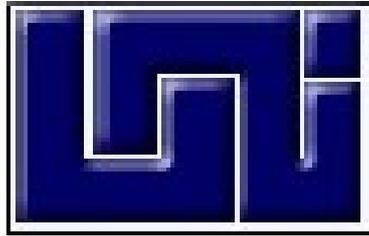


Mon
662.93
M537
2008

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



“Estudio de la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite para la remoción de arsénico en aguas de pozos con alto contenido de arsénico”

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Br: EDUAR ENOCK MENDIETA NARVAEZ

PARA OPTAR AL TITULO DE

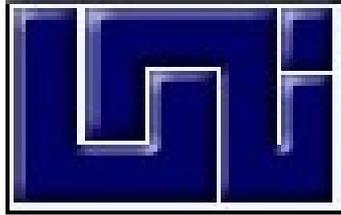
INGENIERO QUIMICO

TUTOR

Dr: DANILO LÓPEZ VALERIO

DICIEMBRE DE 2008

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



“Estudio de la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite para la remoción de arsénico en aguas de pozos con alto contenido de arsénico”



Dr: DANILO LÓPEZ VALERIO

DICIEMBRE DE 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme permitido la culminación de mi carrera.

A mis padres Aleyda Narvárez y Orlando Mendieta por haberme enseñado valores de honestidad y perseverancia en mis metas.

A mis Hermanos Orlando José Mendieta, Nery Samir Mendieta y Dania Mendieta.

AL Dr. Danilo López Valerio por ser mi tutor y como primera mano de ayuda para la realización de este trabajo.

Al profesor Gilberto Colina por su apoyo en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a:

 Mi madre y mi padre

 Mis hermanos

A todos mis amigos de la facultad de química

RESUMEN

El presente estudio trata sobre la capacidad de adsorción de arsénico en aguas de pozos con alto contenido de arsénico, a partir de carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite, este estudio abarca desde la preparación del carbón hasta la obtención de los índices de remoción de arsénico.

El procedimiento de elaboración del carbón consiste en la recolección, lavado, secado y pulverización de la semilla hasta obtener una consistencia granulométrica, la cual es impregnada con NaOH, como agente activante, con una relación de impregnación óptima de 1:1.5 durante 10 minutos siendo acompañada de una agitación constante, luego se carboniza a 350°C en una mufla durante 30 minutos.

Después del proceso de carbonización, se procede a lavar el carbón con agua destilada con el propósito de neutralizar la superficie del carbón.

Los resultados de la caracterización del carbón obtenido se muestran a continuación,: Azufre: 0.04%, Ceniza: 2.28%, Carbono: 80.73%, Hidrógeno: 1.86%, Nitrógeno: 1.11%, Oxígeno: 13.98%, una área superficial de 700 m²/g aproximadamente y un tamaño medio de poros de 28 Å., estos dos últimos datos fueron obtenidos de la tesis titulada "Caracterización del carbón activado obtenido a partir de semilla de nancite a escala de laboratorio ", (2006), donde se obtuvo carbón activado bajo las mismas condiciones

Las isotermas de adsorción utilizando el modelo de Freundlich para ácido acético reflejaron que el carbón activado de semilla de nancite tiene una buena afinidad con el ácido acético así como los datos de n y k dieron un indicio de la microporosidad del carbón.

Para evaluar la adsorción de arsénico se prepararon diversas soluciones a partir de agua de pozo y contando con un patrón de arsénico de 1000mg/L para preparar las diversas concentraciones de arsénico de 50ppb, 100ppb y 200ppb cada una de estas soluciones con pH de 1 hasta 12.

En el estudio se tomaron en cuenta tres variables, con el fin de evaluar el efecto de su variación en la adsorbibilidad del carbón, como son la concentración de arsénico en el agua, el pH del agua y el tiempo de contacto, los resultados de remoción se obtuvieron con el espectrómetro NOVA 60, dando como resultado una alta adsorción en el rango de pH de 4 a 9 y una mayor remoción a baja concentración y mayor tiempo de contacto la remoción se hizo por agitación constante.

INDICE DE CONTENIDO

	Páginas
Agradecimiento	i
Dedicatoria	ii
Carta del catedrático Guía	iii
Resumen.	iv
Índice de contenido	v
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	vii
I- INTRODUCCIÓN	01
II- OBJETIVOS	04
III-MARCO TEÓRICO	05
3.1-Carbón activado	05
3.2-Arsénico en las aguas superficiales y subterráneas	08
3.3-Aspectos químicos del arsénico	09
3.3.1-Descripción general	09
3.3.2-Toxicidad	11
3.4-Remoción de arsénico del agua	11
3.5-Métodos de tratamiento para reducir el arsénico	12
3.6-Adsorción	16
3.6.1-Tipos de adsorción	17
3.6.1.1-Fisisorción o adsorción física	17
3.6.1.2-Quimisorción o adsorción química	17
3.6.2-Factores que afectan la adsorción	18
3.7-Equilibrio de adsorción	18
3.7.1-Adsorción isotérmica	19
3.7.2-Adsorción isobarica	20
3.7.3-Adsorción esotérica	21
3.8-Adsorción de soluciones	21

3.8.1-Isotermas de adsorción	22
3.8.2-Adsorción de soluciones diluidas	25
3.9-Ecuación de Freundlich	26
3.10-Ecuación de Langmuir	27
3.11-Principales adsorbentes de uso general	29
3.11.1-Carbones activados	29
3.12-Obtención del carbón activado	30
3.12.1-Métodos de activación utilizados para la obtención del carbón activado	31
3.13. El nancite	32
IV-MATERIAL Y METODO	33
4.1-Reactivos	33
4.2-Utensilios y cristalería de laboratorio	33
4.3-Equipos	34
4.4-Métodos	34
4.4.1-Elaboración de carbón activado de la semilla de nancite por el método químico	34
4.4.2-Ensayos para la adsorción de ácido acético	35
4.4.3-Determinación de arsénico por espectrofotometría	35
4.5-Hipótesis y variables	36
4.5.1-Hipótesis	36
4.5.1-Variables y diseño experimental	36
V-PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	35
5.1-Carbón obtenido de la semilla de nancite	38
5.2-Isotermas de adsorción del carbón obtenido de la semilla de nancite	35
5.3-Isotermas de adsorción del carbón industrial	39
5.4-Adsorción de arsénico en función del pH a diferentes concentraciones	40
5.4.1-Concentración de 50ppb y una hora de contacto	41
5.5-Adsorción de arsénico en función de la concentración a diferentes pH.	42

5.5.1- Adsorción de arsénico en función de la concentración y pH=3	43
5.5.2- Adsorción de arsénico en función de la concentración y pH neutro	44
VI-CONCLUSIONES	45
VII-RECOMENDACIONES	46
VIII-GLOSARIO	47
IX-BIBLIOGRAFIA	48
X-ANEXOS	50
10.1- Cálculos para determinar las isothermas de adsorción	50
10.2- Determinación de la isothermas de adsorción del carbón obtenido de la semilla de nancite	54
10.3- Determinación de la isothermas de adsorción del carbón industrial	56
10.4- Datos de remoción de arsénico para una concentración inicial de 100ppb y 200ppb	58
10.5-Tipos de isothermas de adsorción según IUPAC	60
10.6-Procedimiento previo de electrodeposición para luego ser observadas por el microscopio electrónico de barrido.	61
10.7- Detalles del microscopio electrónico de barrido (MEB)	62
10.8-Vistas del carbón activado de la semilla de nancite con el microscopio electrónico de barrido	64
10.9-Espectrómetro NOVA y sus kits fotométricos de análisis	67
10.10-Normas CAPRE sobre la calidad del agua para consumo humano	71

INDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: Propiedades fisicoquímicas del arsénico	10
TABLA 3.2 Estabilidad predominio de las especies de arsénico variando los rangos de pH en el medio acuático	10
TABLA 3.3 Influencia de iones en la adsorción de As (III) por carbón activado	14
TABLA 4.1 Factores a analizar con sus respectivos niveles de estudio	37
TABLA 5.1: Factores de remoción para una concentración de 50ppb.	41
TABLA 5.2: Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH= 3)	43
TABLA 5.3: Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 7)	44
TABLA 10.1: Soluciones de ácido acético	51
TABLA 10.2: ml de NaOH gastados.	51
TABLA 10.3: Porcentajes de remoción de arsénico	52
TABLA 10.4: Forma logarítmica de la ecuación de Freundlich	53
TABLA 10.5: Mililitros de NaOH gastados con carbón de nancite	54
TABLA 10.6: Porcentajes de remoción de arsénico con carbón de nancite	55
TABLA 10.7: Milimoles adsorbidos con carbón de nancite	55
TABLA 10.8: Forma logarítmica de la ecuación de Freundlich	55
TABLA 10.9: Mililitros de NaOH gastados con carbón industrial	56
TABLA 10.10: Porcentajes de remoción de arsénico con carbón industrial	56
TABLA 10.11: Milimoles adsorbidos con carbón industrial	57
TABLA 10.12: Forma logarítmica de la ecuación de Freundlich	57
TABLA 10.13: Porcentajes de remoción para una concentración de 100ppb	58
TABLA 10.14: Porcentajes de remoción para una concentración de 200ppb	59

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 : Adsorción isotérmica	20
FIGURA 3.2 : Adsorción isobárica	20
FIGURA 3.3 : Adsorción isotérmica	21
FIGURA 3.4: Isotermas de adsorción: (a) y (b) para líquidos completamente miscibles (c) y (d) para soluciones de sólidos y líquidos.	24
FIGURA 3.5: Algunos grupos funcionales en el carbón activado. Composición típica: 1-22% O, 73-99% C, 0,5-5% H y 1-20%.	30
FIGURA 3.6: Estructura cristalina reticular. Átomos de carbono reordenados en forma de anillos	31
FIGURA 3.7: El nancite en su etapa de maduración	32
FIGURA 5.1: Isoterma de adsorción de Freundlich con carbón de nancite	39
FIGURA 5.2 : Isoterma de adsorción de Freundlich con carbón industrial	40
FIGURA 5.3 : Adsorción de arsénico en función del pH	42
FIGURA 5.4 : Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 3)	43
FIGURA 5.5 : Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 7)	44

I. INTRODUCCIÓN

En varios países de América Latina como: Argentina, Chile, México, El Salvador; por lo menos cuatro millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico que ponen en riesgo su salud. Las concentraciones de arsénico en el agua, sobre todo en el agua subterránea, presentan niveles que llegan en algunos casos hasta 1 mg/L. En otras regiones del mundo como India, China y Taiwán el problema es aún mayor.

En Nicaragua el problema del arsénico se presenta principalmente en zonas rurales donde la población se abastece del líquido por medio de pozos artesanales tales como las comunidades “El Carrizo”, “Las Cañas”, “Agua Fría”, “Soledad de la Cruz”, el agua está contaminada con arsénico, que ha provocado el aumento de cáncer en los niños de las comunidades, según el estudio “Arsénico y Cáncer en Comunidades del Sur y Sur Oeste del Valle de Sébaco.

Se conoce que las principales rutas de exposición de las personas al arsénico son la ingesta e inhalación, que es acumulable en el organismo por exposición crónica y a ciertas concentraciones ocasiona afecciones como: alteraciones de la piel (relajamiento de los capilares cutáneos y la dilatación de los mismos) con efectos secundarios en los sistemas nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastro-intestinal y hematopoyético y acumulación en los huesos, músculos y piel, y en menor grado en hígado y riñones.

El carbón activado es un material poroso que se produce artificialmente de manera que exhiba un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna.

- 1) Estas características junto con la naturaleza química de los átomos que lo conforman le dan la propiedad de atraer y atrapar de manera preferencial ciertas moléculas, átomos, iones en el fluido que rodea al carbón.

- 2) El carbón activado, es un compuesto covalente y, por lo tanto, muestra preferencia por moléculas covalentes; es decir, por moléculas que tienden a ser no iónicas y poco polares. Tal es el caso de la mayoría de los compuestos

orgánicos. Por lo tanto, el carbón activado se considera un adsorbente casi universal de moléculas orgánicas.

3) Debido a lo anterior una de las principales aplicaciones del carbón activado es la purificación de líquidos y gases contaminados con alguna molécula orgánica.

La producción de carbón activado ha venido creciendo desde hace algunos años por ser un material muy utilizados para la eliminación de contaminantes en le medio ambiente y por los diferentes usos que tiene este material en los diferentes procesos de producción

En cuanto a la adsorción de arsénico en Nicaragua se han realizado pocos trabajos al respecto, donde aun no se ha extraído el arsénico, los trabajos sobre carbón activado y extracción de arsénico hasta el momento que se han hecho son los siguientes.

1. En el trabajo monográfico titulado “Estudio de la remoción de arsénico en columnas empacadas con quitosana”, (2005) este trabajo se baso en el estudio de la adsorción en columnas empacadas con quitosana extraída de los caparazones de camarón obteniéndose la porosidad total de la quitosana (0.8547), donde la variable mas determinante en la adsorción fue el pH obteniéndose una remoción del 94%, a un pH acido (PH = 3) debido a la presencia de arsénico pentavalente.

2. En el trabajo monográfico titulado “Obtención de carbón activado a partir de residuos de hueso vacuno a nivel de laboratorio por el método químico” (2002) se produjo por primera vez en Nicaragua carbón activado a partir de materia prima animal y se comparo el carbón activado producido en el laboratorio con el carbón activado industrial.

3. En el trabajo monográfico titulado “Caracterización del carbón activado obtenido a partir de semilla de nancite a escala de laboratorio “,(2006) se produjo por primera vez en Nicaragua carbón activado a partir de semilla de nancite por activación química , se caracterizo el carbón activado obtenido utilizando las técnicas de, adsorción de nitrógeno líquido , fluorescencia de rayos x, y análisis elemental por combustión , las cuales dieron como resultado una área superficial de 678.2066m²/g, con un diámetro medio de poros de 28Å, en cuanto a la composición química del carbón de la semilla de nancite se obtuvo en promedio, 74.3470% de C, 1.1721% de N, 4.2440% de H, y 20.2370% de O.

II.OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la capacidad de adsorción de arsénico por medio de carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite en aguas de pozos con altos índices de arsénico.

Objetivos específicos

- I. Obtener el carbón activado a partir de la semilla de nancite mediante método químico.
- II. Determinar la macroporosidad del carbón activado a partir de la semilla de nancite mediante adsorción de ácido acético.
- III. Determinar el efecto en la adsorción de arsénico del carbón activado de la semilla de nancite en presencia de factores tales como la concentración, pH, y tiempo de contacto.
- IV. Comparar los resultados de adsorción de arsénico con base en los valores establecidos en la norma CAPRE.

III. MARCO TEÓRICO

La creciente industrialización, el uso desenfrenado, y explotación de recursos naturales durante las últimas décadas ha causado la creciente devastación y degradación de la tierra. Las actividades humanas han puesto una presión considerable en la disponibilidad de las necesidades humanas básicas como el agua limpia y el aire limpio.

Las aguas residuales de industrias, el escurrimiento urbano y rural, emparejado con el aumento del uso de variados químicos, fertilizantes, pesticidas, y herbicidas en la agricultura, y la descomposición de materia animal y vegetal variando las cantidades de éstos y otros químicos en las aguas subterráneas y superficiales causando que tales recursos sean perjudiciales para el consumo humano.

Con el desarrollo rápido de químicos, polímeros, e industrias de procesamiento de petróleo, hay un aumento rápido en la cantidad y la variedad de químicos que se tiran en las aguas.

Este aumento está logrando condiciones peligrosas, sobre todo en ciudades grandes con alta densidad poblacional. La demanda de agua es muy alta, así como el rápido desarrollo de industrias químicas. Además, la desinfección con cloro de aguas residuales introduce químicos dañinos en el agua potable.

Algunos de estos compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, son tóxicos, cancerígenos, y mutagénicos causando varias dolencias en los humanos.

3.1 Carbón activado

El carbón activado en su más amplio sentido involucra un amplio rango de procesos amorfos de carbonos de diferentes materiales, el carbón no es realmente un material amorfo pero tiene una microestructura cristalina. Los carbonos activos tienen un alto desarrollo de porosidad y una amplia área superficial su preparación involucra dos principales etapas: La carbonización del material crudo a temperaturas debajo de 800°C en una atmósfera inerte y la activación del producto carbonizado. De esta manera todos los materiales

carbonaceos pueden ser convertidos en carbón activado, sin embargo las propiedades del producto final serán diferentes dependiendo de la naturaleza del material crudo utilizado así como del agente químico, las condiciones de carbonización y el proceso de activación.

Durante el proceso de carbonización muchos de los elementos no carbónicos tales como oxígeno, hidrógeno y nitrógeno son eliminados como especies gaseosas volátiles por la descomposición pirólica del material inicial los grupos de átomos residuales de carbón forman una serie de anillos planos aromáticos unidos de diferentes maneras, estos planos aromáticos son irregularmente arreglados los cuales dan lugar a libres intersticios que a su vez dan aumento al número de poros, lo cual hace del carbón activado un excelente adsorbente.

Durante la carbonización estos poros son llenados con materia o productos en descomposición, o al menos bloqueados parcialmente. Esta estructura de átomos en el material carbonizado tiende a un desarrollo y transformación durante el proceso de activación, el cual convierte el material crudo carbonizado de forma que contenga un gran posible número de poros ampliamente distribuidos con variadas formas y tamaños, dando lugar a una extendida y ampliamente alta área superficial del producto terminado.

La activación del material carbonizado es usualmente llevada a cabo en una atmósfera de aire, CO_2 , o en una corriente de gas constante, esto resulta en el desarrollo de una amplia superficie interna la cual en algunos casos puede ser mayor de $2500 \text{ m}^2/\text{g}$.

Estos átomos de carbono tienen valencias insaturadas y pueden por lo tanto interactuar con heteroátomos tales como oxígeno, nitrógeno, y sulfuro, dando lugar a diferentes tipos de grupos superficiales. La composición típica de un carbón activo es 88% de C, 0.5% de H, 0.5 de N, 1.0% de S, y 6 a 7% de O^{11} .

Muchos métodos biológicos y químicos tales como filtración y coagulación, oxidación e intercambio iónico han sido usado para el tratamiento de aguas residuales, pero el continuo aumento, así como la variedad y cantidad de compuesto químicos presentes en nuestros lagos ríos y reservas de aguas

hacen de estos métodos ineficientes y algunas veces nunca efectivos por consecuencia el desarrollo de nuevas y eficientes tecnologías son esenciales.

Muchas pruebas de campo y laboratorio operaciones llevadas a cabo en muchos países han mostrado que el carbón activado es quizás la mejor tecnología de amplio espectro hasta el presente para la remoción de compuestos químicos orgánicos e inorgánicos de aguas^{5,6}.

La remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos por carbón activado depende de su área superficial, el volumen de los poros, su distribución y medida en el carbón, sin embargo la adsorción es influenciada fuertemente por la superficie química del carbón.

