y la interfaz sólido-líquido bastante alta que permite superar inicialmente la resistencia a la transferencia de masa asociada a la adsorción de plomo por la zeolita natural, dando como resultado una tasa de adsorción muy alta en un primer momento seguida de un proceso lento que se debe a la difusión del plomo en los canales interiores de la zeolita, hasta que esta alcance el punto de saturación, conclusión similar a la que llevo (Motsi, 2010).

5.3 Evaluación del proceso de adsorción del plomo por la zeolita natural de Yura-Arequipa Perú

Las isotermas obtenidas utilizando la zeolita natural de Yura Arequipa- Perú, para la remoción de plomo, mostraron que el modelo más representativo fue el de Langmuir, con una constante de determinación $R^2 = 0,9825$ mayor que el de Freundlich $R^2 = 0,848$, tal como se observan en las Figuras 46 y 47; con una capacidad máxima de adsorción de $3,55 \text{ mg Pb}^{2+}/\text{gramo}$ de zeolita como se muestra en la Figura 45. y una constante de adsorción $K_L = 0,86 \text{ L/mg}$; constante que relaciona la afinidad con los sitios de unión y un factor de separación (R_L), que van de $0,0275$ hasta $0,5347$, mostrando que el proceso de adsorción de la zeolita por el plomo es favorable, dado que los valores de R_L son mayores que cero y menores que uno. Asimismo la gráfica de correlación Figura 45, muestra que la adsorción del plomo por la zeolita natural es muy rápida en los primeros 5 minutos y la cobertura superficial (θ) va aumentando conforme se incrementa la concentración de la solución que va de un valor de $0,4650$ hasta $0,9724$, muy cercano a la cobertura total del adsorbente como se muestra en la Tabla 48; demostrándose lo

indicado por (Motsi, 2010) la adsorción máxima se da cuando la superficie está cubierta por una mono capa de adsorbato, resultados similares de isothermas de adsorción mostraron (Alvarado, Zotelo, Meza, & Aubert, 2013) en la remoción de plomo por la zeolita natural mexicana tipo chabasita; (Taha M.Elmosri, 2014) en la eliminación de plomo (II) utilizando hojas de *Dobera Glabra* Forssk.

5.4. Determinación del potencial de remoción de la zeolita natural

Los resultados mostraron que independientemente de la masa del adsorbente, tamaño de partícula y concentración de la solución; las zeolitas naturales de la zona de Yura Arequipa Perú, eliminan el plomo de las aguas contaminadas en un 98%; casos similares mostraron estudios realizados por (Leiva, Sánchez, Hernández, & Guerrero, 2001) removiendo el 72% de plomo presente en la muestra, utilizando como adsorbente zeolitas naturales de San Luis de Potosí; (Rios, Appasamy, & Clive, 2011) removió el 75 % del plomo (II) presente en las aguas utilizando zeolitas tipo faujasita. Asimismo, las pruebas realizadas mostraron que la adsorción del plomo es dependiente del pH y que la remoción máxima se da a un pH = 5; sin embargo, las pruebas para determinar el potencial de remoción se realizaron a pH= 7,21, por encontrarse las aguas superficiales de los ríos Chillón y Rímac en ese rango de pH.

5.5 Evaluación del cumplimiento del ECA Plomo

Los resultados mostraron que las aguas superficiales del río Chillón Figura 50 muestran que las aguas superficiales del río Chillón tratadas con zeolitas naturales de la zona Yura-Arequipa-Perú, cumplen con los límites máximo permisible, tal como lo indica la guía de calidad de agua para consumo humano y el ECA categoría A1 subcategoría A1;

...“aguas que pueden ser destinadas al abastecimiento para consumo humano con simple desinfección, de conformidad con la normativa vigente”, (MINAM, D.S. 004, 2017)

VI Conclusiones

6.1 Conclusión General

Las zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa son aluminosilicatos de alta porosidad con una relación Si/Al: 3,347 y una capacidad de intercambio iónico de 0,293 meq de metal/g de zeolita. Las isothermas de adsorción se ajustaron al modelo de Langmuir con $R^2 = 0,9825$; la capacidad de adsorción es de 3,55 mg Pb^{2+} /gramo de zeolita, con un proceso de remoción del Pb^{2+} muy rápido en los primeros 5 minutos y pH óptimo de remoción de 5 y con un potencial de remoción del 98 %; características que hacen de este adsorbente un agente seguro para la remoción del plomo presente en aguas contaminadas y sobre todo a ser utilizadas como medio filtrante en las zonas altoandinas de nuestro país

6.2 Conclusiones específicas

1. Las zeolitas de la zona de Yura Arequipa Perú, son aluminosilicato de alta porosidad, con canales y cavidades que discriminan el paso de moléculas, con una relación Si/Al: 3,347 y una capacidad de intercambio iónico de 0,293 meq de metal/g de zeolita natural, que permite que el compuesto tenga una carga negativa balanceada por cationes intercambiables como (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), características que hacen de este mineral un adsorbente natural seguro para la captura del plomo, dado que la afinidad del plomo por la zeolita natural es mucho mayor que los cationes intercambiables que forman parte de la estructura de la zeolita.
2. La cinética de adsorción es un proceso heterogéneo, con una tasa de remoción muy alta en los primeros 5 minutos; donde el pH es uno de los factores que controla el proceso de remoción del plomo; lográndose una mayor tasa de adsorción y de remoción a un pH = 5 y tamaño de partícula de malla 60. La cinética de adsorción es directamente proporcional a la concentración de plomo en la solución, generándose una tasa de adsorción muy alta en un primer

- momento seguida de un proceso lento que se debe a la difusión del plomo en los canales interiores de la zeolita, hasta que esta alcance el punto de saturación.
3. Las isotermas obtenidas utilizando la zeolita natural de Yura Arequipa- Perú, para la remoción de plomo, mostraron que el modelo más representativo fue el de Langmuir con una constante de determinación $R^2 = 0,9825$ y capacidad máxima de adsorción de $3,55 \text{ mg Pb}^{2+}/\text{gramo}$ de zeolita a $\text{pH}=7,2$, con constante de adsorción $K_L = 0,86 \text{ L/mg}$; factor de separación (R_L), que van de $0,0275$ hasta $0,5347$ y la cobertura superficial (θ) que va de un valor de $0,4650$ hasta $0,9724$, mostrando que el proceso de adsorción de la zeolita por el plomo es favorable.
 4. Los resultados del estadístico aplicado, nos reportó que la zeolita natural remueve el 98% del plomo presente en aguas contaminadas a condiciones que se encuentran las aguas superficiales de las cuencas del río Chillón y Rímac: $\text{pH}= 7,21$ y temperatura $22 \text{ }^\circ\text{C}$, independientemente del tamaño de partícula, masa del adsorbente y concentración de la solución.
 5. Las aguas superficiales del río Chillón tratadas con zeolitas naturales de la zona Yura-Arequipa-Perú, cumplen con los límites máximo permisible, tal como lo indica la guía de calidad de agua para consumo humano y el ECA categoría A1 subcategoría A1.

VII Recomendaciones

1. Continuar con las pruebas de remoción con otros iones metálicos simultáneamente, para evaluar la competencia entre ellos y la capacidad de remoción en cada caso.
2. Diseñar un sistema prototipo de tratamiento de lecho fijo a flujo continuo para su aplicación en aguas superficiales de las cuencas medias altas de nuestro país.
3. Implementar un sistema de tratamiento de aguas superficiales en las cuencas medias altas utilizando como filtro zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa Perú.