Muchos de los grupos activos en el carbón son asociados con pequeñas cantidades de grupos superficiales carbono-oxígeno, tales carbonos son adecuados para la adsorción de compuestos orgánicos neutrales y no polares que muestran una pequeña afinidad con contaminantes polares o iónicos. Un ejemplo es la adsorción de fenoles por la superficie química del carbón que es mas importante que el área superficial¹⁰⁻¹⁴.

Por lo general todos los carbonos activos están asociados con ciertas cantidades de oxígeno químico adsorbido estas cantidades pueden ser aumentadas por la oxidación de carbón con ciertos agentes oxidantes tales como ácido nítrico, peróxido de hidrógeno, persulfato de amonio, oxígeno u ozono. El oxígeno químico adsorbido en la superficie del carbón esta presente en forma de grupos superficiales carbono-oxígeno.

Dos tipos de grupos carbono-oxígeno han sido identificados: uno adsorbido como CO_2 bajo un tratamiento calorífico en vacío o gas inerte y otro es adsorbido como CO. Los grupos formados son térmicamente menos estables siendo desorbidos en el rango de temperaturas de 350°C y 750°C .

Los grupos superficiales polares aumentan la adsorción de compuestos químicos polares o especies iónicas, El tratamiento de agua con carbón activado puede ser dividido en tres categorías de aguas, la primera es el agua para consumo humano. Bajo esta categoría están, todas aquellos tratamientos de aguas municipales a gran escala, están los tratamientos de aguas de ríos, lagos y reservas, para distribuir las en la comunidad.

La función del carbón activado en este tratamiento generalmente involucra la remoción de especies que afectan el sabor, olor y contaminantes peligrosos a la salud.

La segunda categoría de aguas que son tratadas con carbón activado son las aguas destinados para diferentes procesos industriales, como intercambio de calor, generación de vapor, y torres de enfriamiento, el tratamiento de tales aguas involucra la remoción de compuestos que causan corrosión.

La tercera categoría de aguas son el efluente de diversos procesos industriales, por que estas aguas son recicladas en plantas, y descargadas a fuentes de agua. Antes de esta descarga estas aguas deberán estar libres de compuestos tóxicos que causan contaminación en aguas terrestres por lo tanto el carbón activado juega un papel importante en la remoción de compuestos orgánicos e inorgánicos de aguas residuales.

En este capítulo se tratan distintos aspectos del arsénico como son el contenido en aguas superficiales y subterráneas su propiedades químicas, los distintos métodos de remoción así como los adsorbentes y su uso en general.

3.2 Arsénico en las aguas superficiales y subterráneas

El arsénico se encuentra en forma natural en rocas sedimentarias y rocas volcánicas, y en aguas geotermales. El arsénico se encuentra en la naturaleza con mayor frecuencia como sulfuro de arsénico y arsenopirita, que se encuentran como impurezas en los depósitos mineros, o como arseniato y arsenito en las aguas superficiales y subterráneas respectivamente.

El arsénico es usado comercialmente e industrialmente como un agente en la manufactura de transistores, láser y semiconductores, como también en la fabricación de vidrio, pigmentos, textiles, papeles, adhesivos de metal, preservantes de alimentos y madera, municiones, procesos de bronceado, plaguicidas y productos farmacéuticos.

El arsénico se encuentra en el agua por la disolución natural de minerales de depósitos geológicos, la descarga de los efluentes industriales y la sedimentación atmosférica.

En aguas superficiales con alto contenido de oxígeno, la especie más común es el arsénico con estado de oxidación +5 (As^{+5}). Bajo condiciones de reducción generalmente en los sedimentos de los lagos o aguas subterráneas, predomina el arsénico con estado de oxidación +3 (As^{+3}), pero también puede existir el As^{+5} . Sin embargo, la conversión de As^{+3} a As^{+5} o viceversa es bastante lento. Los compuestos reducidos de As^{+3} pueden ser encontrados en medios oxidados y los compuestos oxidados de As^{+5} en medios reducidos.

Los microbios, plantas y animales pueden convertir todo estos compuestos químicos de arsénico inorgánico en compuestos orgánicos (comprometiendo átomos de carbono e hidrógeno)¹⁰.

3.3 Aspectos químicos del arsénico

3.3.1 Descripción general

El arsénico existe en el estado de oxidación de -3, 0, +3 y +5. En la tabla 3.1 se presenta las propiedades fisicoquímicas de los compuestos de arsénico más comunes

Los estados de oxidación de arsénico comúnmente en el agua son los estados +5 y +3. El arsénito, o arsénico trivalente (As^{+3}) se encuentra en solución como H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- , H_2AsO_4^- y $\text{H}_2\text{AsO}_4^{-3}$ en aguas naturales con pH entre 5 a 9, y el arseniato, o arsénico pentavalente (As^{+5}) se encuentra en forma estable en aguas con altos niveles de oxígeno como H_3AsO_4 en un rango de pH de 2 a 13

Compuesto	Fórmula	Densidad (g/cm ³)	Solubilidad en el agua (g/L)
Arsénico	As	5.73 a 14°C	Insoluble
Trióxido de Arsénico	As ₂ O ₃	3.74	37 a 20 °C
Pentóxido de Arsénico	As ₂ O ₅	4.32	1500 a 16°C
Sulfuro de Arsénico	As ₂ S ₃	3.43	5x10 ⁻⁴
Ácido dimetilarsénico	(CH ₃) ₂ AsO(OH)	-	829 a 22 °C
Arsenato de plomo	PbHAsO ₄	5.79	poco soluble
Arsenato de potasio	KH ₂ AsO ₄	2.87	190 a 16 °C
Arsenito de potasio	KAsO ₂ .HAsO ₂	-	Soluble

Tabla 3.1: Propiedades fisicoquímicas del arsénico¹⁰

En aguas naturales de pH 5 a 9 predominan las especies: H₂AsO₄⁻, HAsO₄⁻², H₃AsO₃, H₂AsO₃⁻

pH	0 – 9	10 – 12	13	14
As ⁺³	H ₃ AsO ₃	H ₂ AsO ₃ ⁻	H ₃ AsO ₃	AsO ₃ ⁻³
pH	0 – 2	3 – 6	7 – 11	12 – 14
As ⁺⁵	H ₃ AsO ₄	H ₂ AsO ₄ ⁻	H ₃ AsO ₄	AsO ₄ ⁻³

Tabla 3.2 Estabilidad predominio de las especies de arsénico variando los rangos de pH en el medio acuático⁵

3.3.2 Toxicidad.

Resultados con animales de laboratorio indican que el arsénico inorgánico trivalente es más tóxico que el pentavalente debido a que el As pentavalente en compuestos, tienen menor efecto en actividades enzimáticas.

La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden:

Arsina > As^{+3} inorgánico > As^{+3} orgánico > As^{+5} inorgánico > As^{+5} orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental¹.

3.4 Remoción de arsénico del agua

En general, el tratamiento de agua potable está orientado a remover color, turbiedad y microorganismos de origen fecal. Esta remoción se logra a través de una combinación adecuada de procesos: coagulación- floculación- sedimentación- filtración y desinfección. Pero cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico, es necesario recurrir a métodos más complejos que se enumeran a continuación:

Técnicas empleadas para la remoción de arsénico³.

1. Adsorción- coprecipitación usando sales de hierro y aluminio
2. Adsorción en alúmina activada / carbón activado / bauxita activada
3. Osmosis inversa
4. Intercambio iónico
5. Oxidación seguida de filtración
6. Ablandamiento con cal

3.5 Métodos de tratamiento para reducir el arsénico.

Existen diferentes métodos de tratamiento para reducir el arsénico presente en el agua, diferentes métodos tales como coagulación, precipitación e intercambio iónico han sido usados para la remoción de iones arsénico de aguas pero mas recientemente muchos tipos de adsorbentes tales como carbón activado, silica gel impregnada han sido usados para la remoción de arsénico de aguas residuales Gupta and Chen¹⁶ estudiaron el efecto del pH en la adsorción de arsénico (III) arsénico (V) de soluciones acuosas usando alúmina activada bauxita carbón activado como adsorbente. La adsorción de arsénico (V) fue maximizada a un pH entre 3 y 5 por carbón activado y a un pH ≤ 7 para bauxita y alúmina activada.

También se observo que la adsorción de arsénico (V) fue menos en carbón activado que en bauxita o alúmina activada, aunque estos investigadores explicaron la adsorción de un adsorbente inorgánico en base a la carga del área superficial, no pudieron sugerir explicación alguna acerca del comportamiento de la adsorción del carbón activado, ellos sugirieron que la baja adsorción del carbón activado fue simplemente el hecho de la baja afinidad entre la superficie del carbón y la no iónica forma divalente o trivalente del As(V).

Kamegawa et al¹⁷ mientras estudiaban la adsorción de arsénico en cinco diferentes tipos de carbón activado observaron que la adsorción fue máxima en el rango de pH de 5 a 6 siendo la capacidad de adsorción para los diferentes carbonos mas para el As(V) que para As(III), esto fue atribuido a la gran capacidad de estos carbonos de oxidar el As(III), además sugirieron que la adsorción de arsénico fue en forma de complejos iónicos.

Huang and Fu¹⁸, mientras examinaban la influencia del pH de la solución en la adsorción de arsénico usando diferentes carbonos, observaron que la remoción del arsénico fue en función del pH, donde se encontró que el pH optimo para la remoción de arsénico fue 4.0 donde la remoción fue mayor que en otros valores de pH, esto fue atribuido al hecho de la distribución de la

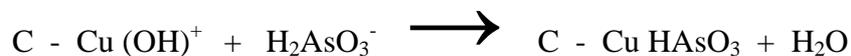
concentración de As(V) y el desarrollo de la carga superficial del carbón fue relacionada al pH de la solución.

Rajakovic¹⁹, también observaron que la adsorción de As(III) y As(V) fue dependiente del pH de la solución porque el pH determina el cambio en las especies iónicas, la adsorción fue máxima en el rango de pH de 4 a 9.

Este también observo que la impregnación de carbón activado con cobre aumento la adsorción de As(III), debido a la quimisorción o precipitación CuHAsO₃, un similar incremento en la adsorción de As(V), fue observado por Huang and Van²⁰ por la impregnación de carbón con el ion Fe⁺², este sugirió que la superficie del carbón desarrollo una carga positiva por la impregnación y resulto en la formación del complejo arsénico ferroso.

Raji and Anirudhan²¹ usaron carbón activado impregnado con cobre para la adsorción de As(III) de soluciones acuosas y estudiaron la influencia de factores tales como el pH de la solución, la concentración, el tiempo de reacción así como la temperatura de la adsorción, la magnitud de adsorción de As(III), Incremento de 3.2% a 84.0% por incremento del pH de 1 a 12, esto fue debido a la predominio de As(III) a que a un pH de 12 se encuentra como especies aniónicas H₂AsO₃⁻ y HAsO₃²⁻ los cuales bajo reacciones químicas con el cobre presente en la superficie del carbón forman un precipitado poco soluble CuHAsO₃.

El mecanismo de adsorción de As(III), por quimisorción fue sugerido por la siguiente reacción a valores neutros y ácidos de pH.



Estos investigadores afirmaron que el As (III) esta predominante presente como H₃AsO₃, esta molécula neutral no fue removida por adsorción o precipitación

La adsorción de diversos iones en la solución tuvo muy pequeños o nulos efectos en la adsorción de As (III) de la solución como se muestra en la tabla 3.3

Iones	Iones agregados como	Concentración (ppm)	Adsorción de arsénico (%)
No ion	-	-	72.2
NO ₃ ⁻	HNO ₃	20	67.7
NO ₂ ⁻	NaNO ₂	40	69.9
Cl ⁻	HCl	20	69.2
SO ₄ ²⁻	H ₂ SO ₄	20	69.6
NH ₄ ⁺	NH ₄ NO ₃	30	70.1
Ca ²⁺	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	20	72.2
Mg ²⁺	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	20	72.2
Na ⁺	NaNO ₃	20	70.5
K ⁺	KNO ₃	20	69.8

TABLA 3.3 Influencia de iones en la adsorción de As (III) por carbón activado (concentración inicial de 35.1ppm, dosis de 0.01g/50ml, temperatura de 30 ± 1°C, pH = 4.2)²⁰

Los otros métodos para la adsorción de arsénico se mencionan a continuación

1) Coagulación/filtración. Es un proceso de tratamiento por el cual las cargas eléctricas de las sustancias coloidales disueltas o suspendidas son neutralizadas con la adición de sustancias insolubles en el agua, lo que permite la formación de partículas mayores o aglomerados que pueden ser eliminadas por sedimentación o filtración.

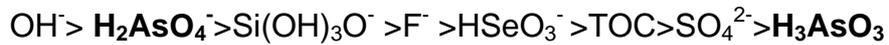
2) Intercambio iónico. Es un proceso físico y químico, en el cual los iones de una especie dada son desplazados de un material insoluble de intercambio (resina) por otros iones que se encuentran en solución.

3) Alúmina activada. Es un tipo de intercambio iónico, donde los iones presentes en el agua son adsorbidas por la superficie oxidada de la alúmina activada.

Es altamente selectiva para remover el As⁺⁵ y efectiva para tratar agua con alto contenido de sólidos disueltos totales. En la superficie de adsorción de la

alúmina activada pueden interferir el selenio, fluoruro, cloruro y sulfato. Este método tiene alta remoción de arsénico a pH 8.2.

La alúmina activada adsorbe preferentemente H_2AsO_4^- (As^{+5}) más que H_3AsO_3 (As^{+3}) además de otros iones competitivos, tal como se muestra en la siguiente relación:



3) Ósmosis inversa. Es un proceso para eliminar las sustancias disueltas presentes en el agua, forzando la circulación del agua por una membrana semipermeable bajo una presión superior a la osmótica.

Tiene una eficiencia de más de 95 % de remoción de arsénico disuelto. Este método es efectivo para remover arsénico de aguas subterráneas. El rendimiento del proceso con ósmosis inversa es afectado principalmente por la turbiedad, hierro, manganeso y sílice.

5) Nanofiltración. Es un proceso de separación líquida mediante membranas operadas bajo presión que permite el paso de solventes y sales monovalentes, iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas de peso molecular en el rango de 200 a 1000.

Se puede remover el As^{+5} y el As^{+3} disueltos en el agua. Con este método se alcanza hasta una remoción de 90% de arsénico disuelto en aguas subterráneas.

6) Ablandamiento con cal. Es un método usado para remover la dureza del agua y consiste en adicionar cal (Ca(OH)_2) al agua.

Este método es efectivo para remover As^{+3} ó As^{+5} y la eficiencia de la remoción está en función del pH.

3.6 Adsorción

La adsorción se define como un proceso superficial de transferencia de masa, en el cual las moléculas disueltas o dispersas presentes en una fase (líquida o gaseosa) se unen o adhieren a la superficie de otra (sólida). El sólido en cuya superficie se produce la adsorción se denomina adsorbente y la sustancia que es adsorbida recibe el nombre de adsorbato⁵.

La adsorción surge como resultado de fuerzas moleculares insaturadas y desequilibradas presentes en toda la superficie sólida, así de este modo cuando la superficie sólida entra en contacto con un líquido o un gas surge una interacción entre las fuerzas de la superficie sólida y las de líquido o gas. La superficie sólida tiende a reunir o concentrar sus fuerzas residuales atrayendo y reteniendo en su superficie las moléculas átomos o iones del gas o líquido, esto resulta en una gran concentración mayor en los alrededores cercanos de la superficie sólida que en el interior de la fase gaseosa o líquida.

La adsorción involucra dos tipos de fuerzas, fuerzas físicas que pueden ser momentos dipolos fuerzas polarizadas, fuerzas dispersas así como fuerzas repulsivas así como fuerzas químicas surgidas de una predistribución de electrones entre la superficie sólida y los átomos adsorbidos

La adsorción es distinta de la absorción y entre ellas debe establecerse una clara diferencia. En este último proceso la sustancia no se retiene en la superficie, sino que pasa hacia el interior de la superficie, la penetra (rellenado de poros) y se distribuye por todo el cuerpo de un sólido o líquido⁸.

La adsorción es un fenómeno de gran importancia tecnológica. Es así como algunos de estos adsorbentes son utilizados a gran escala como desecantes o soportes para catalizadores; otros son usados para la separación de gases, para la purificación de líquidos, el control de contaminantes o para la protección respiratoria¹³.

3.6.1 Tipos de adsorción

Existen diferentes dos tipos de adsorción dependiendo de la naturaleza de las fuerzas involucradas la fisisorción y la quimisorción.

3.6.1.1 Fisisorción o adsorción física

En la fisisorción las moléculas del adsorbato se mantienen unidas en la superficie del sólido por medio de las fuerzas intermoleculares de Van der Waals⁴, que son similares a las fuerzas de cohesión estando presentes en la condensación de vapores. Los principales aspectos que caracterizan la fisisorción son los siguientes:

- Entalpías de adsorción desde -4 hasta -40 KJ/mol.
- Solo se aprecia a temperaturas inferiores a la de ebullición de la sustancia adsorbida.
- La cantidad de la adsorción sobre una superficie depende más de la sustancia que se adsorbe que del adsorbente.
- No se aprecia energía de activación de adsorción.
- Se forman capas múltiples adsorbidas.
- No es específica⁴.

3.6.1.2 Quimisorción o adsorción química

En la quimisorción se produce una reacción química entre el adsorbato y la superficie del adsorbente produciéndose así enlaces relativamente fuertes que conducen a procesos irreversibles². La unión formada entre el adsorbato y el

adsorbente es esencialmente una unión química y por tanto mucho más fuerte que la fisisorción. Este tipo de adsorción se caracteriza por:

- Entalpías de adsorción que van desde -40 hasta -800 KJ/mol.
- Se observa a temperaturas elevadas.
- La cantidad de adsorción sobre una superficie depende tanto de la sustancia que se adsorbe como del adsorbente.
- Se manifiesta energía de activación de adsorción.
- La adsorción da lugar a lo sumo a una monocapa.

3.6.2 Factores que afectan la adsorción

Los factores que afectan el proceso de adsorción son los siguientes:

- Las características físicas y químicas del adsorbente, entre estas se encuentra; el área superficial, el tamaño de poros, la composición química, etc.
- Las características físicas y químicas del adsorbato por ejemplo el
- tamaño molecular, la polaridad molecular, la composición química, etc.
- La temperatura.
- La concentración del adsorbato en la fase líquida.
- Grado de ionización del soluto³.

3.7 Equilibrio de adsorción

Cuando una superficie sólida es expuesta a una fase gaseosa o líquida estas chocan contra la superficie del sólido, algunas de las moléculas en colisión se adhieren a la superficie sólida por variadas fuerzas y por lo tanto vienen a ser adsorbidas por la superficie sólida, mientras que otras rebotan, inicialmente la tasa de adsorción es grande cuando toda la superficie sólida entera se

encuentra libre mientras tanto mas y mas moléculas de gas o liquido tienden a cubrirla, decreciendo la superficie libre así como la rata de adsorción, sin embargo la rata de desorción, que se define como las moléculas adsorbidas rebotan de la superficie debido a la saturación de la superficie sólida.

Al mismo tiempo la rata de adsorción continúa en descenso, mientras la rata de desorción se incrementa hasta que el equilibrio entre la rata de adsorción y la rata de desorción es alcanzado, en este estado el sólido esta en equilibrio de adsorción con el gas o liquido, siendo la rata de adsorción igual a la rata de desorción. Este es un equilibrio dinámico por que el número de moléculas que chocan contra la superficie es igual al número de moléculas que rebotan de la superficie sólida.

El sistema adsorbato-adsorbente, en equilibrio, la cantidad adsorbida x/m es función de la presión para una fase gaseosa o la concentración para una fase liquida así como de la temperatura.

Expresando la formula general como.

$$\frac{x}{m} = f(P, C, T) \quad (3.1)$$

Donde:

x/m : Es la cantidad adsorbida por unidad de masa del adsorbente en el equilibrio, este puede ser adsorbido de tres maneras diferentes.

3.7.1 Adsorción isotérmica

Si la temperatura es mantenida constante entonces el sistema de equilibrio de adsorción puede ser representado por la formula.

$$\frac{x}{m} = f(P, C) \quad [T = \text{Constante}] \quad (3.2)$$

Tal equilibrio es llamado adsorción isotérmica que se muestra en la figura 3.1.

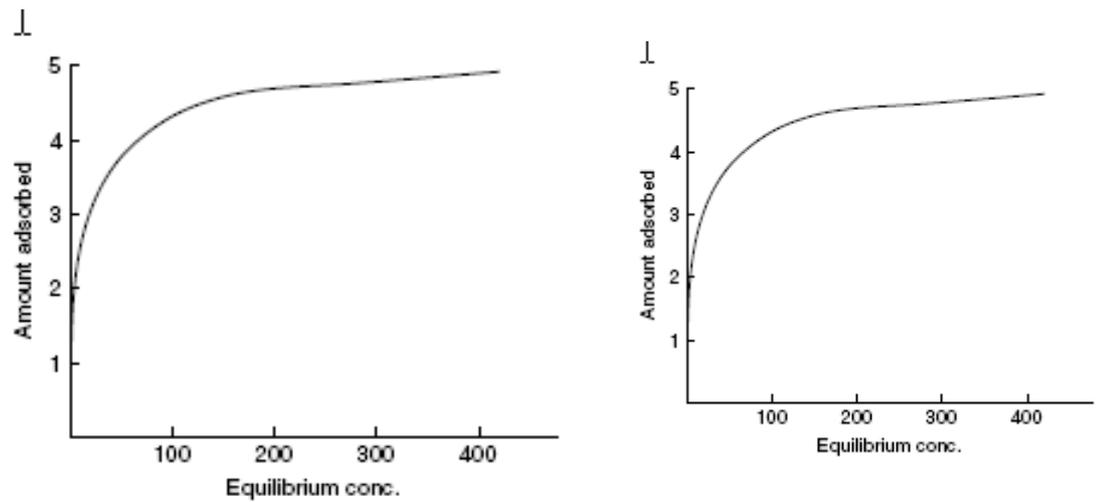


FIGURA 3.1: Adsorción isotérmica, la cantidad adsorbida (eje de las x), están en dependencia únicamente de la presión y concentración de equilibrio

3.7.2 Adsorción isobárica

Cuando la presión es mantenida constante y puede expresarse de la siguiente manera. Se muestra en la figura siguiente.

$$\frac{x}{m} = f(C, T) \quad [P = \text{Constante}] \quad (3.3)$$

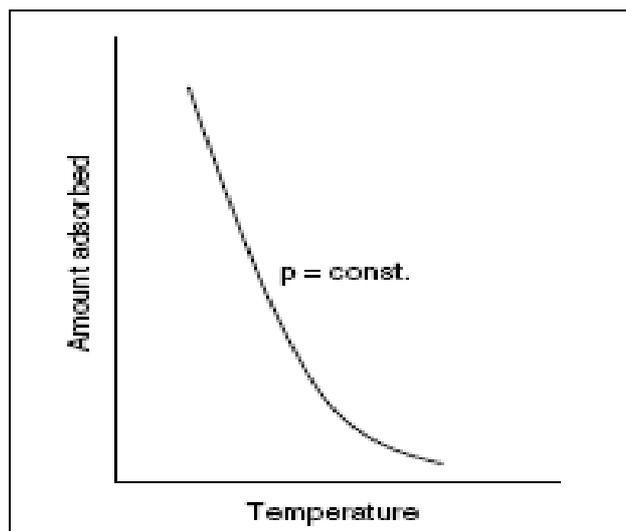


FIGURA 3.2: Adsorción isobárica, la cantidad adsorbida (eje de las x), están en dependencia únicamente de la temperatura y concentración de equilibrio

3.7.3 Adsorción isostérica

Este equilibrio es alcanzado cuando la cantidad adsorbida se mantiene constante con variación de la presión para gases, la concentración para líquidos.

$$\frac{x}{m} = f(P, C, T) \quad \left[\frac{x}{m} = \text{Constante} \right] \quad (3.4)$$

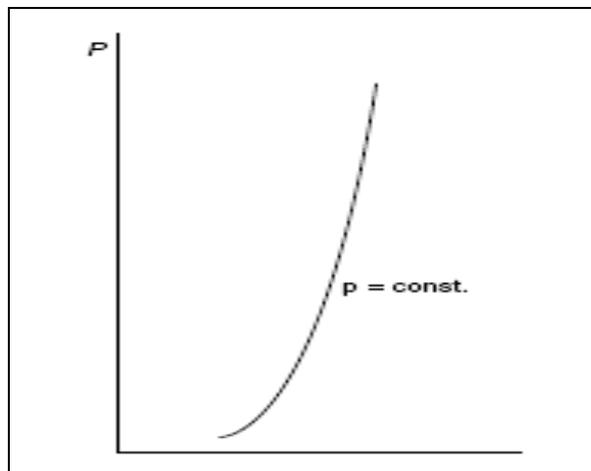


FIGURA 3.3: Adsorción isostérica, la presión esta en función de la temperatura y ambas logran mantener en el sistema que la cantidad adsorbida se constante

3.8 Adsorción de soluciones

La adsorción en fase líquida puede tomar lugar en cualquiera de las tres interfaces, líquido-sólido, líquido – líquido o líquido-vapor, sin embargo en la práctica han sido mejor conocido las adsorciones en la interfase líquido-sólido, esto es debido de hecho a la purificación de líquidos tales como agua, vino y aceites y su decolorización y desintoxicación ha sido llevada a cabo por siglos usando carbón vegetal y carbón activado.

La adsorción de soluciones con carbón activado fue reconocido muy tempranamente por estudios de Freundlich y Heller en ácidos ligeramente grasos y fenoles, el término área superficial específica tiene un significado definido en el caso de microporo de carbón por que la medida de las moléculas del soluto tiene una profunda influencia en la medida del área superficial, de este modo si un carbón activado es utilizado para una aplicación particular su área superficial deberá ser determinada con un análisis molecular con la apropiada forma y tamaño.

Por encima de los procedimientos de medición del área superficial distribución forma y tamaño de los poros que parecen ser muy simples, pero recientemente trabajos han mostrados que la descripción de adsorciones de soluciones es muy simplificado, para críticas acertaciones realistas deberán ser derivadas de datos experimentales de adsorción de soluciones.

Las isothermas de adsorción de datos obtenidos de adsorción de soluciones en general y con carbón activado, en particular deberá ser obtenido, graficando la sustancia adsorbida como función del cambio en la concentración del componente de interés en la solución, el cambio en la concentración es causado por la remoción del componente de interés u otro componente en la solución. La isoterma deberá por lo tanto no la absoluta adsorción del soluto, aunque esto estrictamente representa el exceso de área superficial.

3.8.1 Isothermas de adsorción

Es el método mas ampliamente utilizado para la representación de los diferentes sistemas de equilibrio de adsorción, que dan una considerable información sobre el adsorbato, adsorbente y el proceso de adsorción.

Las isothermas de adsorción ayudan la determinación del área superficial del adsorbente, el volumen de los poros, así como su medida y su distribución, El calor de adsorción muchas isothermas de adsorción han sido derivadas, las mas importantes isothermas de adsorción son la de Lagmuir , Freundlich, Temkim, Brunauer-Emmett-Teller (BET), y de Dubinin, las primeras tres son muy importantes para quimisorción, aunque la ecuación de Lagmuir y

de Freundlich son igualmente importantes para la quimisorción, la ecuación de BET, y Dubinin son más importantes para análisis adsorción física de vapores y gases en carbonos porosos.

Hay tres posibilidades teóricas para abordar la derivación de isothermas de adsorción:

- Derivación cinética
- Derivación estadística
- Derivación termodinámica

En la derivación cinética, la condición de equilibrio es que la tasa de adsorción es igual a la tasa de desorción, equilibrando las dos tasas, se puede obtener una ecuación isotérmica.

En la derivación cinética un equilibrio constante es representado por el radio de la función de partición de sitios vacantes

Los distintos tipos de isotérmicas de adsorción en sólidos y líquidos en forma general se muestran en la figura 3.4.

La ecuación de Freundlich no pudo ser aplicada a la isoterma 1(c), la cual es para soluciones de sólidos de limitada solubilidad las otras tres formas de isothermas mostrando un máximo en cada uno de los casos no pudieron ser explicadas por la ecuación de Freundlich o cualquier modificación de la ecuación de Langmuir. Esto es debido al hecho a las mediciones experimentales en adsorción de soluciones el cambio en la concentración que es una medida de la magnitud de adsorción determinada por el producto de la variación en la concentración por el peso de la solución usada asumiendo en estos casos que solo el componente de interés en la solución es adsorbido

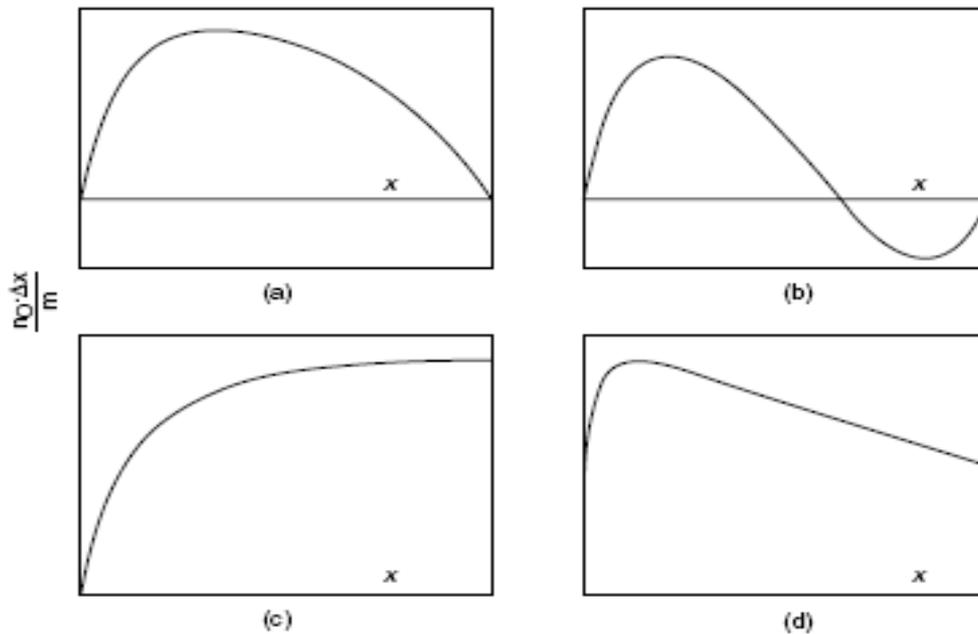


FIGURA 3.4: Isothermas de adsorción: (a) y (b) para líquidos completamente miscibles (c) y (d) para soluciones de sólidos y líquidos.

La ecuación de adsorción de Freundlich aunque ha explicado exitosamente muchos datos de adsorción ha fallado en explicar estos datos a muy altas y muy bajas concentraciones, esto es debido al hecho que la ecuación de Freundlich es de naturaleza empírica y termodinámicamente inconsistente a altas y bajas concentraciones, por lo tanto en un análisis teórico de la adsorción de soluciones y la derivación de una ecuación adecuada han sido difícil debido a la relativa competencia de los otros componentes de la solución y el componente de interés que compiten por un superficie disponible del carbón activado.

La naturaleza de la fase adsorbida es usualmente determinada por la naturaleza del carbón así como por la naturaleza de los componentes de la solución su concentración, grado de solubilidad así como su polarizada. Otro factor que determina la adsorción de soluciones es el arreglo estérico o la estructura química molecular de la especie adsorbida, debido a la alta estructura de microporosidad del carbón, algunos de los microporos no puede ser accesibles a las grandes moléculas del soluto, por consiguiente por medio de técnicas simples de adsorción pueden ser desarrolladas para caracterizar la

microporosidad del carbón en términos del área superficial, contenido de oxígeno, y la hidrofobicidad de la superficie del carbón.

La adsorción de soluciones esta obteniendo suma importancia por la creciente importancia del control ambiental sobre todo en la purificación de aguas con carbón activado.

3.8.2 Adsorción de soluciones diluidas

La adsorción de solutos de acuosas y no acuosas soluciones pueden ser llevadas a cabo poniendo una cantidad conocida de carbón activado en contacto con diferentes concentraciones del soluto, en recipientes cerrados bajo una constante agitación durante cierto determinado tiempo que puede variar de pocos minutos a muchas horas dependiendo de la naturaleza del carbón y de el soluto, siendo alcanzado el equilibrio el contenido es dejado estable preferentemente toda una noche causando que todo el carbón se precipite en el fondo del recipiente, el liquido sobrenadante es centrifugado para acentuar las trazas de carbón activado, luego analizar el liquido para obtener la concentración final del soluto en la solución.

Muchos de los estudios de la adsorción de soluciones han explicado la influencia de las condiciones experimentales y de los componentes del la solución en el proceso de adsorción.

Las ecuaciones de Freundlich y de Lagmuir han sido empleadas para explicar resultados en adsorción de soluciones diluidas pero como se ha mencionado la ecuación de Freunlich carece de una base teórica y la ecuación de Lagmuir asume una constante energía de adsorción sobre la superficie del carbón, lo cual es ciertamente no verdadero para el caso de carbón activado. Debido ha esto una serie de ecuaciones han sido creadas y modificaciones de la ecuación de Lagmuir y de Freundlich, sin embargo todas estas ecuaciones son empíricas por lo tanto no han sido comúnmente usadas, la ecuación de Freundlich a pesar de sus inherentes deficiencias es aun considerada la mejor para la aplicaciones de la adsorción de soluciones con carbón activado para soluciones diluidas.

La relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la presión o concentración de equilibrio, a una temperatura constante se denomina isoterma de adsorción. Generalmente se presentan seis tipos de isotermas, las cuales pueden apreciarse en la tabla 10.5 de anexos. Existen correlaciones que expresan las isotermas de adsorción, esto es la funcionalidad entre la concentración adsorbida expresada en (mg del soluto/ g del adsorbente) y la concentración del soluto en la fase líquida en unidades de (mg/L) a una temperatura determinada, según la ecuación:

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (3.5)$$

Donde q es la cantidad adsorbida por el adsorbente en (mg/g), V es el volumen de la muestra en (L), C_0 es la concentración inicial en (mg/L), C_e es la concentración en equilibrio de la fase líquida en (mg/L) y m es la cantidad de adsorbente en (g) ¹⁰,

Hay diferentes modelos matemáticos que describen las isotermas de adsorción y que a su vez permiten entender la naturaleza del equilibrio de adsorción sólido-gas o sólido-líquido originando el desarrollo de una amplia variedad de ecuaciones de isotermas.

3.9 Ecuación de Freundlich

El modelo de Freundlich fue una de las primeras ecuaciones propuestas para relacionar la cantidad adsorbida con la concentración del adsorbato en la solución:

$$q = K_F C_e^{1/n} \quad (3.6)$$

Donde K_F y n son constantes empíricas que dependen de la naturaleza del adsorbente y del adsorbato y de la temperatura. El valor q es la cantidad de adsorbato adsorbido (mg/g), K_F es la constante de Freundlich la cual es tomada como un indicador de la capacidad de adsorción (L/g), C_e es la

concentración en equilibrio de la fase líquida (mg/L) y n es la constante de heterogeneidad de los sitios de energía. La forma lineal de la ecuación es la siguiente. Así, si se grafica:

$$\log_{10} q = \frac{1}{n} \log_{10} C_e + \log K_F \quad (3.7)$$

Se obtiene una línea recta cuya pendiente es igual a $1/n$ y la ordenada en el origen es $\log_{10} K_F$.

3.10 Ecuación de Langmuir

Una ecuación mucho más exacta para las isothermas del tipo I, la dedujo Irving Langmuir por consideraciones teóricas, esta ecuación guarda importancia para la teoría de fisisorción, así como la quimisorción, la cual fue derivada por medio de cálculos estadísticos y termodinámicos, teniendo en cuenta ciertas suposiciones, de las cuales las más importantes son las siguientes:

- Las entidades adsorbidas átomos, moléculas o iones son sujetados a la superficie a sitios definidos.
- Cada sitio alberga una y solamente una entidad adsorbida.
- El estado de energía de cada entidad adsorbida, es la misma en todos los sitios de la superficie, independientemente de la presencia u ausencia de otras entidades adsorbidas en sitios vecinos.
- El modelo de Langmuir asume que la superficie es perfectamente lisa y homogénea y que las interacciones laterales entre las entidades adsorbidas son insignificantes.

Para ello postuló que los gases al ser adsorbidos por la superficie del sólido forman únicamente una capa de espesor monomolecular

La velocidad de liberación dependerá a su vez de la superficie cubierta aumentando hasta la saturación. Estas dos velocidades, condensación y evaporación, alcanzan un momento en que se hacen iguales y entonces se establece el equilibrio.

La ecuación de Langmuir es la siguiente:

$$q = \frac{bKC_e}{1 + KC_e} \quad (3.8)$$

En donde q es la cantidad de adsorbato adsorbido (mg/g), K es la constante de equilibrio de Langmuir (L/mg), b es una constante que es tomada como un indicador de la capacidad de adsorción de la monocapa (mg/g) y C_e es la concentración en el equilibrio de la fase líquida (mg/L). Los valores de K y b pueden determinarse experimentalmente si se grafica:

De tal manera que se obtiene una línea recta cuya pendiente es igual a $1/bKC_e$ y la ordenada en el origen es $1/b$.

La aplicabilidad de la ecuación de Langmuir para datos experimentales, ha sido llevada a cabo por un gran número de investigadores donde para muchos datos de quimisorción la ecuación de Langmuir resultó válida solo dentro de un rango restringido de datos, ya que la ecuación de Langmuir requiere que el calor de adsorción debe de ser independiente de la cobertura superficial, mientras la determinación directa del calor de adsorción fue encontrada a decrecer invariablemente con el incremento de la cobertura superficial.

Por tanto aunque la ecuación de Langmuir es de significancia limitada para la interpretación de datos de adsorción por carácter idealizado la ecuación retiene una básica importancia para expresar equilibrio de adsorción dinámicos, por tanto esta ha sido una buena base para la derivación de modelos más complejos.