VIII Referencias

Trabajos citados

- Acevedo, D., Builes, S., Ordoñez, C., & López, I. (Marzo de 2011). Evaluación de la eficiencia de una Batería de filtros Empacados en Zeolitas en la Remoción de Metales Pesados Presentes en un Licor Mixto Bajo Condiciones de Laboratorio. (U. d. Medellin, Ed.) *Revista de Ingeniería*, 10(18), 31-42. Recuperado el 26 de diciembre de 2016, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v10n18/v10n18a04.pdf>
- Alvarado, J., Zotelo, M., Meza, D., & Aubert, F. (febrero de 2013). Evaluación de la Potencialidad de una Chabasita Natural Mexicana en la Remoción de Plomo en agua. (U. N. México, Ed.) *Contaminación Ambiental*, 29(2), 201-210. Recuperado el 21 de Octubre de 2016, de <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/30743/34627>
- ANA. (31 de Marzo de 2009). *Ley de recursos Hídricos N° 29338*. Autoridad Nacional del Agua. Lima: Autoridad Nacional del Agua. Recuperado el 23 de enero de 2018, de www.ana.gob.pe/media/316755/leyrh.pdf
- ANA. (11 de 01 de 2016). *Protocolo para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos*. Lima. Lima: Ministerio de Agricultura. Recuperado el 25 de marzo de 2019, de http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._010-2016-ana_0.pdf
- ANA. (2011). *Identificación de fuentes contaminantes en la cuenca del río Rímac*. Autoridad Nacional del Agua, Lima. Lima: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos. Recuperado el 28 de julio de 2018, de <https://docplayer.es/18625902-Identificacion-de-fuentes-contaminantes-en-la-cuenca-del-rio-rimac-direccion-de-gestion-de-calidad-de-los-recursos-hidricos.html>
- Angeles, L. R. (2011). *Isotermas de Adsorción de Cationes Múltiples en Solución Acuosa Mediante Borra de Café Peruano*. Universidad Nacional del Callao, Lima. Callao: Vicerrectorado de Investigación. Recuperado el 16 de 04 de 2017, de www.unac.edu.pe/.../IF_ANGELES%20VILLON_FCNM.
- Arango, N., Perez, J., Gochi, Y., & Sánchez, M. (16 de Mayo de 2011). Zeolitas a Partir de Cenizas Volantes Generadas en las Centrales Carboeléctricas Para el Tratamiento de agua contaminada con MN y Pb. (I. M. A.C, Ed.) *Tecnología. Ciencia, Educación* ,

- 14(1-2), 5-13. Recuperado el 23 de 12 de 2017, de Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48219771002>
- Argandoña, A., & Isea, R. (2011). *ISO 26 000, Una Guía Para la Responsabilidad Social de las Organizaciones*. Universidad de Navarra. Navarra: Busines School. Recuperado el Marzo de 8 de 2018, de https://www.iese.edu/es/files/catedralacaixa_vol11_final_tcm5-72287.pdf
- Calla, H. (2010). *Calidad del Agua en el Río Rímac- Sector de San Mateo, afectado por las Actividad Mineras*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. Lima: Unidad de posgrado Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Recuperado el octubre de 2016, de cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/797/1/calla_lh.pdf
- Catacora, R., & Marín, C. (2015). *Modelamiento y Evaluación del Proceso de Remoción de Arsénico en Aguas Superficiales de la zona Leticia-Distrito de Uchumayo Utilizando el Método de Adsorción con Zeolitas*. Universidad Nacional San Agustín., Arequipa. Arequipa- Perú: Universidad Nacional San Agustín. Recuperado el 05 de Marzo de 2018, de Repositorio de la Universidad Nacional San Agustín.
- Chabalina, L., & Martínéz, E. (2014). Remoción de Pb²⁺ en cama empacada empleando zeolita natural. En A. B. Ambiental. (Ed.), *XXVII congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental* (pág. 7). La Habana- Cuba: Associacao Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recuperado el Diciembre de 2016, de www.bvsde.paho.org/bvsaidis/impactos/vi-073.pdf
- Chica, F., Londoño, L., & Álvarez, M. (Julio de 2006). La zeolita en la mitigación ambiental. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 30-34. Recuperado el 22 de enero de 2017, de Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69530106>
- Córdova Zamora, M. (2003). *Estadística: Descriptiva e Inferencial* (Quinta edición ed.). Lima - Perú, Perú: Librería Moshera S.R.L. Recuperado el 12 de Marzo de 2018
- Córtez, R. (Mayo de 2007). *Efecto de la modificación de una zeolita natural mexicana en la sorción de cadmio y 4 - clorofenol*. Universidad Autónoma del Estado de México. México: Centro Interamericano del Recurso del Agua. Recuperado el 3 de Agosto de 2018, de <https://es.scribd.com/.../Efecto-de-La-Modificacion-de-Zeolita-Natural-Mexicana>

- Costafreda, J. L. (9 de Junio de 2011). Rocas y Minerales. *Tectosilicatos con características especiales: Las zeolitas naturales.*, 23. (U. P. Madrid., Ed.) Madrid, España: Fundación Gómez Pardo. Recuperado el 9 de junio de 2017, de http://oa.upm.es/32548/1/Tectosilicatos_Costafreda.pdf
- Cuchimaque, C., Vargas, L., & Reyes, C. (Marzo de 2013). Remoción de Fe y Mn en aguas naturales por Adsorción-Oxidación sobre clinoptilolita. *Rev. Fac. de Ing. de Universidad de Antioquía.*(66), 24-44. Recuperado el 07 de Marzo de 2017, de <http://www.redalyc.org/html/430/43027041002/>
- Cuizano, N. A., Reyes, Ú., Domínguez, S., Llanos, B., & Navarro, A. (9 de Junio de 2010). Relevancia del pH en la adsorción de iones metálicos, mediante algas pardas. *Sociedad Química del Perú*, 76(2), 123-130. Recuperado el 4 de Agosto de 2018, de www.redalyc.org/pdf/3719/371937617002.pdf
- DIGESA. (2011a). *Evaluación de muestras de agua de Río Rímac y principales afluentes con datos de DIGESA y SEDAPAL.* Dirección General de Salud Ambiental. Lima: Ministerio de Salud. Recuperado el 27 de Noviembre de 2017, de www.digesa.minsa.gob.pe/.../rios/2011/Rio-Rimac-junio-2011-DIGESA-SEDAPAL-1
- DIGESA. (2011b). *Evaluación de la Calidad Sanitaria de las Aguas del Río Chillón.* Dirección General de Salud Ambiental. Lima: Ministerio de Salud. Recuperado el 23 de enero de 2018, de http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/rios/2011/RIO_CHILLON_2011.pdf
- Fernandez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Susana, V. F., & Sanz García, J. (2006). *Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales.* Confederación Empresarial de Madrid. Madrid: Circulo de Innovación Tecnológica Medioambiental, energía. Recuperado el 7 de Marzo de 2018, de [Http://www.madrimasd.org/.../VT2_tratamiento_avanzado_de_aguas_residuales_in](http://www.madrimasd.org/.../VT2_tratamiento_avanzado_de_aguas_residuales_in).
- García, J., & Perez, J. (2003). *Química Estructural de Materiales Zeolíticos* (1 ed., Vol. 1). (U. d. Alicante., Ed.) Alicante, España: Sociedad española de Catalisis. Recuperado el 27 de Diciembre de 2016, de Sciencedirect
- García, V., Borja, N., Guzmán, E., Yipmantin, A., & Maldonado, H. M. (23 de Agosto de 2013). Equilibrio de Biosorción de Plomo (II) y Caracterización Mediante FT-IR y