Las suposiciones de que los sitios de adsorción en la superficie sólida, son energéticamente homogéneos y que las interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas, son los puntos débiles del modelo de Langmuir.

3.11 Principales adsorbentes de uso general

El adsorbente más común es el carbón activado. Entre otros adsorbentes se encuentran diversas arcillas como las tierras de Fuller o las arcillas activadas y la alúmina activada.

3.11.1 Carbones activados.

Son materiales que poseen un alto poder de adsorción, como resultado de una importante y variada red de poros. Estos sólidos suelen ser microporos y, como consecuencia, presentan altos valores de superficie específica, normalmente entre 1000 y 1500 m²/g, además pueden presentar variadas contribuciones de meso y macroporosidad.

Las formas más comunes en que se comercializan estos adsorbentes para el tratamiento de aguas son carbones activados en polvo (PAC) y carbones activados granulares (GAC) de sus siglas en inglés.

Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no sólo están definidas por su estructura porosa, sino también por su naturaleza química. El carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono con valencia insaturada; además, grupos funcionales (principalmente de oxígeno y nitrógeno) y componentes inorgánicos responsables de las cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción.

Los poros de un carbón activado se clasifican en tres tipos, de acuerdo a su tamaño:

- Los microporos son poros con un diámetro $d < 20 \text{ \AA}$ y son los que más área proporcionan. Son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas, que generalmente se encuentran presentes en la purificación de gases.
- Los poros medios o mesoporos están en el rango de $20 < d < 500 \text{ \AA}$ y aunque su contribución al área total es menor que los microporos, su tamaño les permite adsorber moléculas grandes que por lo general están presentes en la purificación de líquidos.

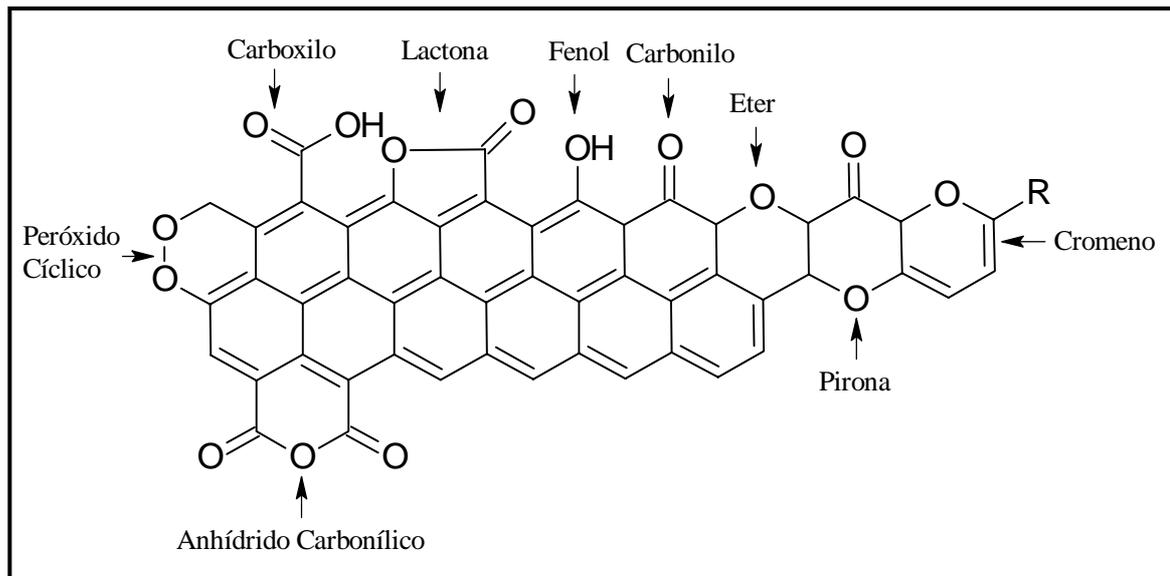


FIGURA 3.5. Algunos grupos funcionales en el carbón activado. Composición típica: 1-22% O, 73-99% C, 0,5-5% H y 1-20% Cenizas².

- Los macroporos con $d > 500 \text{ \AA}$, casi no contribuyen al área total de un carbón, pero su importancia radica en que actúan como vías de acceso a los mesoporos y microporos, afectando la velocidad de difusión de las impurezas en el carbón³.

3.12 Obtención del carbón activado

El carbón activado se fabrica a partir de cualquier material carbónico ya sea de origen mineral o lignocelulósico. Es clasificado según el tamaño, el proceso de activación y el proceso de carbonizado.

Dependiendo del tipo de precursor usado y del proceso de activación es posible controlar el desarrollo de meso y macroporosidad y también, en alguna medida, el tipo de grupos funcionales superficiales que actúan como centros de adsorción².

3.12.1 Métodos de activación utilizados para la obtención del carbón activado

El proceso de activación consiste básicamente en reordenar los átomos de carbono en anillos tipo benceno para lograr una estructura cristalina reticular similar a la del grafito (Figura 3.6).

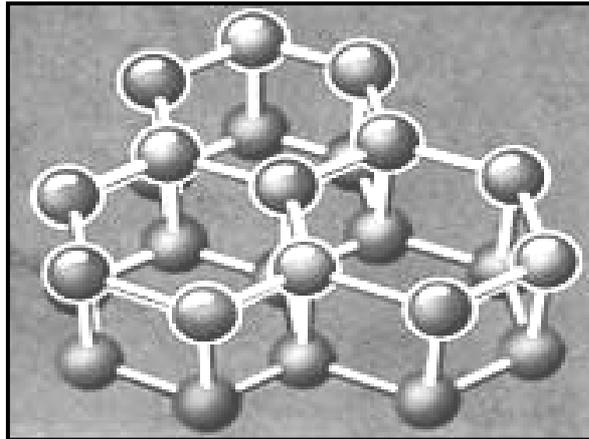


FIGURA 3.6 Estructura cristalina reticular. Átomos de carbono reordenados en forma de anillos

En otras palabras, la activación consiste en "multiplicar" la cantidad de poros de un carbón, dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable¹.

Existen en la actualidad dos métodos de activación, estos son: la activación física y la activación química.

La activación física, normalmente se lleva a cabo en dos etapas, la carbonización del precursor y la gasificación controlada del carbonizado. En la carbonización a altas temperaturas entre 1073-1273 °K, se eliminan del precursor elementos tales como el hidrógeno y el oxígeno, para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria.

En la activación química, es necesario un solo horno. El precursor, normalmente se impregna con un agente químico o activante.

3.13. El nancite

El nance (o indano, nanchi, nanche, nance blanco, nancite, nancito) es el nombre que se le da al fruto pulposo de la especie *Byrsonima crassifolia*, de color amarillo en su maduración, con fuerte aroma, un poco más pequeño que una aceituna. Originario de las regiones tropicales de Latinoamérica.

En la figura 3.7 se muestra el nancite en su maduración, y es en esta etapa en la cual el fruto se desprende del árbol.



Figura 3.7: El nancite en su etapa de maduración.

El *Byrsonima crassifolia* es un árbol mediano (hasta 15 metros de altura), que se propaga por semillas o por esquejes, cultivado tradicionalmente en varios de los países tropicales de Latinoamérica, aunque la distribución y venta de su fruto tiende a ser restringida al mercado local. El árbol también es utilizado como planta de ornato, en países de clima cálido fuera de Latinoamérica.

El fruto nanche es consumible cuando está maduro, presentando un sabor dulce y un color amarillo intenso, con un resabio levemente amargo. La amargura se acentúa fuertemente en las drupas inmaduras que también son comestibles. Su semilla que es la parte dura, no comestible, es rica en carbón.

En Latinoamérica, se prepara de muchas maneras diferentes: crudo, salado, enchilado, almibarado, en helados, paletas congeladas, como agua fresca, e incluso, curtido con aguardiente conocido como vino o licor de nance o de nancite, según el nombre que reciba en cada país.

MATERIAL Y METODO

Los siguientes reactivos serán necesarios para obtener el carbón activado, los utensilios de laboratorio y el método de obtención.

4.1 Reactivos

- Agua destilada
- Fenofaleina
- Hidróxido de sodio 0.4M y 0.1M
- Acido) acético glacial CH_3COOH
- Agua oxigenada aproximadamente de 30 volúmenes
- Tiosulfato de sodio (0.001N)
- Dicromato de potasio (0.005N)
- Acido acético 0.5 M

4.2 Utensilios y cristalería de laboratorio

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| • Desecador | • Erlenmayer de 250 ml |
| • Soporte universal | • Embudos de vidrio |
| • Buretas | • Papel filtro |
| • Espátulas | • Pipetas |
| • Agitadores de vidrio | • Pipetas aforadas : |
| • Beakers | 5,10,25 |
| • Crisoles de porcelana | • Mortero |
| | • Triturad |

4.3 Equipos

- Balanza analítica OHAUS
- ADVENTURER
- Estufa eléctrica
- Cronometro
- Campana extractora de gases
- Mechero de Bunsen
- Triangulo de cerámica
- Termómetro
- Microscopio electrónico de barrido marca phillips modelo XL30
- Secador de bandejas IMPERIAL V
- Espectrómetro NOVA60
- Recubridor de oro por electrodeposición

4.4 Métodos

4.4.1 Elaboración de carbón activado de semilla de nancite por el método químico.

Para la elaboración de carbón activado a partir de la semilla de nancite se utilizo el método químico cuyo procedimiento es el siguiente:

- a. selección y limpieza de la semilla de nancite: por ser esto a escala de laboratorio se realiza de manera manual utilizando agua limpia.
- b. Escurrido y secado de las semillas de nancite: una vez que la semilla ha sido enjuagada se procede a escurrirla y secarla.
- c. Trituración y pesado de la semilla de nancite: una vez que la semilla ha quedado seca se procede a triturarla usando un molino de disco.
- d. Impregnación y pesado de la semilla de nancite: la semilla triturada es impregnada con el agente activante (Hidróxido de sodio 0.4M). La relación de impregnación optima es de 1-1.5 (por cada unidad de masa de semilla triturada se utilizan 1.5 unidades de peso de sustancia

activante). El tiempo de impregnación óptimo es de 10 minutos. Esto debe acompañarse con una agitación constante para procurar una agitación homogénea.

- e. Carbonización: después de haber sido impregnado con el agente químico se procede a introducir la semilla molida e impregnada de sustancia activante en el horno (secador de bandejas) durante un tiempo de carbonización de 30 minutos.

En esta etapa es importante tener control de la temperatura para evitar que se obtenga una gran cantidad de cenizas (temperaturas muy altas) o deficiente activación (temperatura muy baja); La temperatura de carbonización a utilizar es de 350°C.

- f. Lavado y recuperación de la sustancia activante: después de haber extraído el carbón activado se procede a lavarlo con agua destilada para recuperar la sustancia activante. De esta forma se libera el carbón de sustancias ajenas a este y puede ser sometido a las pruebas de adsorción.

4.4.2 Ensayos para la adsorción de ácido acético

En este capítulo se harán los cálculos previos para la obtención de la solución de hidróxido de sodio 0.4M.

Se determinarán las isotermas de adsorción para evaluar la adsorción de ácido acético los cálculos se muestran en el anexo 10.1.

4.4.3 Determinación de arsénico por espectrofotometría

La determinación de arsénico se hará por medio de espectrofotometría, con un espectrofotómetro ESPECTROQUANT NOVA 60, el cual puede detectar niveles de arsénico desde 1ppb hasta 600ppb, contando con un patrón de arsénico, como aseguramiento de la calidad de 1000 mg/L, a partir del cual se prepararon las distintas soluciones de arsénico, el procedimiento de análisis con este equipo se puede encontrar en el anexo, así como otras características del equipo.

4.5. Hipótesis y variables

4.5.1 Hipótesis

- La capacidad de adsorción de arsénico por medio de carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite no es significativa.

4.5.2 Variables y diseño experimental

En este trabajo se van a realizar un conjunto de pruebas experimentales con el objetivo de que pueda analizarse la variación de una serie de factores que se cree tendrán influencia sobre la comprobación de la hipótesis.

A continuación se define las variables, factores y niveles que se analizarán.

- **Unidad experimental**

La unidad experimental son las distintas muestras de aguas con diferentes concentraciones de arsénico y pH.

- **Variable respuesta**

La variable respuesta en nuestro caso será capacidad de adsorción del carbón activado en la adsorción de arsénico.

- **Factores a analizar**

Los factores a analizar o variables de estudio serán tres con distintos niveles de estudio los cuales se muestran a continuación.

- a) PH de la muestra
- b) Concentración de arsénico de la muestra
- c) Tiempo de contacto del adsorbente con la muestra

Debido a las características del experimento se utilizara un diseño factorial mixto ya que se analizaran los factores en distintos niveles, el factorial tiempo de contacto solo se analizara en dos niveles alto y bajo la concentración será en tres niveles que serán de 50, 100 y 200ppb, en cambio el pH se analizara en sus doce niveles naturales por lo tanto el numero de experimentos que se hará será $2 \times 3 \times 12 = 72$ experimentos, se ha preferido este método por las siguientes razones.

- a. Los factores a analizar son de tipo continuo y la variables repuesta se puede ajustar aunque no necesariamente se lineal en el rango de variación de los factores.
- b. Se adecua a las variaciones naturales de los factores a analizar uno de ellos es el pH que tiene 12 niveles naturales de variación, otro ejemplo es la concentración de arsénico que lo mas ajustado a las necesidades seria analizarla en sus tres niveles, de 50, 100, y 200ppb.

Experimentos	pH de la muestra	Concentración de arsénico (ppb)	Tiempo de contacto (s)	Variable repuesta mg adsorbidos/gramo de carbón activado
1	1	50	alto	
2	2	50	bajo	
3	3	50	alto	
4	4	50	bajo	
5	5	50	alto	
6	6	50	bajo	
7	7	50	alto	
8	8	50	bajo	
9	9	50	alto	
10	10	50	bajo	
11	11	50	alto	
72	12	100 y 200	bajo	

Tabla 4.1: Factores a analizar con sus respectivos niveles de estudio²⁴.

V. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 Obtención de carbón activado de la semilla de nancite.

Siguiendo el procedimiento antes mencionado en el acápite 4.4 se obtuvo por medio del método químico carbón activado de la semilla de nancite a escala de laboratorio, el cual se procedió a caracterizar por medio de las isothermas de adsorción con ácido acético usando el modelo de Freundlich.

Otras características del carbón se obtuvieron en los laboratorios de la Universidad de Zulia en Venezuela. Los datos obtenidos se muestran a continuación: Azufre: 0.04%, Ceniza: 2.28%, Carbono: 80.73%, Hidrógeno: 1.86%, Nitrógeno: 1.11%, Oxígeno: 13.98%. Los resultados obtenidos son similares a la composición típica del carbón activado mencionado en el acápite 3.1

El área superficial de 700 m²/g aproximadamente, y un tamaño medio de poros de 28 Å, se tomaron de la monografía titulada Caracterización del carbón activado obtenido de la semilla de nancite a escala de laboratorio donde se obtuvo carbón activado a partir de la semilla de nancite bajo las mismas condiciones.

5.2 Isothermas de adsorción del carbón obtenido de la semilla de nancite

El procedimiento y cálculos para la determinación de las isothermas de Freundlich se detallan en el anexo 10.1

En el anexo 10.2 se muestran los cálculos para la determinación de la isoterma de adsorción del carbón obtenido de la semilla de nancite con los datos de la tabla 10.8 se obtiene la grafica 5.1

Con los datos obtenidos en esta tabla 10.8 se grafica log C vrs log (x/m) obteniéndose una grafica que se ajusta mucho a una línea recta, la isoterma que se utilizo es la ecuación de Freundlich linealizada que se muestra a continuación:

$$\log_{10} \frac{x}{m} = \frac{1}{n} \log_{10} C_e + \log K_f \quad (5.1)$$

La ecuación de regresión de Freundlich obtenida es $y = 0.7908x - 0.7503$, el coeficiente de correlación es $R = 0.9622$, donde se observa una buena calidad de ajuste, para el cálculo de los coeficientes de la ecuación de Freundlich K y n basta igualar los coeficientes de la ecuación de regresión con la ecuación 5.1, con lo que se obtiene $n = 1.26$; $k = 0.18$, el valor de n mayor que uno es un indicativo de la buena adsorbibilidad del carbón activado preparado a partir de la semilla de nancite.

En la figura 5.1 se muestra la Isoterma de adsorción de Freundlich con carbón de nancite

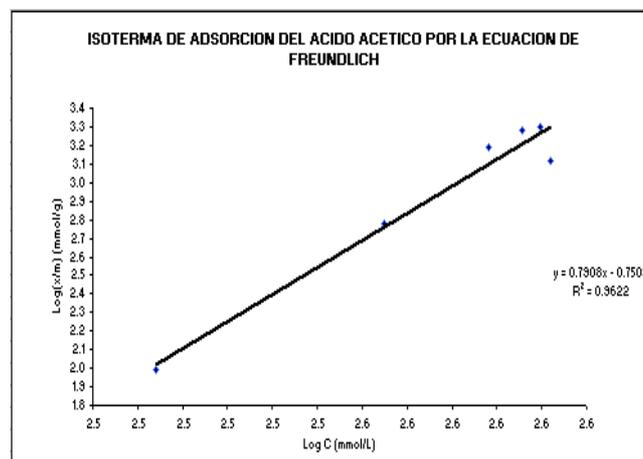


FIGURA 5.1: Isoterma de adsorción de Freundlich con carbón de nancite

5.3 Isotermas de adsorción del carbón industrial

Como comparación también se obtuvieron las isotermas de adsorción de un carbón industrial de uso comercial con características similares al carbón obtenido de la semilla de nancite.

Los experimentos se hicieron bajo las mismas condiciones a la cual fue obtenida la isoterma de adsorción del carbón obtenido de la semilla de nancite.

En el anexo 10.3 se muestran los cálculos para la obtención de la isoterma de adsorción del carbón industrial usando también el modelo Freundlich, con los datos

obtenidos se obtiene la isoterma de adsorción de Freundlich con carbón industrial que se muestra en la figura 5.2.

La ecuación de regresión de Freundlich obtenida es $y = 0.7807x - 0.7813$, el coeficiente de correlación es $R^2 = 0.9682$, donde se observa una buena calidad de ajuste, para el cálculo de los coeficientes de la ecuación de Freundlich K y n basta igualar los coeficientes de la ecuación de regresión con la ecuación 5.1 donde se obtiene $n = 1.28$, $k = 0.165$, el valor de n mayor que la unidad es un indicativo de la adsorbibilidad del ácido acético con carbón industrial

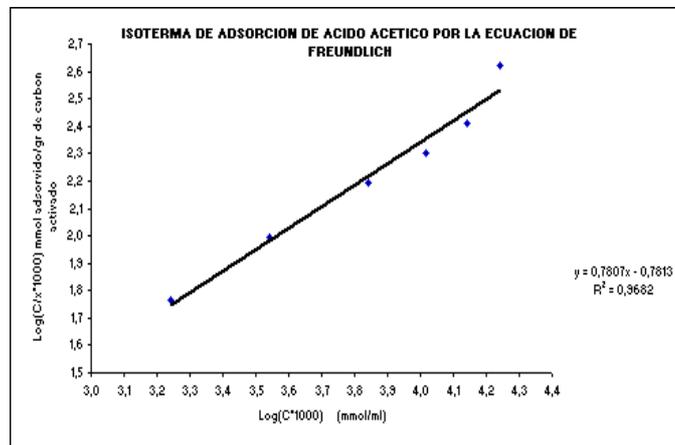


FIGURA 5.2: Isoterma de adsorción de Freundlich con carbón industrial

5.4 Adsorción de arsénico en función del pH a diferentes concentraciones

Se prepararon a partir del agua de pozo de la comunidad de Casares municipio de Diriamba tres concentraciones estándares de arsénico de 50ppb, 100ppb y 200ppb, con ayuda del estándar de arsénico de 1000ppm, seguidamente, de cada una de las concentraciones se prepararon 12 soluciones con pH de 1 hasta 12 respectivamente por la agregación de hidróxido de sodio o ácido sulfúrico.