- SEM-EDAX en pectina Reticulada Proveniente de Cáscara de Naranja. *Rev. Soc. Quim. del Perú.*, 79(3), 256- 260. Recuperado el 04 de 03 de 2018, de www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v79n3/a08v79n3.pdf
- Gómez, J. (2001). *Síntesis Características y Aplicaciones*. Universidad Complutense de Madrid. Madrid: Facultad de Ciencias Químicas. Recuperado el 30 de Diciembre de 2016, de <https://eprints.ucm.es/4846/1/T25174.pdf>
- Google Earth. (2 de Enero de 2020). Obtenido de <https://www.google.com/intl/es/earth/>
- Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). México: McGraw-Hill Interamericana. Recuperado el 25 de abril de 2018
- Hernández, M., Pestryakov, A., Portillo, R., Salgado, M., Rojas, F., Rubio, E., . . . Petranovskii, V. (2015). CO₂ Sequestration by Natural Zeolite for greenhouse effect Control. En I. d. Departamento de Investigación en Zeolitas (Ed.), *16th International Scientific Conference "Chemistry and Chemical Engineering in XXI century"*, (págs. 33-41). México. Recuperado el 05-2017 de 03-2017 de 2017, de WWW.Sciencedirect.com
- INEI. (5 de Mayo de 2015). Calidad del Agua. *Estadísticas Ambientales*(4), 12-14. Lima, Perú: Instituto Nacional de Estadística e Informática. Recuperado el 28 de julio de 2018, de <https://www.inei.gov.pe/biblioteca-virtual/boletines/estadisticas-ambientales/2015/1/#url>
- INEI. (25 de Marzo de 2016). Calidad del Agua. *Estadísticas Ambientales*, 14-16. LIMA, Perú: Instituto Nacional de Estadística e Informática. Recuperado el 26 de 12 de 2017, de <https://www.inei.gov.pe/biblioteca-virtual/boletines/estadisticas-ambientales/2016/1/>
- Kragovic, M., Stojmenovic, M., Petrovic, J., Loredó, J., & Ristic, I. (2019). Influence of Alginate Encapsulation on Point of Zero Charge (pH_{pzc}) and Thermodynamic Properties of the Natural and Fe(III) - Modified Zeolite. *Procedia Manufacturing*, 286-293. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.216>
- Leiva, R., Sánchez, M., Hernández, M., & Guerrero, R. (febrero de 2001). Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales. (F. d. Químicas, Ed.) *Rev. Int. Contam.Ambient*, 17(3), 129-136. Recuperado el 25 de abril de 2016, de www.redalyc.org/articulo.oa?id=37017302

- Leyton, F. (06 de 08 de 2017). El río Rímac en constante amenaza por 17 relaves mineros. (L. República, Ed.) págs. 18,19. Recuperado el 15 de julio de 2017, de <http://larepublica.pe/.../1070486-el-rio-rimac-en-constante-amenaza-por-17-relaves>
- Manrique, L., Bonilla, N., Chica, R., Otarola, J., Salamanca, & Maurin. (07 de 02 de 2015). Estudio Preliminar de la Capacidad de Remoción de Iones Inorgánicos de una Zeolita Sintética Tipo Faujasita. (U. M. Granada, Ed.) *Rev. Fac. de Ciencias Basicas*, 11(2), 114-123. doi:<http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.1300>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). Separaciones en lechos fijos. En W. McCabe, J. Smith, P. Harriot, & I. E. S.A. (Ed.), *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (A. C. Herrera, Trad., séptima edición ed., págs. 875-911). México, México: McGraw-Hill. Recuperado el 31 de Agosto de 2018, de https://www.academia.edu/28732190/Operaciones_Unitarias_en_Ingenieria_Quimica_7ma_Edici%C3%B3n_-_Warren_L._McCabe
- MINAM. (15 de Octubre de 2005). Ley N° 28611. *Ley General del Ambiente*, (20,47,61). Lima, Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. Recuperado el 9 de Agosto de 2017, de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>
- MINAM. (31 de Marzo de 2014). Guía de Muestreo de Suelos. *Resolución 085-2014-MINAM*, 18. (M. d. Ambiente, Ed.) Lima, Lima, Perú: Res. Ministerial 085-2014-MINAM. Recuperado el 16 de agosto de 2017, de www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-n-085-2014-minam/
- MINAM. (7 de Junio de 2017). D.S. 004. *Estandares de Calidad Ambiental para Agua.*, 10-11. Lima, Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. Recuperado el 12 de 11 de 2017, de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- MINAM. (7 de Junio de 2017). D.S. 004-2017. *Estandares de Calidad Ambiental para Agua.*, 10-11. Lima, Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. Recuperado el 12 de 11 de 2017, de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- MINEM. (2016). *Remediación de pasivos ambientales en el Perú*. Lima. Lima: Ministerio de Energía y Minas. Recuperado el 24 de julio de 2018, de [http:](http://)

www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp.../PRESENTACION-3-MINEM-PERU.pd

- MINSA. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua*. Ministerio de Salud, Lima. LIMA: Dirección General de Salud Ambiental. Recuperado el 2 de Agosto de 2018, de www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- Morante, F. (2004). *Las zeolitas de la Costa de Ecuador (Guayaquil): Geología, Caracterización y Aplicaciones*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 30 de Diciembre de 2016, de <http://oa.upm.es/740/1/06200413.pdf>
- Motsi, T. (marzo de 2010). *Remedation of acid mine drainage using natural zeolite*. University of Birmingham, School of Chemical Engineering. Reino Unido: School of Chemical Engineering of The University of Birmingham. Recuperado el 27 de 12 de 2016, de www.sciencedirect.com
- Municipalidad, S. H. (2013). Reducción de vulnerabilidades y Atención de Emergencias por Riesgos de Desastres Hidrometeorológicos en San Mateo. (11,12,27). San Mateo de Huanchor: Municipalidad de San Mateo de Huanchor. Recuperado el 27 de 11 de 2017, de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/ExpoRimac-2013-alcalde.pdf>
- OMS. (2006). *Guía para la Calidad del agua Potable* (3 ed., Vol. 1). Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud. Recuperado el 12 de Agosto de 2018, de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- Ortega, K., Hernandez, M., Portillo, R., Edgar, A., Romero, O., Rojas, F., . . . Petranovskii, V. (2015). Adsorption of Ar and N2 on dealuminated mordenite Tuff. (F. d. zeolitas, Ed.) *Procedia Chemistry*, 15, 65-71. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.10.010>
- Paredes, R., Ramirez, A., Osuna, e., Alamilla, P., & Madujano, A. (Mayo de 2013). Alternativa Ecológica y Económica para la Agricultura Temporal en México. (F. A. Instituto Nacional de Investigaciones, Ed.) *Zeolita Natural*, 1(19), 4. Recuperado el 28 de diciembre de 2016, de <http://www.ScienceDirect.com>

- Payra, P., & Dutta, P. K. (2003). *Handbook of Zeolite Science and Tecnology*. (A. ScoottM, C. Kathleen A, P. K, & Dutta., Edits.) New York, Ohio, U.S.A., United States of America. Recuperado el 07 de 02 de 2017, de <http://www.ScienceDirect.com>
- Puigdomenech, I. (diciembre de 2010). *Make Equilibrium Diagrams*. Recuperado el 2019, de Inorganic Chemistry: www.Kemi.Kth.se/medusa/sites.google.com/site/chemdiagr/
- Rios, C., Appasamy, D., & Clive, R. (22 de Marzo de 2011). Un sistema de Remediación Integrado Usando Zeolitas Sintéticas y Naturales para el Trtamiento de Aguas Residuales y Sedimentos Contaminados. *Dyna*, 78(170), 126-134. Recuperado el 2017 de Marzo de 2017, de Proquest.
- Rodríguez, G., & Rodríguez, I. (1997). Eliminación de metales tóxicos mediante zeolitas naturales. *Conferencia Internacional de zeolitas Naturales* (págs. 231-235). Nápoles: Universidad de La Habana- Cuba. Recuperado el 4 de Setiembre de 2018, de <http://docplayer.es/23234674-Eliminacion-de-metales-toxicos-mediante-zeolitas-naturales-gerardo-rodriguez-fuentes-1-e-inocente-rodriguez-iznaga-2.html>
- Sagayo, U. (Julio de 2015). Tratamiento de Aguas Industrialescon Metales Pesados a Través de Zeolitas y Sistemas de Biorremediación. (G. d. Bioingenio, Ed.) *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 15(1), 70-78. doi:<https://doi.org/10.19053/1900771X.3940>
- Taha M.Elmosri, Z. H. (2014). Kinetic and Equilibrium Isotherms Studies of Adsorption of Pb(II) from Water onto Natural Adsorbent. *Journal of Environmental Protection*, 5(17), 1667-1681. doi:DOI:10.4236/jep.2014.517157
- Tejada, C., Villabona, A., & Gárces, L. (Enero-Junio de 2015). Adsorción de Metales Pesados en Aguas Residuales, Usando Materiales de Origen Biológico. (I. T. Colombia, Ed.) *Tecnologicas*, 18(34), 109-123. Recuperado el marzo de 2017, de Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234336010>
- Valladares, M., Cárdenas, C., De la cruz, P., & Melgosa, R. (Julio-Diciembre de 2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables, para el tratamiento de aguas residuales. (U. d. Medellín., Ed.) *Revista de Ingeniería*, 16(31), 55-73. doi:DOI: 10.22395/rium.v16n31a3