Cada una de las soluciones de 100ml cada una se sometió por lapso de una hora y en contacto con 2gr de carbón activado bajo agitación constante y

temperatura ambiente, luego la muestra fue filtrada para retener el carbón, con la muestra filtrada se procedió a analizar la concentración final de arsénico por medio del espectrómetro nova 60, los resultados de estos análisis se muestran en las tabla 5.1 para 50ppb, para 100ppb y 200ppb se muestran el anexo 10.4.

10.4.1 Concentración de 50ppb y una hora de contacto.

N°.	Ph	Concentración inicial de As (50ppb)	Concentración final de As (50ppb)	Cantidad removida de As (50ppb)	Cantidad removida de As (100ppb)
1	1	50	46	4	8
2	2	50	45,4	4,6	9,2
3	3	50	43,7	6,3	12,6
4	4	50	41,55	8,45	16,9
5	5	50	40,185	9,815	19,63
6	6	50	37,35	12,65	25,3
7	7	50	31,55	18,45	36,9
8	8	50	13,25	36,75	73,5
9	9	50	9,33	40,67	81,34
10	10	50	7,7	42,3	84,6
11	11	50	6,69	43,31	86,62
12	12	50	3,667	46,333	92,666

TABLA 5.1: Porcentajes de remoción para una concentración de 50ppb

Con los datos de las tablas 5.1, 10.13, 10.14 se obtiene el grafico 5.3 del cual se puede deducir que en el rango de pH = 4 y pH = 9, se presenta la mayor capacidad de remoción por adsorción, debido a que en este rango de valores pH el porcentaje de adsorción se eleva desde 9% hasta 78% aproximadamente. El cambio de pH en la solución determina el cambio en las especies iónicas de manera a un pH básico hay mayor presencia de As(III) en forma iónica que son adsorbidos o reaccionan con la superficie química del carbón.

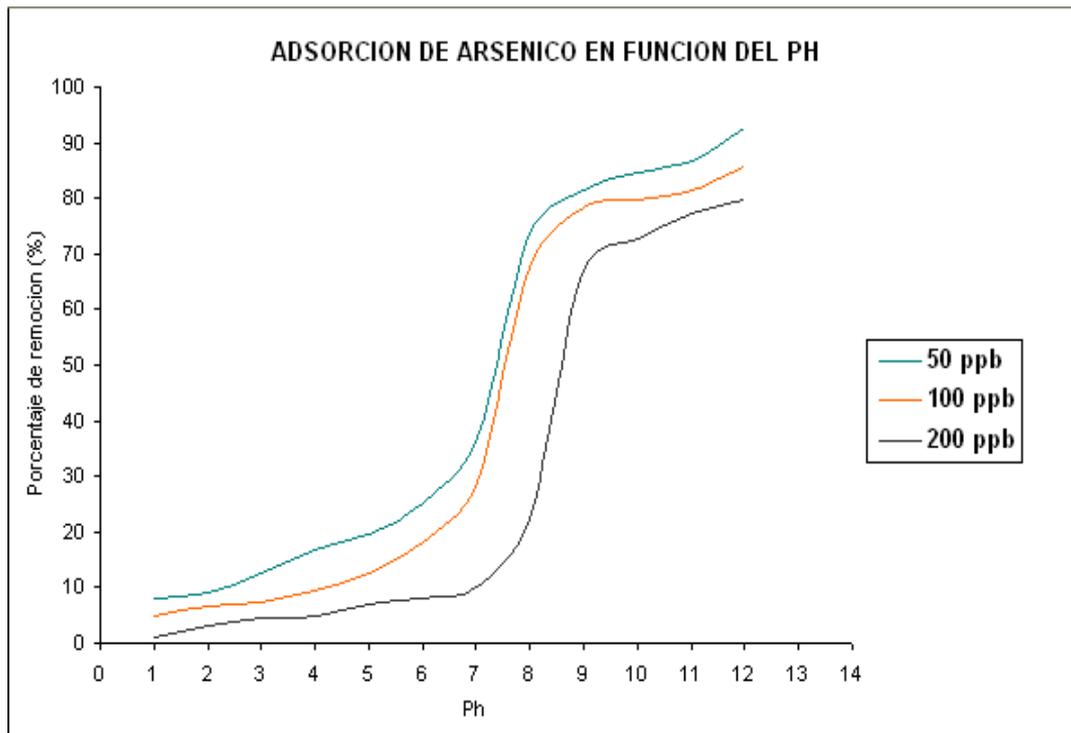


FIGURA 5.3: Adsorción de arsénico en función del pH

Los porcentajes de remoción son mayores cuanto menor es la concentración inicial esto puede ser debido a que el incremento de la concentración inicial causa la pronta saturación del carbón, los resultados que se presentan concuerdan con los datos obtenidos por investigaciones anteriores hechas sobre el mismo tema, que se citan el acápite 3.5

5.5 Adsorción de arsénico en función de la concentración a diferentes pH.

Se prepararon cinco concentraciones de arsénico de 25, 50, 100, 200, y 500ppb respectivamente a partir de agua de pozo con el estándar de arsénico, se ajusto el pH de estas con acido sulfúrico hasta obtener un pH = 3 en las cinco soluciones luego se sometió por lapso de una hora y bajo agitación constante con carbon activado de la semilla de nancite en una proporción de 2g/100 ml de solución, luego se filtro y se midió la concentración final de arsénico de las cinco soluciones, los resultados se muestran en las tablas 5.2 y 5.3.

5.5.1 Adsorción de arsénico en función de la concentración, pH ácido y una hora de contacto

Concentración inicial (ppb)	pH	cantidad de carbón (gr/100ml)	Concentración final (ppb)	Cantidad removida (ppb)	Porcentaje de remoción de As (%)
25	3	2	20,56	4,44	17,76
50	3	2	45,62	4,38	8,76
100	3	2	95,68	4,32	4,32
200	3	2	195,84	4,16	2,08
500	3	2	490,56	9,44	1,89

TABLA 5.2: Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 3)

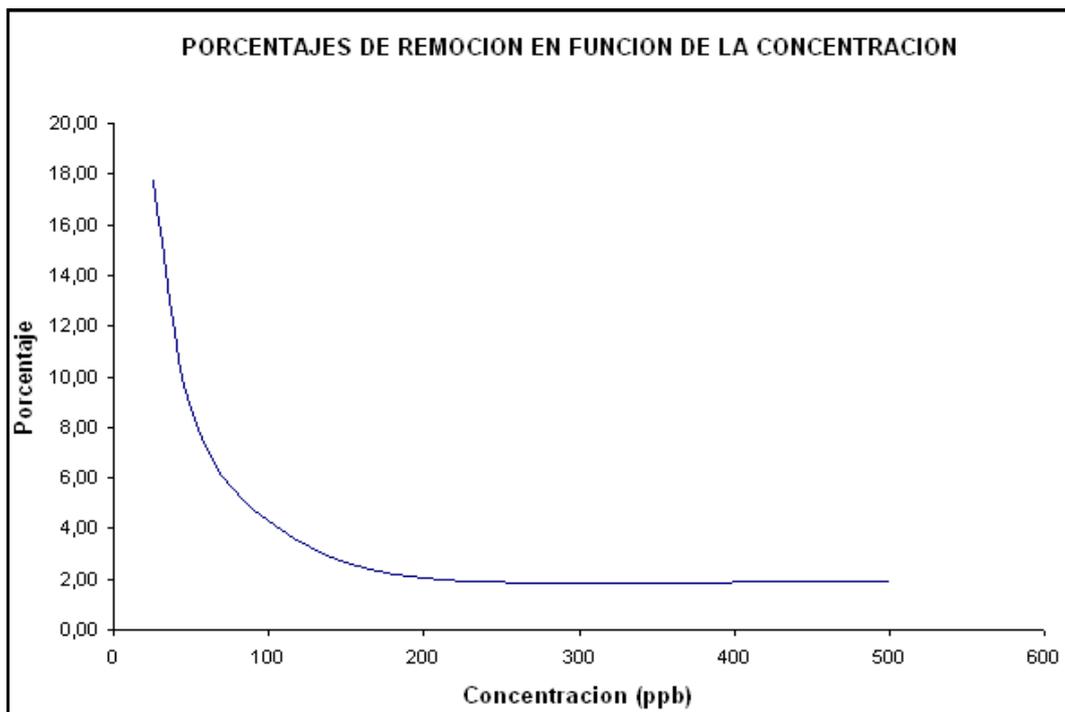


FIGURA 5.4: Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 3)

5.4.2 Adsorción de arsénico en función de la concentración, pH neutro y una hora de contacto.

concentración inicial (ppb)	pH	cantidad de carbón (gr/100ml)	concentración final (ppb)	cantidad removida (ppb)	porcentaje de remoción de As (%)
25	7	2	7,56	17,44	69,76
50	7	2	20,36	29,64	59,28
100	7	2	48,23	51,77	51,77
200	7	2	125,69	74,31	37,16
500	7	2	360,56	139,44	27,89

TABLA 5.3: Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 7)

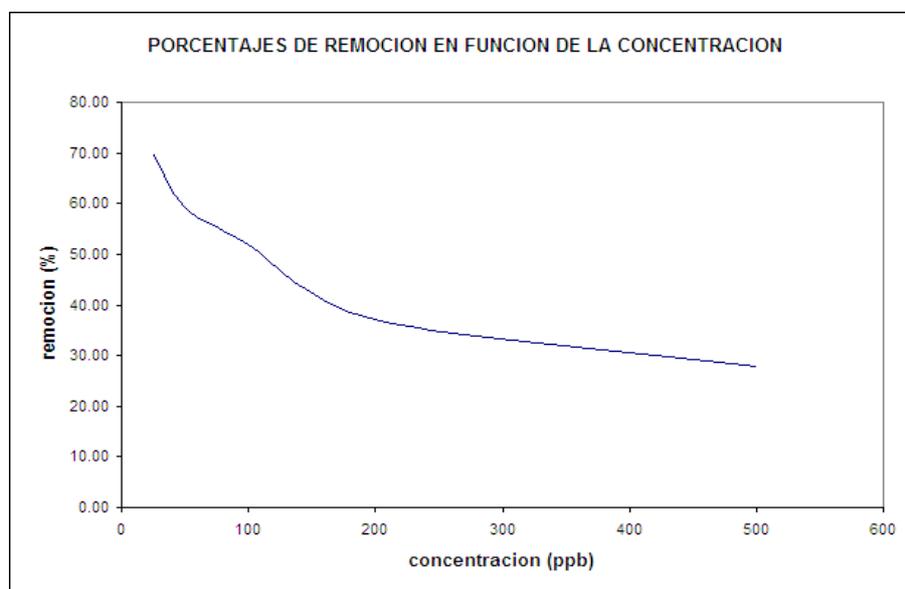


FIGURA 5.5: Adsorción de arsénico en función de la concentración (pH = 7)

De la grafica 5.5 y 5.6 se deduce que la adsorción es mayor a un pH neutro así con el aumento de la concentración inicial se da la saturación del carbón.

Según los resultados de la tabla 5.3 se puede apreciar que a un pH neutro como usualmente se encuentra el agua para consumo humano y una concentración máxima inicial de 25ppb se puede reducir esta a 7.56ppb, concentración que se encuentra bajo el máximo permisible de 10ppb, según las normas CAPRE para aguas de consumo humano que se citan en el anexo 10.10

VI. CONCLUSIONES

- El carbón obtenido de la semilla de nancite es un material viable para la elaboración de carbón activado; debido a su bajo contenido de azufre de 0.04%, contenido de cenizas de 2.285%, así como el alto contenido de hidrogeno de 1.86%, y contenido de oxigeno de 13.98%, que son componentes esenciales en la superficie química del carbón para las obtención de un carbón activado con buenas propiedades adsorbidas.
- El carbón activado de la semilla de nancite presenta afinidad en la adsorción ácido acético, Los coeficientes n y k encontrados de la ecuación de Freundlich, reflejan la macroporosidad del carbón activado de la semilla de nancite.
- La adsorción de arsénico fue influenciada principalmente por factores tales como el pH de la solución, de tal modo que la remoción fue máxima en el rango de pH = 4, hasta pH = 9, debido al intercambio en la presencia de las especies iónicas de As.
- La remoción de arsénico estuvo en dependencia del grado de concentración de este en la solución de tal modo que a diversas concentraciones de 25, 50, 100, 200, y 500ppb a un pH= 3, la remoción fue desde 17.8%, hasta 1.89%, para 25 y 500ppb respectivamente, a un pH=7, la remoción fue desde 69.80% hasta 27.9%, para 25 y 500ppb respectivamente, el bajo índice de remoción es causada por la saturación del carbón.

VII. RECOMENDACIONES

- Evaluar la capacidad de adsorción de arsénico en aguas con carbón activado obtenido de la semilla de nancite por medio de columnas de adsorción.
- Evaluar la capacidad adsorbente del carbón activado obtenido de la semilla de nancite con otras especies inorgánicas, en aguas de consumo humano, así como aguas residuales.
- Producir el carbón activado obtenido de la semilla de nancite a escala piloto para la construcción de filtros de adsorción y poder evaluar su capacidad adsorbente.

VIII. GLOSARIO

Absorción: la absorción es una operación unitaria de transferencia de masa que consiste en poner un gas en contacto con un líquido para que este disuelva determinados componentes del gas para que este quede libre de ellos.

Adsorbente: Sólido en el cual se da la adsorción

Adsorción: proceso en el cual un sólido llamado adsorbente tiene la capacidad de retener moléculas átomos o iones de un gas o líquido llamado sustrato.

Adsorbato: soluto que es adsorbido por el adsorbente.

Desorción: proceso contrario a la adsorción, donde se desliga o libera al adsorbente del adsorbato.

Isotermas de adsorción: relación entre la cantidad adsorbida y la concentración de la solución en el equilibrio de adsorción a temperatura constante.

IX. BIBLIOGRAFIA

1. Atkins, P. (1991). "Fisicoquímica". México D.F., México. Editorial Adición-Wesley Iberoamericana.151-160.
2. Basso, M.; Cerella, y Cukierman, A. (2001). "Remoción de Cadmio (II) de soluciones acuosas mediante carbón activado preparado a partir de caña". *Programa de investigación de fuentes alternativas de materias primas*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires. Argentina.
3. Basso, M.; Cerella, y Cukierman, A. (2001). "Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados mediante carbones activados obtenidos de un precursor renovable". *Revista Argentina. Avanc. En Energ. Renov. y Med. Amb.* 5, 1-6.
4. Castellan, G. (1998). "Fisicoquímica". Segunda edición. México D.F., México. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. 452-458. (19)
5. Chern, J.; Chien, Y. (2002). "Adsorption of nitrophenol onto activated carbon: isotherms and breakthrough curves". *Water Res.* 36. 647-655.
6. Dąbrowski, A.; Podkościenly, P.; Hubicki Z.; Barczak, M. (2005). "Adsorption of phenolic compounds by activated carbon". *Chemosphere.* 58. 1049-1070.
7. Levine, I. (1996). "Fisicoquímica". Cuarta edición. Vol. 1. Madrid, España. Editorial Mc Graw Hill. 393-398.
8. Maron, S.; Prutton, C. (1968). "Fundamentos de fisicoquímica". Primera edición. México D.F., México. Editorial Limusa. 822-830.
9. Perry, R.; Green, D.; Maloney, J. (1992). "Manual del Ingeniero Químico". Sexta Edición. México D.F., México. Editorial Mc Graw Hill. 148-151.
10. Redesma. (2003). "Carbón activado. Magia negra para el tratamiento del agua". www.redesma.org. 15/01/2005.
11. Rodríguez, F.; Molina, S. (2001). "Carbón Activado".
12. Treybal, R. (1996). "Operaciones de transferencia de masas". México D.F., México. Editorial Mc Graw Hill. 628-711. (73).

13. VI Curso Taller Iberoamericano sobre Adsorbente para la Protección Ambiental. Managua, Nicaragua. 2005. (75)
14. Water Depot Incorporation, grupo Adriana S.A de C.V aguapurificada@gmail.com
15. Gutiérrez pulido H.; De la vara Salazar R. 2003 Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc Graw Hill, México.
16. Gupta, S.K. and Chen. K.Y., J. Water Pollut. Control Fed., 50, 493, 1978.
17. Kamegawa, K., Yoshida, H., and Arita, S., Nippon Kagaku Kaishi, 1979, p. 1365.
18. Huang, C.P. and Fu, P.L.K., J. Water Pollut. Control Fed., 56, 233, 1984.
19. Rajakovic, L.V., Sep. Sci. Technol., 27, 1423, 1992.
20. Huang, C.P. and Van, L.M., J. Water Pollut. Control Fed., 61, 1596, 1989.
21. Raji, C. and Anirudhan, T.S., J. Sci. Ind. Res., India, 57, 10, 1998
22. Lorenzen, L., Van Deventer, J., and Landi, W., Miner. Eng., 8, 557, 1995.
23. Sen, A.K. and De, A.K., Indian J. Technol., 25, 259, 1987.
24. Gutiérrez pulido H.; De la vara Salazar R. 2003 Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc Graw Hill, México

X ANEXOS

10.1. Cálculos para determinar las isothermas de adsorción

Obtención de la solución de Hidróxido de sodio 0.4M.

$$[\text{NaOH}] = n_{\text{NaOH}}/V_{\text{sln.}}$$

Donde:

$V_{\text{sln}} = 1\text{L}$, despejando n_{NaOH}

$$n_{\text{NaOH}} = [\text{NaOH}] * V_{\text{sln}} = 0.4 \text{ mol/L} * 1\text{L} = 0.4\text{mol}$$

Entonces

$$m_{\text{NaOH}} = n_{\text{NaOH}} * PM_{\text{NaOH}} = 0.4\text{mol} * 39.966\text{gr/mol} = 15.9984 = 16\text{gr.}$$

Esto significa que para obtener una solución de hidróxido de sodio 0.4M es necesario diluir 16g del mismo en un litro de agua destilada

10.1.1 Método experimental

Experimento: "Determinación de las isothermas de adsorción."

- a) Enumerar y etiquetar 6 erlenmeyers.
- b) Pesar cada erlenmeyer con su respectivo tapón.
- c) Colocar dentro de cada erlenmeyers 2.00 gr de carbón vegetal pulverizado.
- d) Pesar nuevamente los erlenmeyer con el carbón.
- e) Preparar las buretas, una con ácido acético glacial, CH_3COOH la otra con agua destilada.
- f) Adicionar según tabla 10.1.

ERLENMEYER	CH ₃ COOH (ml)	H ₂ O (ml)
Nº1	100	-----
Nº2	80	20
Nº3	60	40
Nº4	40l	60
Nº5	20	80
Nº6	10	90

TABLA 10.1: Soluciones de ácido acético

- g) Agitar 6 matraces.
- h) Anotar la temperatura nuevamente.
- i) Filtrar cada solución en un Erlenmeyer seco.
- j) Tomar una alícuota de 2.5 ml del erlenmeyer nº 1 y nº 2, de 5ml para nº 3 y nº4 y de 10ml para nº 5 y nº 6.
- k) Titular cada alícuota con NaOH 0.4

10.1.2 Datos experimentales.

Determinación de las Isotermas de Adsorción.

ERLENMEYER	GRAMOS DE CARBON	mL DE NaOH
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

Tabla 10.2: Mililitros de NaOH gastados.

10.1.3 Cálculos típicos

Concentración (c) en moles/L de ácido acético que está en equilibrio con el carbón vegetal:

En el punto de equivalencia:

$$N_{\text{CH}_3\text{COH}} = n_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}}$$

La concentración de ácido acético en el Erlenmeyer será:

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \text{moles}_{\text{CH}_3\text{COOH}} / V_{\text{sln.}}$$

Cálculos de los moles iniciales:

M = moles/L, si se despeja los moles quedarían, M*L.

Se recomienda llenar la siguiente tabla para facilitar el cálculo.

ERLENMEYERS	Sl'n mol/L	MOLES INICIALES	MOLES FINALES	$[\text{CH}_3\text{COOH}]$ M
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Tabla 10.3: Porcentajes de remoción de arsénico

Cálculo del número de moles de ácido acético adsorbido por gramo de adsorbente:

Para ERLLENMEYER n° 1.

c/x = moles adsorbidos / gr. de carbón activado.

Para realizar la grafica es necesario llenar la siguiente tabla:

ERLENMEYERS	C/X	GRAMOS DE CARBON	LOG(x/m)	LOG C (mmol/L)
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Tabla 10.4: Forma logarítmica de la ecuación de Freundlich

10.2 Determinación de la isoterma de adsorción del carbón obtenido de la semilla de nancite.

ERLENMEYER	[CH ₃ COOH] (ml)	GRAMOS DE CARBON	mL DE NaOH
1	100	2.052	102
2	80	2.008	77
3	60	2.005	121
4	40	2.06	79
5	20	2.02	84
6	10	2.05	43

TABLA 10.5: ml de NaOH gastados con carbón de nancite.

10.2.1 Cálculos típicos

Concentración (c) en moles/L de ácido acético que está en equilibrio con el carbón vegetal:

En el punto de equivalencia:

$$N_{\text{CH}_3\text{COH}} = n_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}}$$

La concentración de ácido acético en el Erlenmeyer será:

$$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \text{moles}_{\text{CH}_3\text{COOH}} / V_{\text{soln}}$$

Cálculos de los moles iniciales:

M = moles/L, si se despeja los moles quedarían, M*L.

Se recomienda llenar la siguiente tabla para facilitar el cálculo

Muestra	$N_{\text{CH}_3\text{COOH}} = n_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}}$	V_{sln}	$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \frac{\text{moles } \text{CH}_3\text{COOH}}{V_{\text{sln}}}$	$[\text{CH}_3\text{COOH}]_{\text{INICIAL}}$	porcentaje de remoción
1	40.8	104.5000	0.3904	17.4000	6.206897
2	30.8	79.5000	0.3874	13.9200	11.49425
3	48.4	126.0000	0.3841	10.4400	7.279693
4	31.6	84.0000	0.3762	6.9600	9.195402
5	33.6	94.0000	0.3574	3.4800	3.448276
6	17.2	53.0000	0.3245	1.7400	1.149425

TABLA 10.6: Porcentajes de remoción de arsénico con carbón de nancite.

Cálculo del número de moles de ácido acético adsorbido por gramo de adsorbente:

Para Muestra nº 1.

$C/x = \text{moles adsorbidos} / \text{gr. de carbón activado.}$

Muestra	Sln mmol/mL	MMOLES INICIALES	MMOLES FINALES	$[\text{CH}_3\text{COOH}]_M$	MILIMOLES ADSORVIDOS
1	17.4	43.5000	40.8000	0.3907	2.7000
2	13.92	34.8000	30.8000	0.3888	4.0000
3	10.44	52.2000	48.4000	0.3851	3.8000
4	6.96	34.8000	31.6000	0.3785	3.2000
5	3.48	34.8000	33.6000	0.3588	1.2000
6	1.74	17.4000	17.2000	0.3192	0.2000

TABLA 10.7: Milimoles adsorbidos con carbón de nancite.

Para realizar la gráfica es necesario llenar la siguiente tabla:

Muestra	C/X	GRAMOS DE CARBÓN	LOG(x/m)	LOG C (mmol/L)
1	1.3158	2.0520	3.1192	2.5918
2	1.9920	2.0080	3.2993	2.5897
3	1.8953	2.0050	3.2777	2.5856
4	1.5534	2.0600	3.1913	2.5781
5	0.5941	2.0200	2.7738	2.5548
6	0.0976	2.0500	1.9893	2.5041

TABLA 10.8: Forma logarítmica de la ecuación de Freundlich**10.3 Determinación de la isoterma de adsorción del carbón industrial.**

Se debe elaborar la siguiente tabla:

Muestra	[CH ₃ COOH]. (ml)	GRAMOS DE CARBON	mL DE NaOH
1	100	2.052	106.6
2	80	2.008	85.7
3	60	2.005	129.5
4	40	2.06	86.2
5	20	2.02	86.5
6	10	2.05	43.2

TABLA 10.9: ml de NaOH gastados con carbón industrial.**10.4.1 Cálculos típicos**

Concentración (c) en moles/L de ácido acético que está en equilibrio con el carbón vegetal y se procede a hacer los mismos cálculos anteriores.

Muestra	$N_{\text{CH}_3\text{COH}} = \frac{n}{V_{\text{NaOH}}}$	V_{sln}	$[\text{CH}_3\text{COOH}] = \frac{\text{moles}}{V_{\text{sln}}}$	[CH ₃ COOH] INICIAL	porcentaje de remoción
1	42.64	109.1	0.3908	17.4000	1.9770
2	34.28	88.2	0.3887	13.9200	1.4943
3	51.8	134.5	0.3851	10.4400	0.7663
4	34.48	91.2	0.3781	6.9600	0.9195
5	34.6	96.5	0.3585	3.4800	0.5747
6	17.28	53.2	0.3248	1.7400	0.6897

TABLA 10.10: Porcentajes de remoción de arsénico con carbón industrial.

c/x = moles adsorbidos / gr. de carbón activado.

Muestra	SIn mmol/mL	MMOLES INICIALES	MMOLES FINALES	[CH ₃ COOH]M	MILIMOLES ADSORVIDOS
1	17.4	43.5000	42.6400	0.3907	0.8600
2	13.92	34.8000	34.2800	0.3888	0.5200
3	10.44	52.2000	51.8000	0.3851	0.4000
4	6.96	34.8000	34.4800	0.3785	0.3200
5	3.48	34.8000	34.6000	0.3588	0.2000
6	1.74	17.4000	17.2800	0.3192	0.1200

TABLA 10.11: Milimoles adsorbidos con carbón industrial.

Para realizar la grafica es necesario llenar la siguiente tabla:

Muestra	C/X	GRAMOS DE CARBON	LOG (x/m)	LOG C (mmol/L)
1	0.4191	2.0520	2.6223	4.2405
2	0.2590	2.0080	2.4132	4.1436
3	0.1995	2.0050	2.2999	4.0187
4	0.1553	2.0600	2.1913	3.8426
5	0.0990	2.0200	1.9957	3.5416
6	0.0585	2.0500	1.7674	3.2405

TABLA 10.12: Forma logarítmica de la ecuación de Freundlich

10.4 Datos de remoción de arsénico para una concentración inicial de 100ppb y 200ppb

10.4.1 Concentración de 100ppb y una hora de contacto

Experimentos	pH	Concentración inicial de As (100ppb)	Concentración final de As (100ppb)	Cantidad removida de As (100ppb)	Porcentaje de remoción de As (100ppb)
1	1	100	95	5	5
2	2	100	93,5	6,5	6,5
3	3	100	92,8	7,2	7,2
4	4	100	90,44	9,56	9,56
5	5	100	87,5	12,5	12,5
6	6	100	81,7	18,3	18,3
7	7	100	71,1	28,9	28,9
8	8	100	32,5	67,5	67,5
9	9	100	21,6	78,4	78,4
10	10	100	20,4	79,6	79,6
11	11	100	18,38	81,62	81,62
12	12	100	14,34	85,66	85,66

TABLA 10.13: Porcentajes de remoción para una concentración de 100 ppb

10.4.2 Concentración de 200ppb y dos horas de contacto

Experimentos	pH	Concentración inicial de As (200ppb)	Concentración final de As (200ppb)	Cantidad removida de As (200ppb)	Porcentaje de remoción de As (200ppb)
1	1	200	197,6	2,4	1,2
2	2	200	194	6	3
3	3	200	191	9	4,5
4	4	200	190	10	5
5	5	200	186	14	7
6	6	200	184	16	8
7	7	200	180	20	10
8	8	200	155	45	22,5
9	9	200	65,4	134,6	67,3
10	10	200	54,8	145,2	72,6
11	11	200	45,6	154,4	77,2
12	12	200	40,8	159,2	79,6

TABLA 10.14: Porcentajes de remoción para una concentración de 200 ppb

10.5 Tipos de isotermas de adsorción según IUPAC

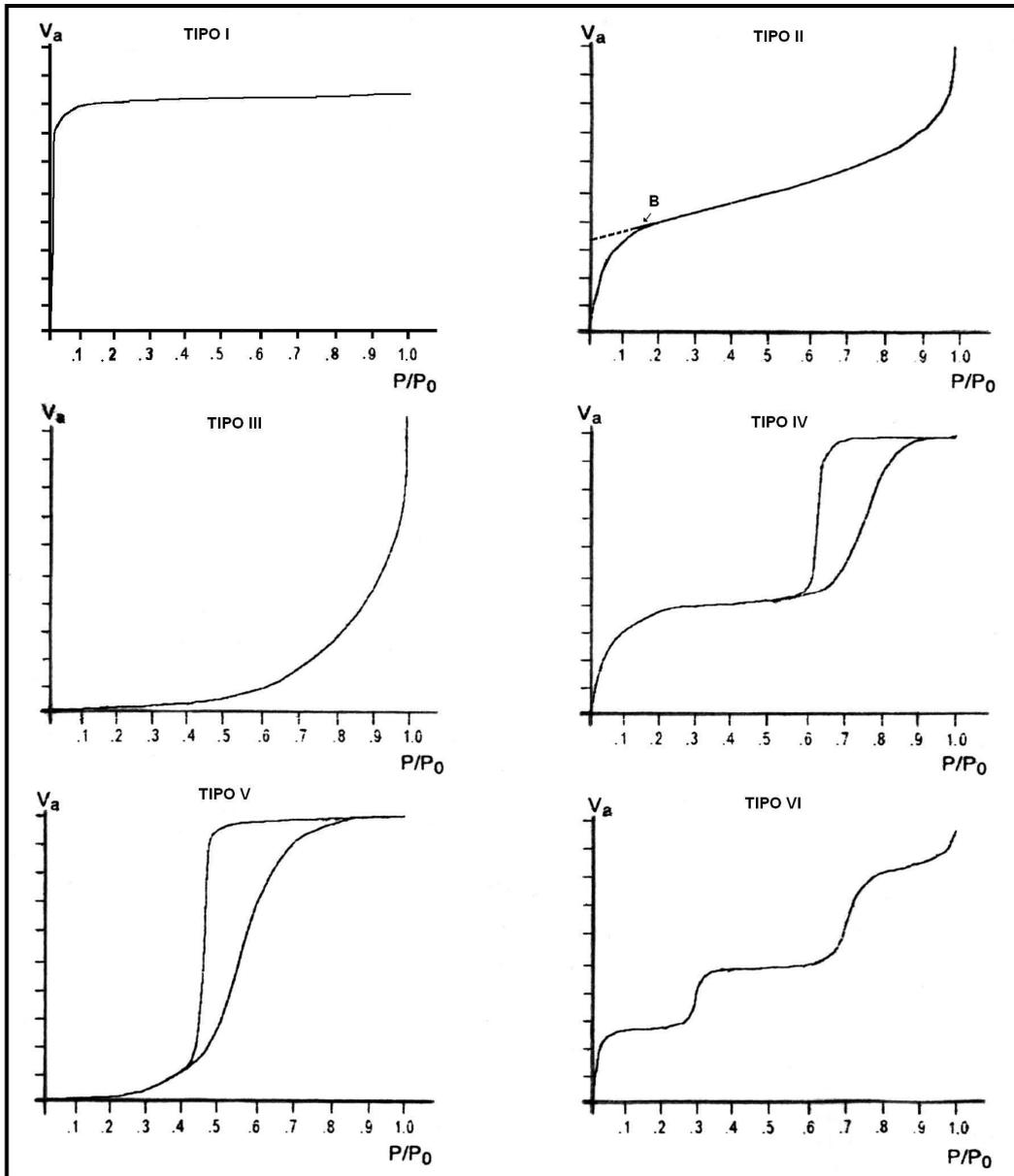
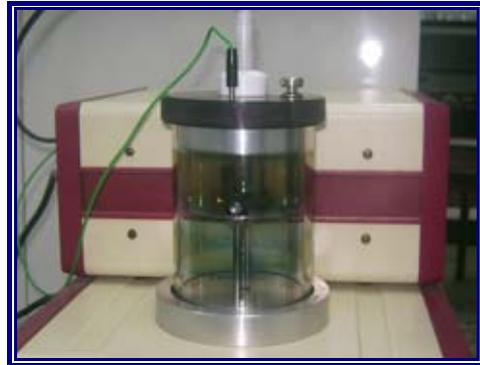


Figura 10.1 Tipos de Isotermas de adsorción según IUPAC⁷⁷.

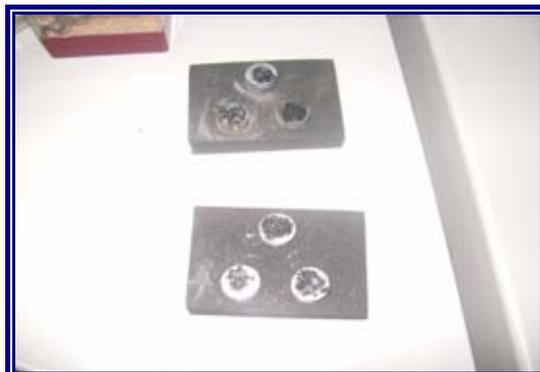
10.6 Procedimiento previo de electrodeposición para luego ser observadas por el microscopio electrónico.

Figuras 2.5: Vista del recubridor de oro por electrodeposición incluyendo el panel de controles donde se determina el vacío interno y la intensidad de la electrodeposición



Figuras 10.2: Vista de la cámara donde se lleva a cabo la electrodeposición del carbón activado.

Posteriormente las muestras recubiertas son colocadas en el portamuestra del microscopio electrónico de barrido marca Philips modelo XL30 para ser observadas, cada punto donde es colocada la muestra lleva una numeración para su posterior identificación (Figura 10.2).



10.7 Detalles del microscopio electrónico de barrido (MEB)

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB):

En esta técnica el haz de electrones interacciona en la muestra, esto ocurre internamente en la columna, la cual a su vez debe cumplir ciertas condiciones, entre las cuales se encuentra un vacío interno de $1,4 \times 10^{-7}$ mBar (Figura 2.4).



Figura 2.4: Partes del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

La preparación de la muestra incluye una fase de gran importancia antes de ser observada al microscopio electrónico, muchos materiales no son buenos conductores de electricidad, lo que hace que la interacción entre el haz de electrones y la muestra no sea muy eficaz, con el fin de obtener mayor nitidez y observar con mayor detalle la superficie del carbón activado es preciso recubrir la muestra de carbón por una capa conductora extremadamente fina (1,5 – 3nm) de oro u oro-paladio, en un recubridor de oro por electro deposición (Figura 2.5 y 2.6).