- Vera, I., Rojas, M., Chavez, W., & Arriaza, B. (07 de Marzo de 2015). Evaluación de Materiales Filtrantes para el Reúso en la Agricultura de Aguas Residuales Tratadas Provenientes de Zonas Áridas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 5-19. doi:<http://dx.doi.org//10.18359/rcin.1633>
- Villavicencio, C., & Fernández, A. (Junio de 2009). Estudio de la adsorción de aniones sobre zeolitas sintéticas modificadas con surfactantes. (D. d. Química, Ed.) *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 24(3), 95-107. Recuperado el 31 de Julio de 2018, de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/view/5029/4836
- YURA, M. D. (2012). *Plan de Desarrollo Concertado Yura al 2021*. Yura: Municipalidad de Yura. Recuperado el 18 de enero de 2019, de http://www.muniyura.gob.pe/pdf/PDC_YURA_2012.pdf

IX Anexos

7.1 Matriz de consistencia

7.2 muestras zeolitas naturales

7.3 Fichas técnicas de instrumentos a utilizar

7.4 Reporte de análisis realizados

7.1 Matriz de consistencia

"POTENCIAL DE REMOCIÓN DE LA ZEOLITA NATURAL PERUANA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON PLOMO"

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	MÉTODO
<p>PROBLEMA GENERAL: ¿Cuál es el potencial de remoción de la zeolita natural peruana de la zona de Yura Arequipa Perú, utilizada como filtro en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo?</p> <p>Problemas Específicos: 1. ¿De qué manera la composición fisicoquímica de las zeolitas naturales de la zona de Yura-Arequipa-Perú, influyen en el potencial de remoción de plomo en el tratamiento de aguas contaminadas? 2. ¿Qué factores fisicoquímicos, influyen en la cinética de remoción del plomo, de las aguas tratadas mediante zeolita natural de la zona Yura-Arequipa-Perú? 3. ¿Cuál será la capacidad de adsorción de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú, utilizada como medio filtrante en el proceso de tratamiento de aguas contaminadas con plomo?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL: Determinar el potencial de remoción de la zeolita natural de Yura/Arequipa Perú, utilizada como filtro en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo.</p> <p>Objetivos Específicos 1. Analizar la influencia de la composición de la zeolita natural de la zona Yura-Arequipa-Perú, en el potencial de remoción de plomo de aguas contaminadas. 2. Evaluar los factores fisicoquímicos que influyen en la cinética de remoción de plomo en aguas contaminadas, tratadas mediante zeolita natural de la zona Yura-Arequipa-Perú. 3. Determinar la capacidad de adsorción de la zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú, utilizada como filtro en aguas contaminadas con plomo.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL La zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú; presenta un alto potencial de remoción de plomo en el tratamiento de aguas contaminadas.</p> <p>Hipótesis Específicas. H1: La composición fisicoquímica, de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú, determina la capacidad de adsorción, en el tratamiento de aguas contaminadas con plomo. H2: Los factores fisicoquímicos (pH, tamaño de partícula, masa del adsorbente y la concentración inicial de la solución), influyen en la cinética de remoción del plomo presente en aguas contaminadas. H3: La zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú, presenta una alta capacidad de adsorción de plomo en el tratamiento de aguas contaminadas.</p>	<p>INDEPENDIENTE Potencial de remoción de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa/ Perú. X₁ = Composición química de zeolita natural. X₂= Morfología X₃= Intercambio catiónico K,Na, Ca,Mg X₄= Tamaño de partícula: malla N° 20; 30; 50; escala Tyler X₅= Dosis del adsorbente. 2,5; 5; 10; g. /L de Sol.</p> <p>DEPENDIENTE. Remoción de plomo presente en aguas superficiales contaminadas.</p>	<p>Capacidad de adsorción. Relación: Al/Si Estructura Capacidad de intercambio Capacidad de adsorción Capacidad de Remoción de plomo.</p>	<p>TIPO INVESTIGACIÓN NIVEL: Explicativo DISEÑO: Experimental Analítico-cuantitativo, METODOLOGÍA. 1.- Determinación de la composición de la zeolita 2.- Determinación capacidad de intercambio iónico. 3.- Determinación de los factores que influyen en el proceso de remoción. 4. Evaluación de la cinética de remoción, relacionando tamaño de partícula, pH, Temperatura y Capacidad de remoción. 5.-Determinar la capacidad de adsorción de plomo. 6. Evaluación de la eficiencia de la zeolita en la remoción de plomo en aguas superficiales.</p>

<p>4. ¿Cuál es la eficiencia de remoción de plomo de aguas contaminadas, de la zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa- Perú?</p> <p>5. ¿En qué medida el agua superficial contaminada con plomo, tratada con zeolita natural peruana de la zona Yura- Arequipa- Perú como medio filtrante; cumple con el ECA- categoría I- subcategoría A1?</p>	<p>4.Evaluar la eficiencia de la remoción del plomo presente en aguas contaminadas, utilizando como medio filtrante zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú.</p> <p>5.Determinar la calidad del agua tratada con zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú, en lo que corresponde al plomo y el cumplimiento del ECA- categoría I- subcategoría A1; agua para consumo humano.</p>	<p>H4: La zeolita natural peruana de la zona de Yura-Arequipa-Perú, utilizada como medio filtrante presenta una alta eficiencia en la remoción de plomo en aguas contaminadas.</p> <p>H5: La calidad del agua tratada con zeolita natural peruana de la zona Yura-Arequipa-Perú, cumple con el ECA, en lo que corresponde al plomo - categoría I- subcategoría A1; agua para consumo humano.</p>	<p>Y₁= Concentración de plomo en aguas contaminadas. (1; 5; 10; mg/L)</p> <p>Interviniente: Factores que intervienen en el proceso de remoción del plomo presente en aguas contaminadas.</p> <p>Z₁= pH de la solución (3, 5, 7)</p> <p>Z₂= C₀ (1,5,10,20,40)</p> <p>Z₃= Tiempo de contacto (0- 360)</p>	<p>Concentración de plomo en el agua tratada con zeolita</p> <p>Capacidad de remoción</p> <p>Capacidad de remoción</p> <p>Capacidad de remoción</p>	<p>7. Evaluar el cumplimiento del ECA-plomo en el agua tratada con zeolita natural (categoría I- subcategoría A1; agua para consumo humano),</p>
--	--	--	--	---	--

7.2. Muestras Zeolitas Naturales



Muestra en su estado natural Yura-Arequipa Perú



Tamaño de muestra malla 20

Tamaño de muestra malla 30

7.3.- Fichas técnicas de instrumentos a utilizar

	NSF ENVIROLAB S.A.C.
	CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS " CARMEN BARRETO PIO " <small>Informe de Ensayo N° J-00295803 - J-00295802 - J-00295801 - J-00295800 - J-00295799 - J-00295798 - J-00296927 - J-00296512 - J-00296513 - J-00296514 - J-00296515</small>

DESCRIPCIÓN	PARÁMETROS	EQUIPO	MARCA / MODELO	CÓDIGO	UTILIDAD	N° DE CERTIFICADO	CADUCIDAD DE CERTIFICADO
Agua de Proceso	Metales	ICP-OES	ICAP 6500 DUO	E24.6L	Análisis	ST2017-420	jun-18

Elaborado por	Adam Amos Alfaro Arce	Fecha	24 de Mayo del 2018
	División de Laboratorio.		

**MANTENIMIENTO Y VERIFICACION OPERACIONAL DEL
ESPECTROFOTÓMETRO ICP iCAP 6500 OES**

Bellavista, 04 de Diciembre del 2017

ST2017- 420

Señores:

NFS ENVIROLAB S.A.C

Presente.-

Att: Ing.Nalleli Lava

Equipamiento Instalado:		
	Modelo	Numero de Serie
Espectrofotómetro ICP-OES	iCAP 6500 DUO	IC5D20121103
Automuestreador Cetac	ASX 520	021153A520
Recirculador de Agua	Thermoflex 900	0145002701120229
Software de Control		
iTeva		

I.- Acciones Generales:

- 1.- Area de trabajo preparada.
- 2.- Temperatura y humedad del área de trabajo controladas.
- 3.- Mesa de trabajo adecuada según el equipamiento instalado.
- 4.- Sistema de extracción instalado con una manga flexible de 125 mm id
- 5.- Tomacorrientes disponibles para el espectrofotómetro, computadora, recirculador de agua y otros accesorios.
- 6.- Recipiente de drenaje disponible.
- 7.- Suministros de gas disponibles con los conectores de salidas apropiados.
- 8.- Recirculador de agua
- 9.- Computadora de trabajo

OK

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

II. Acciones del Mantenimiento

- 1.- Verificación del voltaje de entrada al equipo:

línea - neutro (220v +/- 10%)	<u>221 voltios</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
línea - tierra (220v +/- 10%)	<u>221 voltios</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
neutro - tierra (entre 0 a 1v) Plasma Apagado	<u>600 m voltios</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
neutro - tierra (entre 0 a 1v) Plasma Encendido	<u>1200 m voltios</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
- 2.- El sistema utiliza:

UPS con transformador de aislamiento para el iCAP y accesorios.		<input checked="" type="checkbox"/>
Transformador de aislamiento para el recirculador de agua.		<input checked="" type="checkbox"/>
- 3.- Verificación de las condiciones Ambientales en el área de trabajo:

Temperatura (entre 15 y 35 °C)	<u>19°C</u>	<input checked="" type="checkbox"/>
Humedad (entre 20 y 80 %)	<u>56.0%</u>	<input checked="" type="checkbox"/>

II.- Acciones del Mantenimiento Preventivo:

1.- Espectrofotómetro ICP OES.

Numero de Serie :IC5D20121103

OK

- 1.- Examine el sistema completo y verifique si hubiera algún daño.
- 2.- Encienda el plasma y verifique su correcta inicialización y parámetros básicos.
- 3.- Apague el plasma y ejecute las acciones de mantenimiento
- 4.- Desensamble el equipo y realice una limpieza general.
- 5.- Ejecute el programa Defragmentador a la computadora.
- 6.- Verifique el estado de la tarjeta Control PCB.
- 7.- Verifique el estado de la caja de gases.
- 8.- Verifique que no haya fugas de nitrógeno en la líneas internas del instrumento
- 9.- Verifique que la fibra óptica se encuentre libre de obstrucciones.
- 10.- Verifique que el Oring y la ventana del POP se encuentre en buen estado.
- 11.- Verifique y limpie el espejo de la vista radial del compartimiento de la antorcha.
- 12.- Verifique el estado del Coil, si fuese necesario reemplácelo.
- 13.- Verifique y registre las presiones de los gases de entrada al sistema:
PAr : 80 psi
- 14.- Retire la antorcha y límpiela y verifique el estado de los Orings de la antorcha.
Nota: Si fuese necesario reemplace la antorcha completa y/o Orings
- 15.- Verifique el estado del Oring del Main Body, si fuese necesario reemplácelo.
- 16.- Verifique el estado del tubo central y límpiela. Si fuese necesario reemplácelo.
- 17.- Verifique el estado del spray chamber y límpiela, si fuese necesario sustituya los orings
- 18.- Verifique el estado del nebulizador y límpiela, si fuese necesario reemplácelo.
- 19.- Verifique el estado de las tuberías de introducción de muestras, si fuese necesario reemplácelos.
- 20.- Rearme el sistema y verifique el funcionamiento correcto de la bomba peristáltica.

Observaciones:

El voltaje de Neutro - Tierra con Plasma encendido debe ser menor a 1 Voltio, para así evitar problemas futuros en las tarjetas electronicas.

2.- Recirculador de Agua.

0145002701120229

- 1.- Reemplace el agua destilada del recirculador
- 2.- Limpie el filtro del agua.
- 3.- Limpie el radiador del recirculador
- 4.- Encienda el recirculador y verifique que no haya fugas.
- 5.- Registre la temperatura y la presión de operación.
T_{Op} : 19 °C P_{Op} : 42 psi

Observaciones:

Se realizo cambio de refrigerante y de agua destilada.

3.- Pruebas Finales.

- 1.- Encienda el plasma cinco veces a manera de verificar su encendido correcto.
- 2.- Tome un FullFrame para el slit UV y verifique el nivel de purga del instrumento con las siguientes líneas de nitrógeno.
174.525 nm (494) columna 474, fila 405
174.525 nm (493) columna 221, fila 408
174.272 nm (494) columna 402, fila 408
174.272 nm (493) columna 151, fila 411

Y verifique el alineamiento óptico con la línea de carbono.

193.091 nm (475) columna 380, fila 220	Columna:	380 ± 3 pixel
	Fila:	220 ± 3 pixel

Nota: Las posiciones de las columnas y filas son aproximadas.

- 3.- Registre la presión del nebulizador, flujo del método y el tipo de nebulizador empleado.
Nebulizador: Concentrico Presion: 360 Kpa Flujo Neb: 0.45 LMP Flujo Aux: 0.5 LMP
- 4.- Ejecute el alineamiento de la antorcha
- 5.- Ejecute el Auto Peak Adjust.
- 6.- Realice un análisis de rutina y evalúe resultados.

Observaciones:

**4.- Acciones de mantenimiento preventivo autosampler Teledyne Cetac ASX 520 : OK
SN 021153A520**

- | | |
|--|---|
| 1.- Se enciende el equipo para verificar el self-test de inicialización, encendido de bomba peristáltica, comunicación ASX 520 e instrumento iCP 6500. | ✓ |
| 2.- Se apaga el equipo y se procede a realizar las acciones de mantenimiento. | ✓ |
| 3.- Se revisa conexiones de mangueras y tubería peak. | ✓ |
| 4.- Se desensambla las cubiertas del equipo y se realiza una limpieza interna. | ✓ |
| 5.- Se verifica el estado de las partes electrónicas y motores internos. | ✓ |
| 6.- Se verifica los voltajes de entrada a la tarjeta principal. | ✓ |
| 7.- Se retira componente tubo capilar, se verifica su estado. | ✓ |
| 8.- Se retiran o cambian las mangueras externas, de ser necesario. | ✓ |
| 9.- Se rearma ASX 520, se cambian tubo capilar, de ser necesario. | ✓ |
| 10.- Se rearma el equipo y se realiza una limpieza externa. | ✓ |
| 11.- Se verifica conectividad entre autosampler – iCP 6500. | ✓ |

Observaciones y recomendaciones:

- Es necesario que se verifique, antes del uso, que el probe este centrado, con esto se evita que se dañe al momento de enviar hacia la muestra.
- Parte usuaria debe de cambiar las mangueras externas al presenciar alguna formación de residuos o que haya quiebres en las mangueras, con esto se evita que la entrada de muestra hacia el nebulizador sea inconstante.