Figura 2.8 Cámara de intercambio en la parte de alto vacío del microscopio electrónico marca Phillips modelo XL30, anclado en una plataforma móvil

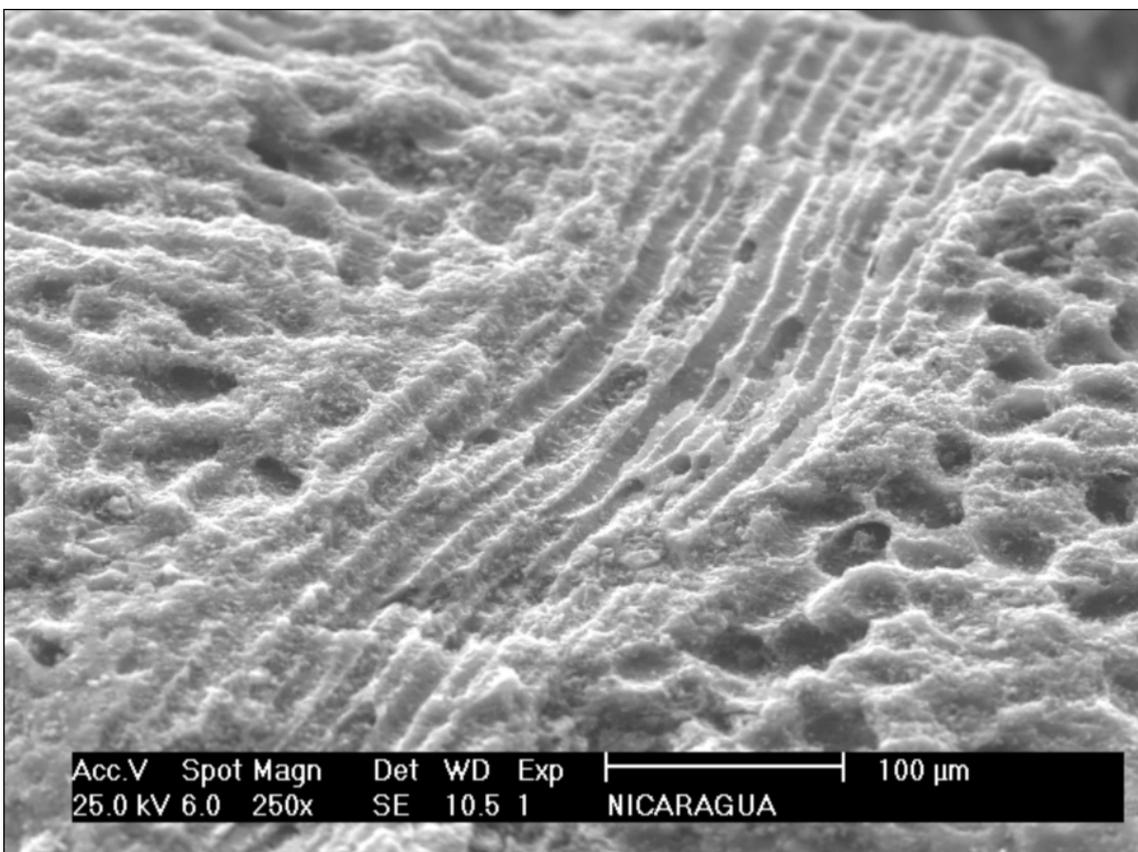
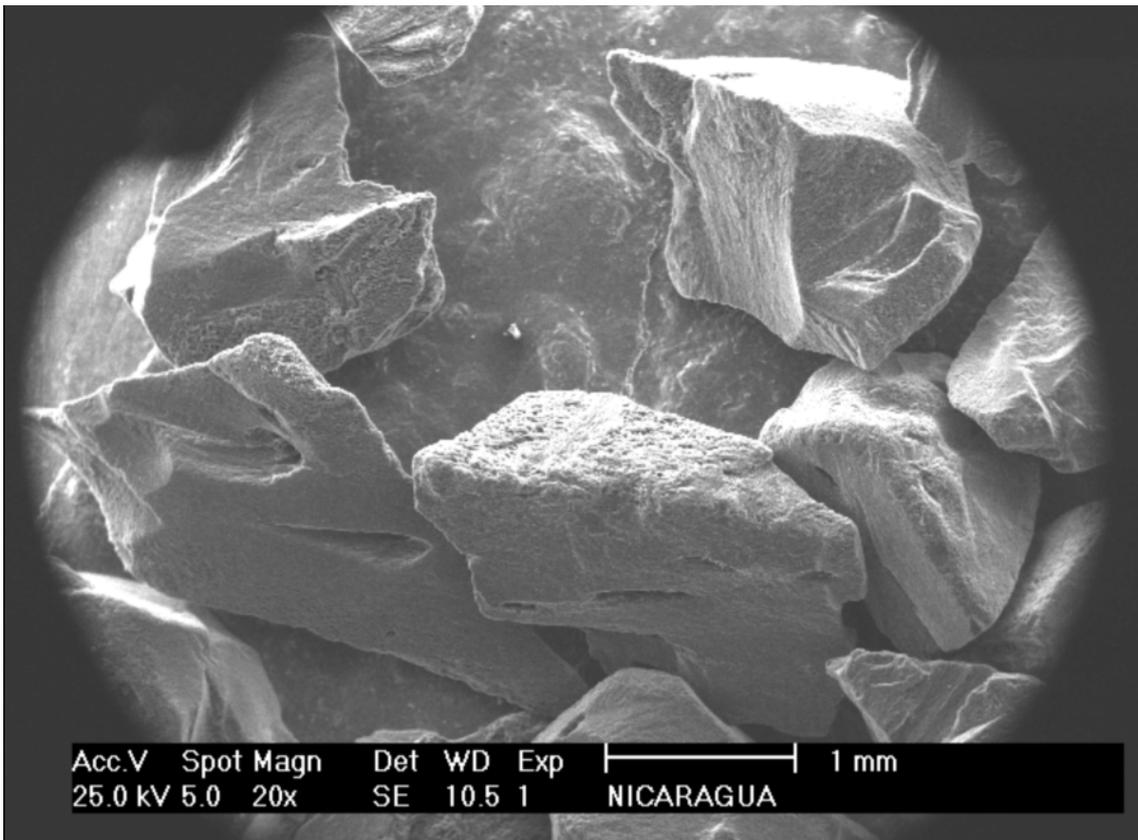
Cuando el flujo de electrones bombardea la muestra, los electrones secundarios son emitidos de la superficie del objeto con una cierta velocidad que es determinada por los niveles y ángulos en la superficie de la muestra.

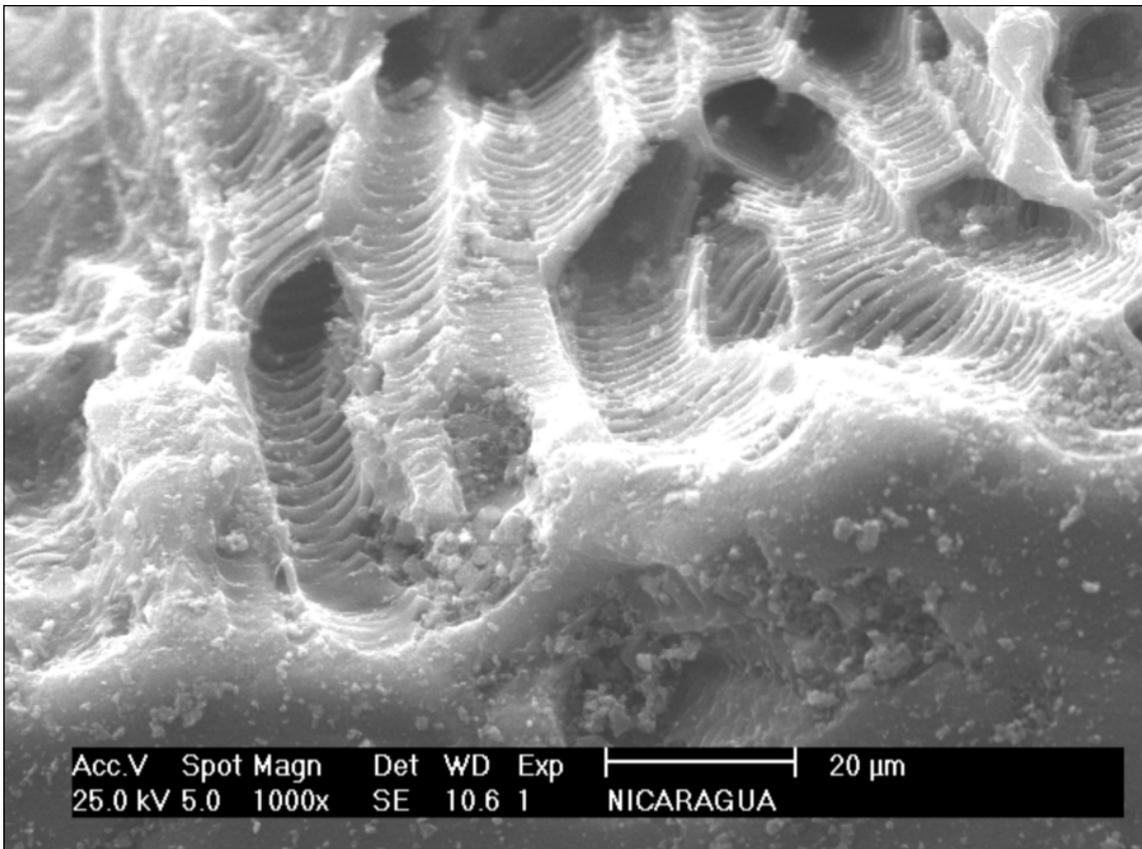
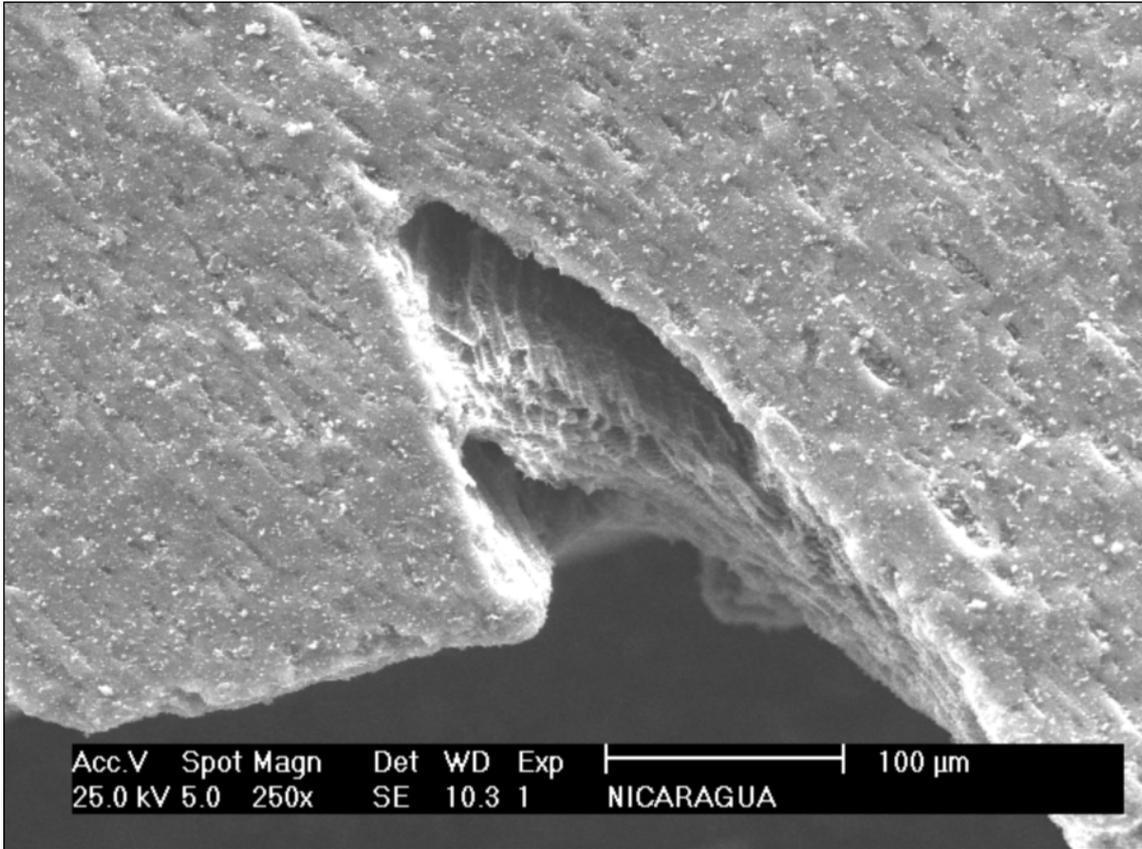
La ubicación e intensidad de iluminación reflejada, puede depender del haz secundario de electrones. La señal emitida por el detector es amplificada y transducida a una señal de video que es alimentada por un tubo de rayos cátodo en sincronía con el análisis del movimiento del haz de electrones finalmente las fotografías pueden ser observadas en un software de ambiente Windows. La Figura 2.9 muestra una vista del casco exterior del microscopio junto al procesador de datos.

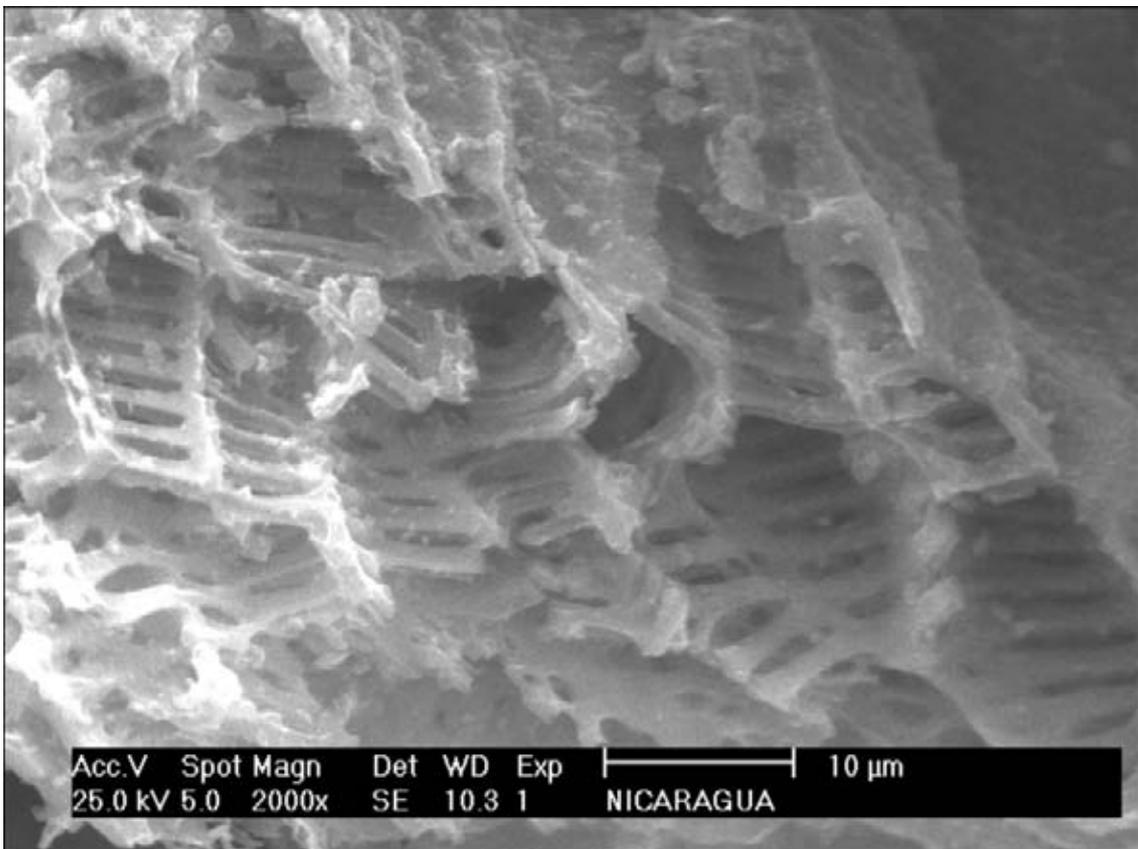
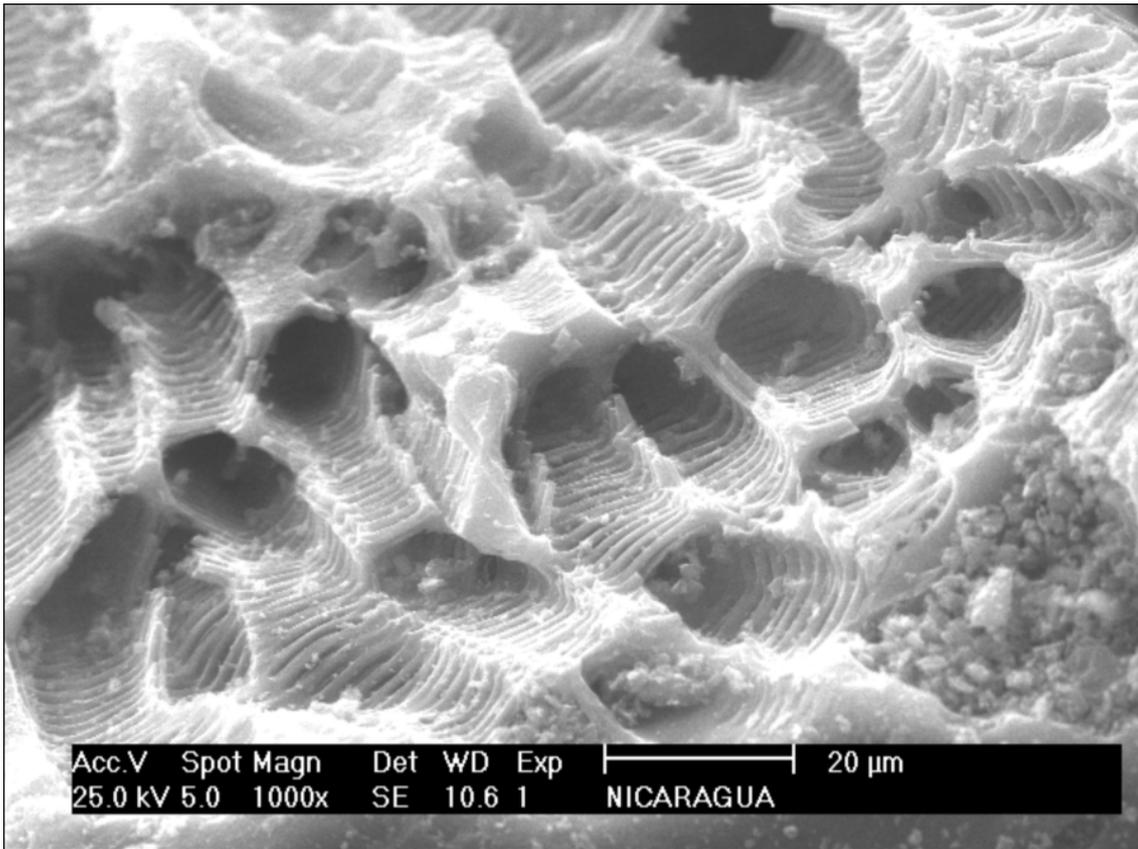


La Figura 2.9: Vista del casco exterior del microscopio electrónico de barrido (MEB) junto al procesador de datos

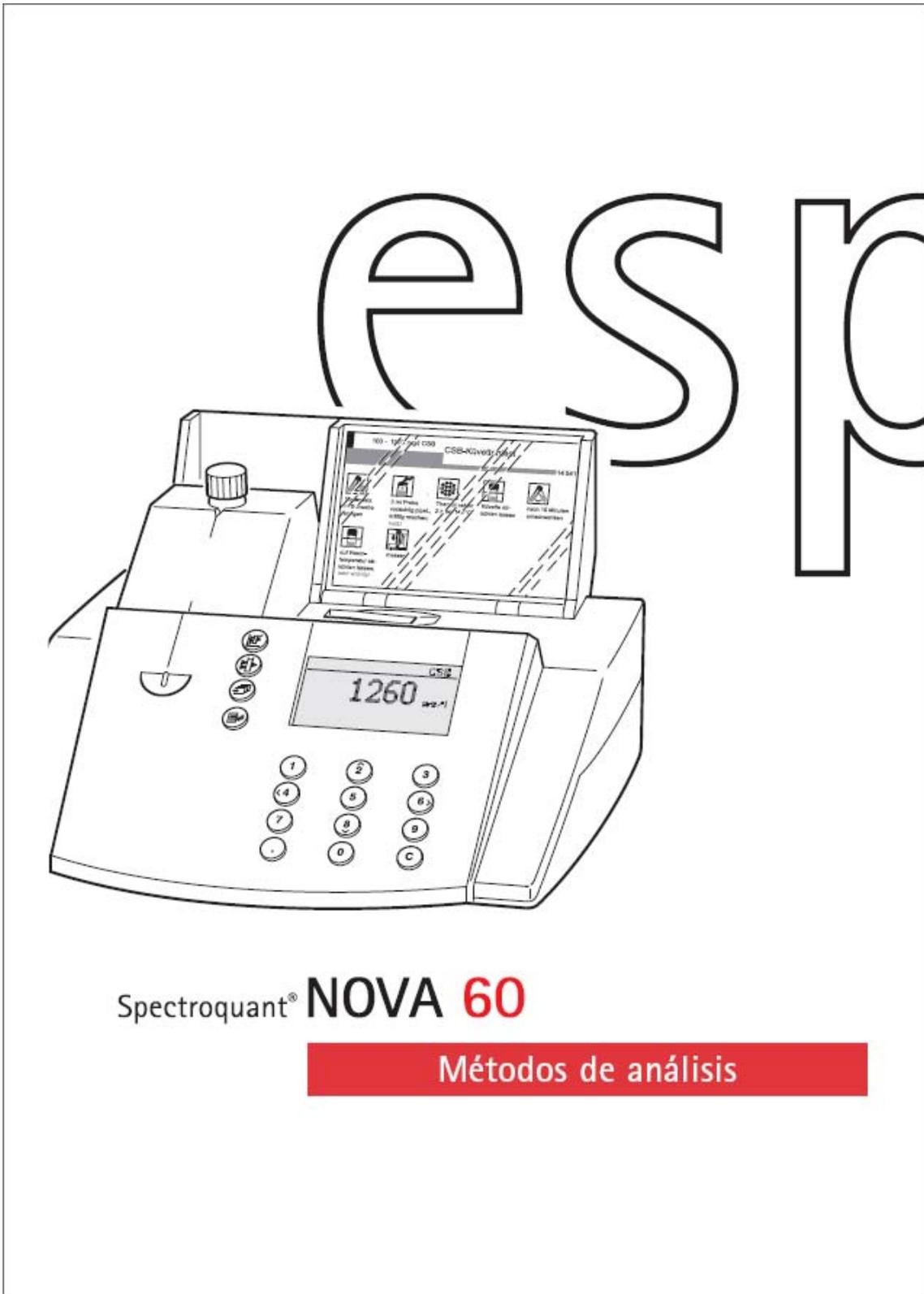
10.8 Vistas del carbón activado de la semilla de nancite con el microscopio electrónico de barrido







10.9 Espectrómetro NOVA 60 y sus Kits fotométricos de análisis



Kits fotométricos disponibles

Los siguientes métodos están programados en el fotómetro y las medidas pueden tomarse sin ningún tipo de ajuste, directamente. La selección del método se realiza a través del código de barras de las cubetas (para test en cubetas) o del AutoSelector (para test con reactivos). El número de método se indica en la

columna 1 y sólo se tiene que utilizar cuando se hace una selección manual. El intervalo total de medida se refiere a la forma de referencia indicada y en el caso de los test con reactivos, cubren todos los pasos ópticos disponibles (cubetas desde 10 hasta 50 mm).