III.- Verificación Operacional:

OK

- 1.- Ejecute las pruebas siguientes a las concentraciones indicadas en la tabla.
- Prueba de sensibilidad.
 - Prueba de limite de detección.

Elemento	Axial (cuentas)	Limite de detección, factor 3000 (ppb)
Al (167.0)	2800	0.5
Ba (455.4)	114500	0.2
Ca (317.9)	5350	1.1
Cu (324.7)	27540	1.2
K (766.4)	412300	2.0
Mg (279.5)	123500	n.a
Mn (257.6)	114400	0.20
Ni (221.6)	45230	0.78
P (177.4)	5780	4.0
Zn (213.8)	4300	n.a

Tabla I

- 2.- Registre los valores de las pruebas ejecutadas

Elemento	Cuentas registrada	Limite de detección obtenido
Al (167.0)	4343	0.2595
Ba (455.4)	286900	0.0457
Ca (317.9)	8484	0.750
Cu (324.7)	46050	0.5652
K (766.4)	425100	0.8728
Mg (279.5)	217300	n.a
Mn (257.6)	189300	0.1396
Ni (221.6)	84970	0.4414
P (177.4)	13220	2.030
Zn (213.8)	6520	n.a

Tabla II

Nota: Los valores de deben ser aproximados a la tabla I para las cuentas y menor que la tabla I para detección de límites

Conclusión:


Equipo Verificado operacionalmente.
Equipo cumple con las condiciones indicadas por Thermo Scientific, para su correcto funcionamiento.

Ing. de Servicio : Cesar Yon

Responsable : Nalleli Lava

Reactivos para Análisis SAC

Ciente



Reactivos para Análisis S.A.C.

Nombre de Muestra: DL Adquirido: 04/12/2017 10:19:05 Tipo: Unk

Método: RPA VO Modo: CONC Factor Corr.: 3000.000000

Usuario: admin ANALISTA: RDU MC: 171128 STD: 171128

Comentario:

Elem	Al1670	Ba4554	Ca3179	Cu3247	K_7664	Mg2795	Mn2576	Ni2216	P_1774
Unidades	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Media	-.0533	-.0761	-4.111	-.3358	-.1845	-.2667	-.0633	.2230	.4172
Desv. Est.	.2595	.0457	.750	.5652	.8728	.0424	.1396	.4414	2.030
%RSD	487.0	60.04	18.24	168.3	473.0	15.91	220.6	197.9	486.4
#1	-.1409	-.1311	-4.416	-.1075	-.2952	-.2996	-.2440	-.3253	-2.417
#2	.1520	-.0608	-4.728	-.3410	-1.315	-.3093	-.2002	-.0811	.7995
#3	.3747	-.1454	-5.335	-1.226	-.8148	-.3155	-.2345	.5659	2.940
#4	.0052	-.0814	-4.288	-1.379	-1.502	-.2827	-.1978	-.0461	.7872
#5	-.3598	-.1108	-5.055	-.5703	-.4186	-.2950	-.2096	-.2041	3.669
#6	-.2225	-.0825	-4.090	-.1590	.2124	-.2966	-.1603	.7574	-1.013
#7	-.2218	-.1425	-4.824	-.7019	.9264	-.3083	-.1807	1.019	2.317
#8	.3847	-.1446	-5.254	-.2470	-.2289	-.2867	-.1950	.6473	3.087
#9	.1796	-.0783	-3.313	-1.272	.4590	-.3052	-.1130	.8013	1.774
#10	-.4132	-.0175	-4.453	-.1355	-1.310	-.3139	-.1027	.3649	1.260
#11	-.4426	-.0484	-2.685	.2788	1.401	-.1832	.1821	.7486	.8057
#12	-.1466	-.0785	-3.332	-.3967	.3417	-.2071	.1113	-.0078	2.674
#13	-.3040	-.0413	-3.269	-.1671	.3433	-.2078	-.0113	-.0057	-2.933
#14	-.0437	-.0455	-3.947	.1647	.1180	-.1987	.1279	-.6534	-1.151
#15	.0435	-.0551	-3.635	.1911	.6834	-.2466	.0899	.3008	-.7796
#16	.2022	.0276	-3.157	-.1338	-2.001	-.2343	-.0540	.4365	-1.254
#17	.1445	-.0813	-4.086	.7788	-.1045	-.2363	.1085	.0839	.8656
#18	-.2927	-.0983	-3.439	.0808	-.2829	-.2619	.0483	.2801	-2.161
#19	-.2193	-.0206	-4.371	-1.106	-.4908	-.2662	.0377	-.2415	1.289
#20	.2549	-.0863	-4.548	-.2673	.5878	-.2781	-.0689	.0194	-2.214


CESAR YON OLIVOS
Soporte Técnico
 Reactivos Para Analisis S.A.C.

Nombre de Muestra: DL Adquirido: 04/12/2017 10:19:05 Tipo: Unk
Método: RPA VO Modo: CONC Factor Corr.: 3000.000000
Usuario: admin ANALISTA: RDU MC: 171128 STD: 171128
Comentario:

Elem	Zn2138
Unidades	ppm
Media	-.2836
Desv. Est.	.2161
%RSD	76.19

#1	-.0988
#2	-.3410
#3	.2493
#4	-.3775
#5	-.5240
#6	-.0938
#7	-.4990
#8	-.3780
#9	-.4568
#10	-.1741
#11	-.0585
#12	-.2522
#13	.0079
#14	-.2876
#15	-.7111
#16	-.4527
#17	-.2219
#18	-.3673
#19	-.3647
#20	-.2693


CESAR YON OLIVOS
Soporte Técnico
Reactivos Para Análisis S.A.C.

Nombre de Muestra: PatrónAlto Adquirido: 04/12/2017 09:58:31 Tipo: Cal
 Método: RPA VO Modo: IR Factor Corr.: 1.000000
 Usuario: admin ANALISTA: RDU MC: 171128 STD: 171128
 Comentario:

Elem	Al1670	Ba4554	Ca3179	Cu3247	K_7664	Mg2795	Mn2576
Unidades	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s
Media	4353.	286900.	8484.	46050.	425100.	217300.	189300.
Desv. Est.	18.	2808.	43.	220.	3378.	716.	803.
%RSD	.4113	.9787	.5100	.4771	.7945	.3295	.4241
#1	4353.	290000.	8529.	46280.	426800.	218000.	190200.
#2	4371.	286300.	8442.	45840.	427400.	216600.	188600.
#3	4335.	284400.	8482.	46040.	421300.	217300.	189000.
Elem	Ni2216	P_1774	Zn2138				
Unidades	Cts/s	Cts/s	Cts/s				
Media	84970.	13220.	6520.				
Desv. Est.	54.	9.	12.				
%RSD	.0639	.0668	.1839				
#1	85030.	13230.	6534.				
#2	84930.	13220.	6516.				
#3	84950.	13210.	6511.				


 CESAR VON OLIVOS
 Soporte Técnico
 Reactivos Para Analisis S.A.C.

Nombre de Muestra: Blanco Adquirido: 04/12/2017 10:15:29 Tipo: Cal
Método: RPA VO Modo: IR Factor Corr.: 1.000000
Usuario: admin ANALISTA: RDU MC: 171128 STD: 171128
Comentario:

Elem	Al1670	Ba4554	Ca3179	Cu3247	K_7664	Mg2795	Mn2576	Ni2216	P_1774
Unidades	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s	Cts/s
Media	4.991	958.3	243.1	112.7	-15.10	351.3	90.72	34.87	8.735
Desv. Est.	.212	15.2	3.6	7.5	8.95	9.6	.86	1.54	.225
%RSD	4.253	1.589	1.466	6.654	59.28	2.740	.9527	4.421	2.577
#1	4.778	954.9	245.9	120.9	-6.457	352.3	90.72	34.98	8.630
#2	4.991	975.0	244.4	106.1	-24.33	360.5	91.59	36.35	8.582
#3	5.203	945.1	239.1	111.2	-14.51	341.3	89.86	33.27	8.994

Elem	Zn2138
Unidades	Cts/s
Media	40.58
Desv. Est.	.53
%RSD	1.314
#1	41.18
#2	40.40
#3	40.16





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ciencias

INFORME DEL RESULTADO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

DATOS DEL CLIENTE

Cliente	Carmen Elizabeth Barreto Pio
Correo electrónico	barpcarmen@yahoo.es
Telefono	

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Preparación de la muestra	Las muestras son colocadas sobre la cinta de carbón que está adherida al portamuestras.
Muestras	Son dos muestras que tienen por nombres: Muestra 1 Zeolita natural Muestra 2 Zeolita natural saturada con Pb ²⁺
Ensayos	Morfología por Microscopia Electrónica de Barrido Espectroscopia de Energía dispersiva



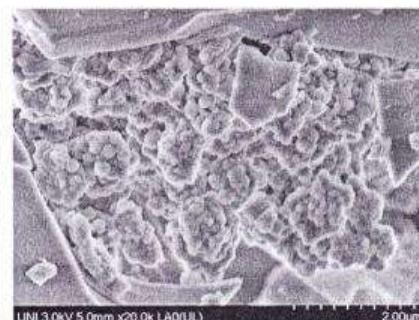
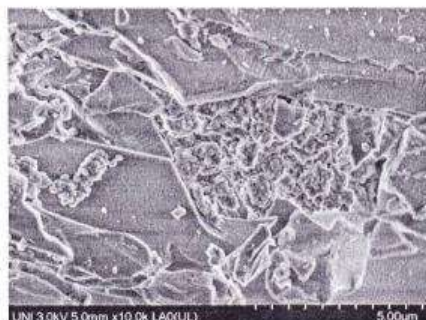
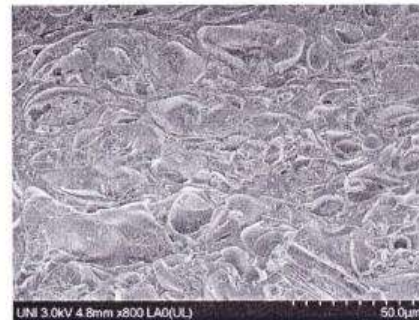
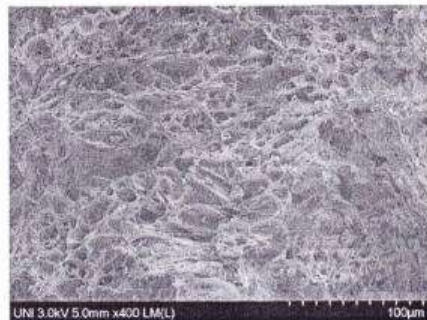
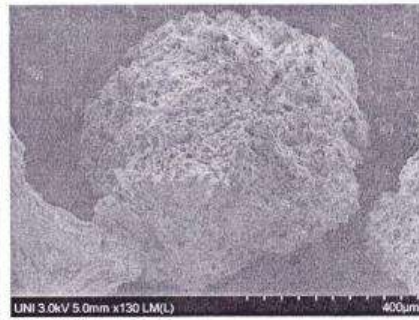
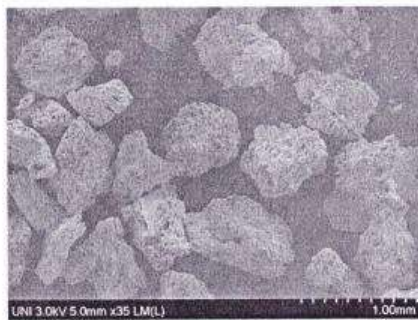
Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
Teléfono Decanato: (511) 481-0824
Email: fc@uni.edu.pe
Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



MUESTRA 1

Morfología por Microscopía Electrónica de Barrido



Sanjiv K. Singh

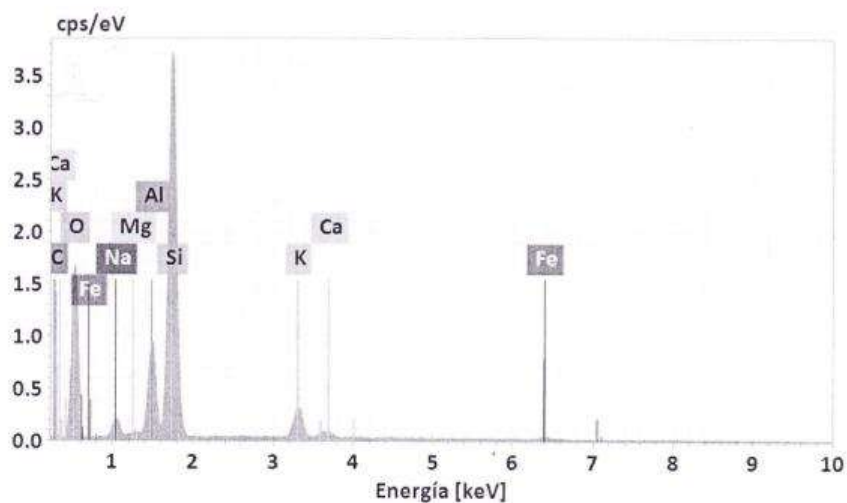


Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
Teléfono Decanato: (511) 481-0824
Email: fc@uni.edu.pe
Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA



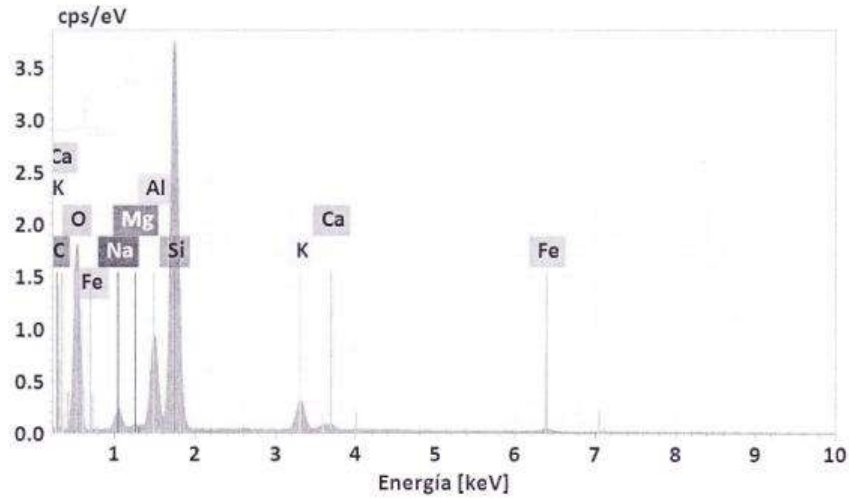
d 1099

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbono	6	K-Serie	197	1.24	1.19	1.97	0.33	26.28
Oxígeno	8	K-Serie	36900	55.60	53.30	66.12	6.16	11.09
Sodio	11	K-Serie	4320	3.00	2.87	2.48	0.22	7.26
Magnesio	12	K-Serie	1020	0.47	0.45	0.37	0.05	10.75
Aluminio	13	K-Serie	24235	8.78	8.41	6.19	0.44	5.05
Silicio	14	K-Serie	103103	30.49	29.23	20.66	1.32	4.34
Potasio	19	K-Serie	9761	3.48	3.34	1.69	0.13	3.74
Calcio	20	K-Serie	1738	0.70	0.67	0.33	0.05	6.50
Hierro	26	K-Serie	915	0.56	0.54	0.19	0.04	7.08
			Sum	104.31	100.00	100.00		



Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
 Teléfono Decanato: (511) 481-0824
 Email: fc@uni.edu.pe
 Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
 Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



d 482

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbono	6	K-Serie	298	1.91	1.73	2.83	0.44	22.91
Oxígeno	8	K-Serie	38694	59.40	53.91	66.29	6.57	11.06
Sodio	11	K-Serie	4606	3.30	3.00	2.56	0.24	7.18
Magnesio	12	K-Serie	977	0.47	0.43	0.34	0.05	10.80
Aluminio	13	K-Serie	24024	8.98	8.15	5.94	0.45	5.05
Silicio	14	K-Serie	103223	31.35	28.46	19.94	1.36	4.33
Potasio	19	K-Serie	9492	3.49	3.17	1.59	0.13	3.74
Calcio	20	K-Serie	1637	0.66	0.60	0.30	0.04	6.68
Hierro	26	K-Serie	934	0.62	0.56	0.20	0.04	6.70
			Sum	110.18	100.00	100.00		



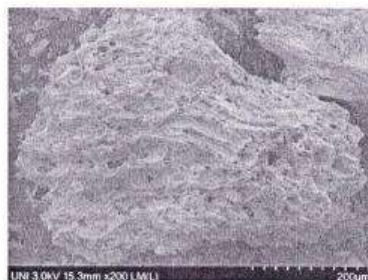
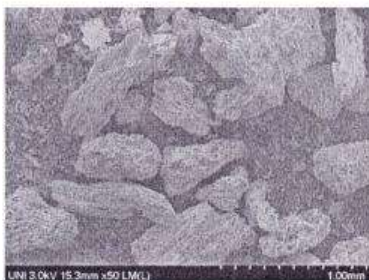
Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
 Teléfono Decanato: (511) 481-0824
 Email: fc@uni.edu.pe
 Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
 Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



MUESTRA 2

Morfología por Microscopía Electrónica de Barrido

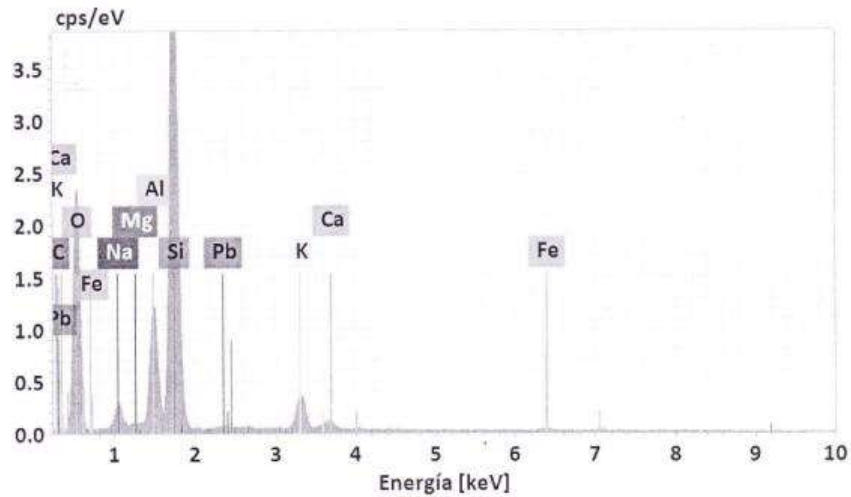


Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
Teléfono Decanato: (511) 481-0824
Email: fc@uni.edu.pe
Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA



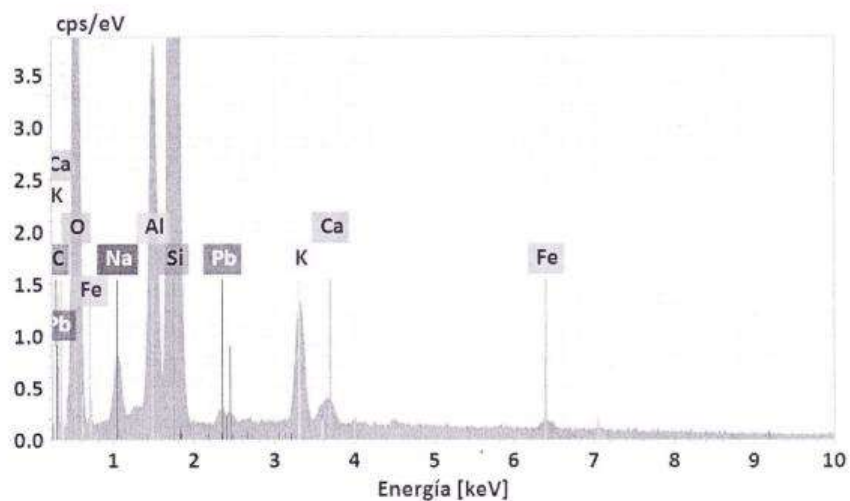
d 1100

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbono	6	K-Serie	237	1.29	1.37	2.26	0.32	24.92
Oxígeno	8	K-Serie	40021	51.16	54.44	67.10	5.65	11.05
Sodio	11	K-Serie	4374	2.62	2.79	2.39	0.19	7.38
Magnesio	12	K-Serie	615	0.25	0.26	0.21	0.04	15.65
Aluminio	13	K-Serie	24526	7.61	8.10	5.92	0.39	5.10
Silicio	14	K-Serie	105871	26.68	28.39	19.93	1.16	4.35
Potasio	19	K-Serie	8617	3.04	3.23	1.63	0.12	3.84
Calcio	20	K-Serie	1543	0.64	0.68	0.33	0.04	6.82
Hierro	26	K-Serie	748	0.57	0.61	0.22	0.04	7.00
Plomo	82	L-Serie	24	0.11	0.12	0.01	0.03	25.78
			Sum	93.97	100.00	100.00		



Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
 Teléfono Decanato: (511) 481-0824
 Email: fc@uni.edu.pe
 Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
 Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



d 483

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbono	6	K-Serie	264	1.15	1.63	2.70	0.28	24.48
Oxígeno	8	K-Serie	35195	37.73	53.43	66.37	4.20	11.13
Sodio	11	K-Serie	3355	1.65	2.34	2.02	0.13	7.94
Aluminio	13	K-Serie	22030	5.55	7.86	5.79	0.29	5.22
Silicio	14	K-Serie	100473	20.53	29.07	20.57	0.90	4.38
Potasio	19	K-Serie	8983	2.60	3.68	1.87	0.10	3.98
Calcio	20	K-Serie	1422	0.49	0.69	0.34	0.04	8.06
Hierro	26	K-Serie	972	0.57	0.81	0.29	0.04	7.01
Plomo	82	L-Serie	102	0.35	0.49	0.05	0.04	10.18
			Sum	70.61	100.00	100.00		

[Handwritten Signature]

Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, - Perú
 Teléfono Decanato: (511) 481-0824
 Email: fc@uni.edu.pe
 Página Web: www.fc.uni.edu.pe

Central Telefónica FC: (511) 381-3868 / 381-3869
 Central Telefónica UNI: (511) 481-1070 Anexos: 5001 y 5003



CONCLUSIONES

- Se observa que ambas muestras son porosas, algunas partículas de la muestra 1 tienen un diámetro alrededor de 200,0 nm, mientras que en la muestra 2 el diámetro de algunas partículas más pequeñas es alrededor de 180,0 nm.
- En la muestra 2 se observa la presencia de plomo como lo indican los espectros de energía dispersiva

Mg. Clemente Luyo Caycho
Docente
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Ingeniería





CONSTANCIA

EL ENCARGADO DEL LABORATORIO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA: QUE SUSCRIBE:

HACE CONSTAR

Que en el Laboratorio de Microscopia Electrónica de la Facultad de ciencias se han realizado análisis de dos muestras de nominadas Zeolita natural y Zeolita natural saturada con Pb^{2+} por microscopia Electrónica de barrido y Espectroscopia de Energía Dispersiva, pertenecientes a la M.s.C. CARMEN ELIZABETH BARRETO PIO.

Se expide la presente como constancia a solicitud de la interesada para los fines que estime conveniente.

Mg. Clemente Luyo Caycho
Docente Facultad de Ciencias

Lima, 05 de julio del 2019