Núm. del método	Kit de análisis (TC = test en cubetas)	Referencia	Intervalo total de medida	Método
048	Amonio	A5/25	0,20 – 8,00 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
013	DQO 160*	C1/25	15 – 160 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato
022	DQO 1500*	C2/25	25 – 1500 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromo(III)
049	Fosfatos totales 10	P4/25	0,05 – 1,50 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
050	Fosfatos totales 15	P5/25	0,3 – 15,0 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
029	Nitratos 50*	N1/25	0,5 – 23,0 mg/l de NO ₃ -N	2,6-Dimetilfenol
034	Nitritos 2*	N4/25	0,020 – 0,800 mg/l de NO ₂ -N	Reacción de Griess
191	TC Ácidos orgánicos volátiles	01763	50 – 3000 mg/l de HOAc	Esterificación
123	TC Alcohol	14985	0,40 – 5,00 g/l de C ₂ H ₅ OH	Reacción enzimática
043	Aluminio*	14525	0,020 – 1,20 mg/l de Al	Cromazurol S
104	TC Amonio*	14739	0,010 – 2,000 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
051	TC Amonio	14558	0,20 – 8,00 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
052	TC Amonio	14544	0,5 – 16,0 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
053	TC Amonio	14559	4,0 – 80,0 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
054	Amonio	14752	0,010 – 3,00 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
155	Amonio	00683	2,0 – 75,0 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
163	Amonio	00683	5 – 150 mg/l de NH ₄ -N	Azul de indofenol
156	TC AOX	00675	0,05 – 2,50 ml/ AOX	Oxidación / determinación como cloruro
132	Arsénico	01747	0,001 – 0,100 mg/l de As	Ag-DDTC
164	TC Boro*	00828	0,05 – 2,00 mg/l de B	Azometina H
046	Boro*	14839	0,050 – 0,800 mg/l de B	Rosocianina
146	Bromo*	00605	0,020 – 10,00 mg/l de Br ₂	S-DPD
067	TC Cadmio	14834	0,025 – 1,000 mg/l de Cd	Derivado del cadión
183	Cadmio	01745	0,002 – 0,500 mg/l de Cd	Derivado del cadión
165	TC Calcio*	00858	10 – 250 mg/l de Ca	Ftalaina-complexona
042	Calcio*	14815	5 – 160 mg/l de Ca	Gloxal-bis-hidroxianilo
125	Calcio sensitivo*	14815	1,0 – 15,0 mg/l de Ca	Gloxal-bis-hidroxianilo
190	TC Capacidad de ácido hasta pH 4,3 (alcalinidad total)	01762	0,20 – 8,00 mmol/l	Reacción del indicador
075	TC Cianuros* (cianuro libre)	14561	0,010 – 0,500 mg/l de CN	Ácido barbitúrico + ácido piridincarboxílico
075	TC Cianuros* (cianuro fácilmente liberable)	14561	0,010 – 0,500 mg/l de CN	Ácido cítrico / ácido barbitúrico + ácido piridincarboxílico
109	Cianuros* (cianuro libre)	09701	0,002 – 0,500 mg/l de CN	Ácido barbitúrico + ácido piridincarboxílico
109	Cianuros* (cianuro fácilmente liberable)	09701	0,002 – 0,500 mg/l de CN	Ácido cítrico / ácido barbitúrico + ácido piridincarboxílico
174	TC Zinc	00961	0,025 – 1,000 mg/l de Zn	PAR
074	TC Zinc	14566	0,20 – 5,00 mg/l de Zn	PAR
041	Zinc*	14832	0,05 – 2,50 mg/l de Zn	Cl-PAN
141	TC Cloro* (cloro libre)	00565	0,03 – 6,00 mg/l de Cl ₂	S-DPD
142	TC Cloro* (cloro libre + cloro total)	00567	0,03 – 6,00 mg/l de Cl ₂	S-DPD
143	Cloro* (cloro libre)	00568	0,010 – 6,00 mg/l de Cl ₂	S-DPD
145	Cloro* (cloro total)	00602	0,010 – 6,00 mg/l de Cl ₂	S-DPD
144	Cloro* (cloro libre + cloro total)	00569	0,010 – 6,00 mg/l de Cl ₂	S-DPD
095	TC Cloruros*	14730	5 – 125 mg/l de Cl	Hierro(III) tiocianato
110	Cloruros*	14897	2,5 – 25,0 mg/l de Cl	Hierro(III) tiocianato
063	Cloruros*	14897	10 – 250 mg/l de Cl	Hierro(III) tiocianato
026	TC Cobre*	14553	0,05 – 8,00 mg/l de Cu	Cuprizona
027	Cobre*	14767	0,02 – 8,00 mg/l de Cu	Cuprizona
015	Color*		0,5 – 60,0 m ⁻¹	Medición a 445 nm
061	Color*		0,5 – 60,0 m ⁻¹	Medición a 525 nm
078	Color*		0,5 – 50,0 m ⁻¹	Medición a 620 nm
032	Color Hazen*		0 – 500 Pt/Co (Hz)	Mét. con patrón platino-cobalt, 340 nm
179	Color Hazen*		0 – 1000 Pt/Co (Hz)	Mét. con patrón platino-cobalt, 445 nm
180	Color Hazen*		0 – 1000 Pt/Co (Hz)	Mét. con patrón platino-cobalt, 465 nm
181	Color Hazen*		0 – 1000 Pt/Co (Hz)	Mét. con patrón platino-cobalt, 485 nm
172	TC COT	14878	5,0 – 80,0 ml/l de COT	Oxidación peroxodisulfato / indicador
173	TC COT	14879	50 – 800 ml/l de COT	Oxidación con peroxodisulfato / indicador

Fecha de emisión 03/05

Kits fotométricos disponibles

Núm. del método	Kit de análisis (TC = test en cubetas)	Referencia	Intervalo total de medida	Método
039	TC Cromatos*	14552	0,05 – 2,00 mg/l de Cr	Difenilcarbazida
039	TC Cromatos* (cromo total)	14552	0,05 – 2,00 mg/l de Cr	Oxidación con peroxodisulfato / difenilcarbazida
040	Cromatos*	14758	0,010 – 3,00 mg/l de Cr	Difenilcarbazida
157	TC DBO*	00687	0,5 – 3000 mg/l de O ₂	Método de Winkler modificado
149	Dióxido de cloro*	00608	0,020 – 10,00 mg/l de ClO ₂	S-DPD
031	TC DQO*	14560	4,0 – 40,0 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato
014	TC DQO*	14540	10 – 150 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato
105	TC DQO*	14895	15 – 300 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato
093	TC DQO*	14690	50 – 500 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato
023	TC DQO*	14541	25 – 1500 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato(III)
094	TC DQO*	14691	300 – 3500 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato(III)
024	TC DQO*	14555	500 – 10000 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato(III)
137	TC DQO* (exento Hg)	09772	10 – 150 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato
138	TC DQO* (exento Hg)	09773	100 – 1500 mg/l de DQO	Oxidación con ácido cromosulfúrico / determinación como cromato(III)
178	TC Dureza total*	00661	5 – 215 mg/l de Ca	Ftaleína-complexona
100	TC Estaño*	14822	0,10 – 2,50 mg/l de Sn	Violeta de pirocatquina
073	TC Fenol*	14551	0,10 – 2,50 mg/l de C ₆ H ₅ OH	MBTH
176	TC Fenol*	00856	0,025 – 5,00 mg/l de C ₆ H ₅ OH	Aminoantipirina
177	TC Fenol*	00856	0,002 – 0,200 mg/l de C ₆ H ₅ OH	Aminoantipirina
076	TC Fluoruros*	14557	0,10 – 1,50 mg/l de F	Alizarina-complexona
124	TC Fluoruros sensitivo	14557	0,025 – 0,500 mg/l de F	Alizarina-complexona
166	Fluoruros*	14598	0,10 – 2,00 mg/l de F	Alizarina-complexona
167	Fluoruros*	14598	1,0 – 20,0 mg/l de F	Alizarina-complexona
028	TC Formaldehído*	14500	0,10 – 8,00 mg/l de HCHO	Ácido cromotrópico
091	Formaldehído*	14678	0,02 – 8,00 mg/l de HCHO	Ácido cromotrópico
055	TC Fosfatos	14543	0,05 – 5,00 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
065	TC Fosfatos (fósforo total)	14543	0,05 – 5,00 mg/l de P	Disgregación / Azul de fosfomolibdeno
086	TC Fosfatos	14729	0,5 – 25,0 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
086	TC Fosfatos (fósforo total)	14729	0,5 – 25,0 mg/l de P	Disgregación / Azul de fosfomolibdeno
152	TC Fosfatos	00616	3,0 – 100,0 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
056	Fosfatos	14848	0,010 – 5,00 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
162	Fosfatos	00798	1,0 – 100,0 mg/l de PO ₄ -P	Azul de fosfomolibdeno
069	TC Fosfatos*	14546	0,5 – 25,0 mg/l de PO ₄ -P	Vanadatamolibdato
070	Fosfatos*	14842	0,5 – 30,0 mg/l de PO ₄ -P	Vanadatamolibdato
044	Hidracina*	09711	0,005 – 2,00 mg/l de N ₂ H ₄	4-Dimetilaminobenzaldehído
037	TC Hierro	14549	0,05 – 4,00 mg/l de Fe	Triazina
106	TC Hierro*	14896	1,0 – 50,0 mg/l de Fe (Fe(II) y Fe(III))	2,2'-Bipiridina
038	Hierro	14761	0,005 – 5,00 mg/l de Fe (Fe(II) y Fe(III))	Triazina
161	Hierro*	00796	0,010 – 5,00 mg/l de Fe (Fe(II) y Fe(III))	1,10-Fenantrolina
033	Índice de color de yodo*		0,010 – 3,00	Medición a 340 nm
021	Índice de color de yodo*		0,2 – 50,0	Medición a 445 nm
158	TC Magnesio*	00815	5,0 – 75,0 mg/l de Mg	Ftaleína-complexona
159	TC Manganeso*	00816	0,10 – 5,00 mg/l de Mn	Formaldoxima
184	Manganeso	01739	0,005 – 2,00 mg/l de Mn	PAN
019	Manganeso*	14770	0,010 – 10,00 mg/l de Mn	Formaldoxima
175	TC Molibdeno	00860	0,02 – 1,00 mg/l de Mo	Rojo de bromopirgalol
185	Monocloramina	01632	0,050 – 10,00 mg/l de Cl ₂	Azul de indofenol
017	TC Niquel*	14554	0,10 – 6,00 mg/l de Ni	Dimetilgloxima
018	Niquel*	14785	0,02 – 5,00 mg/l de Ni	Dimetilgloxima
059	TC Nitratos*	14542	0,5 – 18,0 mg/l de NO ₃ -N	Nitrospectral
030	TC Nitratos*	14563	0,5 – 25,0 mg/l de NO ₃ -N	2,6-Dimetilfenol
107	TC Nitratos*	14784	1,0 – 50,0 mg/l de NO ₃ -N	2,6-Dimetilfenol
151	TC Nitratos*	00614	23 – 225 mg/l de NO ₃ -N	2,6-Dimetilfenol
060	Nitratos*	14773	0,2 – 20,0 mg/l de NO ₃ -N	Nitrospectral
139	Nitratos*	09713	0,10 – 25,0 mg/l de NO ₃ -N	2,6-Dimetilfenol
072	TC Nitratos* (en agua de mar)	14556	0,10 – 3,00 mg/l de NO ₃ -N	Resorcina
140	Nitratos* (en agua de mar)	14942	0,2 – 17,0 mg/l de NO ₃ -N	Resorcina
035	TC Nitritos*	14547	0,010 – 0,700 mg/l de NO ₂ -N	Reacción de Griess
036	Nitritos*	14776	0,002 – 1,00 mg/l de NO ₂ -N	Reacción de Griess
068	TC Nitrógeno total	14537	0,5 – 15,0 mg/l de N	Oxid. con peroxodisulfato / Nitrospectral
153	TC Nitrógeno total	00613	0,5 – 15,0 mg/l de N	Oxidación con peroxodisulfato / 2,6-Dimetilfenol

Fecha de emisión 03/05

Kits fotométricos disponibles

Núm. del método	Kit de análisis (TC = test en cubetas)	Referencia	Intervalo total de medida	Método
108	TC Nitrogeno (total)	14763	10 – 150 mg/l de N	Oxidación con peroxodisulfato / 2,6-Dimetilfenol
046	Oro	14821	0,5 – 12,0 mg/l de Au	Rodamina B
092	TC Oxígeno*	14894	0,5 – 12,0 mg/l de O ₂	Método Winkler modificado
148	Ozono*	00607	0,010 – 4,00 mg/l de O ₃	S-DPD
069	TC Peroxido de hidrógeno*	14731	2,0 – 20,0 mg/l de H ₂ O ₂	Sulfato titanilo
128	TC Peroxido de hidrógeno sens.*	14731	0,25 – 5,00 mg/l de H ₂ O ₂	Sulfato titanilo
186	TC pH*	01744	6,4 – 8,8	Rojo de fenol
047	Plata*	14831	0,25 – 3,00 mg/l de Ag	Eosina / 1,10-Fenantrolina
066	TC Plomo*	14833	0,10 – 5,00 mg/l de Pb	PAR
160	Plomo*	08717	0,010 – 5,00 mg/l de Pb	PAR
103	TC Potasio	14562	5,0 – 50,0 mg/l de K	Kalognost, turbidimétrico
150	TC Potasio	00615	30 – 300 mg/l de K	Kalognost, turbidimétrico
079	Silicatos (ácido silícico)	14794	0,05 – 5,00 mg/l de Si	Azul de silicomolibdeno
081	Silicatos (ácido silícico)	14794	0,005 – 0,750 mg/l de Si	Azul de silicomolibdeno
169	Silicatos (ácido silícico)	00857	0,5 – 50,0 mg/l de Si	Silicomolibdato
071	Silicatos (ácido silícico)	00857	5 – 500 mg/l de Si	Silicomolibdato
168	TC Sodio	00885	10 – 300 mg/l de Na	como cloruro
064	TC Sulfatos	14548	5 – 250 mg/l de SO ₄	Sulfato de bario, turbidimétrico
154	TC Sulfatos	00617	50 – 500 mg/l de SO ₄	Sulfato de bario, turbidimétrico
082	TC Sulfatos	14584	100 – 1000 mg/l de SO ₄	Sulfato de bario, turbidimétrico
065	Sulfatos*	14791	25 – 300 mg/l de SO ₄	Tanino
071	TC Sulfitos*	14394	1,0 – 20,0 mg/l de SO ₃	Reactivo de Ellman
127	TC Sulfitos sensitivo*	14394	0,05 – 3,00 mg/l de SO ₃	Reactivo de Ellman
187	Sulfitos*	01746	1,0 – 60,0 mg/l de SO ₃	Reactivo de Ellman
080	Sulfuros*	14779	0,020 – 1,50 mg/l de S	Dimetil-p-fenilendiamina
182	Sustancias sólidas en suspensión		25 – 750 mg/l de SusS	
087	TC Tensioactivos (aniónicos)	14667	0,05 – 2,00 mg/l de MBAS	Azul de metileno
192	TC Tensioactivos (catiónicos)	01764	0,05 – 1,50 mg/l de k-Ten	Azul de disulfina
193	TC Tensioactivos (no iónicos)	01787	0,010 – 7,50 mg/l de n-Ten	TBPE
077	Turbidez		1 – 100 FAU	Medición a 550 nm
147	Yodo*	00606	0,050 – 10,00 mg/l de I ₂	S-DPD
083	Cobre baños		2,0 – 80,0 g/l de Cu	Coloración propia
020	Cromo baños		4,0 – 400 g/l de CrO ₃	Coloración propia
057	Níquel baños		2,0 – 120 g/l de Ni	Coloración propia
130	Antimonio		0,10 – 8,00 mg/l de Sb	Verde brillante
135	Mercurio		0,025 – 1,000 mg/l de Hg	Cetona de Michler
133	Paladio		0,05 – 1,25 mg/l de Pd	Thiocetona de Michler
134	Platino		0,10 – 1,25 mg/l de Pt	o-Fenilendiamina

* Es posible corrección de turbidez

10.10 Normas CAPRE sobre la calidad de agua para consumo humano

CUADRO 5. PARAMETROS PARA SUSTANCIAS INORGANICAS SIGNIFICADO PARA LA SALUD

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR RECOMENDADO	VALOR MAXIMO ADMISIBLE
Arsénico	mg/L		0.01
Cadmio	mg/L		0.05*
Cianuro	mg/L		0.05
Cromo	mg/L		0.05
Mercurio	mg/L		0.001
Níquel	mg/L	0.02	0.05
Plomo	mg/L	0.01	0.01
Antimonio	mg/L	0.05	0.05
Selenio	mg/L	0.01	0.01

* Valor bastante conservador

