



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

**“ADSORCIÓN DE FLÚOR EN AGUAS SUBTERRÁNEAS
UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO DE LA CASCARILLA DE
ARROZ”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

QUÍMICO

AUTOR: LUIS AMADO GUAIÑA REMACHE

DIRECTOR: Ing. CARLOS MEDINA SERRANO MsC

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Luis Amado Guaiña Remache

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, LUIS AMADO GUAÍÑA REMACHE, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

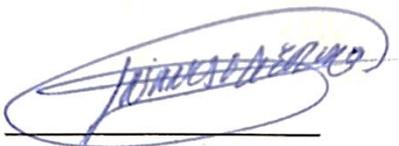
Riobamba, 24 de febrero del 2022



Luis Amado Guaiña Remache
060394539-5

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, “**ADSORCIÓN DE FLÚOR EN AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO DE LA CASCARILLA DE ARROZ**”, realizado por el señor: **LUIS AMADO GUAÍÑA REMACHE**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dra. Nancy Cecilia Veloz Mayorga, PhD PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-06-30
Ing. Carlos Alcibar Medina Serrano, MsC DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022-06-30
Ing. María Rafaela Viteri Uzcategui, MsC MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022-06-30

DEDICATORIA

El presente proyecto de investigación se la dedico a Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mis padres: Luis y Amelia quienes con su amor, paciencia y esfuerzo sembraron en mí las ganas de cumplir metas y fantasías. A mi fuente de inspiración, Aracely, por compartir su tiempo y ser complemento de vida. Al movimiento 24 horas de Alcohólicos Anónimos “GRUPO CHIMBORAZO” por enseñarme a vivir “solo por hoy”, por regalarme la paz y la tranquilidad de la mano de un poder superior.

Luis

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por todas sus bendiciones del día a día, a mis padres y hermanos por ser apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad. A compañeros pasajeros y permanentes de clase quienes hicieron que las experiencias de vida se conviertan en anécdotas. También quiero agradecer a los docentes de la carrera de Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haber compartido sus conocimientos y experiencias, de manera especial al Ingeniero Carlos Medina, tutor de este proyecto de investigación, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me orientó a culminar este trabajo con los mejores resultados posibles. Así mismo deseo expresar mis agradecimientos a los moradores de la comunidad Jesús del Gran Poder por su valioso aporte para esta investigación.

Luis

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5
1.1. Antecedentes de la Investigación.....	5
1.2. Agua Subterránea.....	5
1.2.1. <i>Calidad del Agua Subterránea</i>	6
1.3. Flúor.....	9
1.3.1. <i>Flúor y Contaminación en Aguas Subterráneas</i>	9
1.3.2. <i>Efectos por Ingestión de Flúor</i>	9
1.3.3. <i>Métodos de Remoción de Flúor</i>	11
1.3.3.1. <i>Métodos de remoción de alto costo</i>	11
1.3.3.2. <i>Métodos de remoción de bajo costo</i>	11
1.4. Cascarilla de Arroz.....	12
1.4.1. <i>Composición Química y Propiedades</i>	13
1.5. Carbón Activado.....	14
1.5.1. <i>Composición química</i>	15
1.5.2. <i>Estructura física</i>	15
1.5.3. <i>Propiedades del carbón activado</i>	16
1.5.4. <i>Tipos de carbón activado</i>	16
1.6. Métodos de Activación	18
1.6.1. <i>Activación Física</i>	18
1.6.2. <i>Activación Química</i>	19
1.6.2.1. <i>Activación utilizando ácido fosfórico</i>	20
1.7. Adsorción.....	20

1.7.1.	<i>Tipos de adsorción</i>	21
1.7.1.1.	<i>Adsorción Física</i>	21
1.7.1.2.	<i>Adsorción Química</i>	22
1.7.2.	<i>Isotermas de adsorción</i>	22
1.7.2.1.	<i>Isoterma de adsorción de Langmuir</i>	22
1.7.2.2.	<i>Isoterma de adsorción de Freundlich</i>	23
1.7.3.	<i>Factores que influyen en la capacidad de adsorción</i>	24

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	25
2.1.	Diseño de la Investigación	25
2.1.1.	<i>Localización de estudio</i>	25
2.1.2.	<i>Unidad de análisis</i>	25
2.1.3.	<i>Población de estudio</i>	25
2.1.4.	<i>Selección de la muestra</i>	26
2.1.4.1.	<i>Muestreo</i>	26
2.1.4.2.	<i>Métodos y Materiales</i>	26
2.1.4.3.	<i>Toma de muestra</i>	27
2.1.4.4.	<i>Transporte de la muestra</i>	27
2.1.4.5.	<i>Análisis fisicoquímico del agua</i>	27
2.2.	Parte Experimental	28
2.2.1.	<i>Acondicionamiento de la Materia Prima</i>	28
2.2.2.	<i>Caracterización de la Materia Prima</i>	28
2.2.2.1.	<i>Contenido de humedad</i>	28
2.2.2.2.	<i>Contenido de cenizas</i>	28
2.2.2.3.	<i>Contenido de materias volátiles</i>	29
2.2.2.4.	<i>Carbón fijo</i>	30
2.2.3.	<i>Síntesis de Carbón Activado</i>	30
2.2.3.1.	<i>Obtención del Carbón de la Cascarilla de Arroz</i>	30
2.2.3.2.	<i>Preparación de la solución de Ácido Fosfórico</i>	30
2.2.3.3.	<i>Activación del Carbón de la Cascarilla de Arroz</i>	31
2.2.3.4.	<i>Rendimiento del Carbón Activado</i>	31
2.2.3.5.	<i>Procedimiento elaboración del filtro</i>	32
2.2.3.6.	<i>Evaluación de Adsorción de Flúor</i>	32
2.2.4.	<i>Caracterización de Carbón Activado</i>	32

2.2.4.1.	<i>Espectroscopia Infrarrojo con Transformada de Fourier</i>	33
2.2.4.2.	<i>Microscopia Electrónica de Barrido</i>	33
2.2.4.3.	<i>Análisis BET</i>	33
2.3.	Diseño Experimental	34

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
3.1.	Caracterización de Materia Prima	35
3.2.	Caracterización de Carbón Activado	36
3.2.1.	<i>Rendimiento del Carbón Activado</i>	36
3.2.2.	<i>Análisis fisicoquímicos</i>	37
3.2.3.	<i>Análisis de espectroscopia FT-IR</i>	38
3.2.3.1.	<i>Espectro FT-IR de la Cascarilla de Arroz (CCA)</i>	38
3.2.3.2.	<i>Espectro FT-IR de la Cascarilla de Arroz</i>	39
3.2.3.3.	<i>Espectro FT-IR del Carbón Activado (CA) al 65%</i>	39
3.2.3.4.	<i>Espectro FT-IR del Carbón Activado (CA) al 75%</i>	40
3.2.3.5.	<i>Espectro FT-IR del Carbón Activado (CA) al 85%</i>	41
3.2.4.	<i>Análisis de microscopia SEM</i>	41
3.2.5.	<i>Análisis BET</i>	45
3.3.	Evaluación de la Adsorción de Flúor (F⁻)	46
3.3.1.	<i>Análisis de Varianza ANOVA para la Adsorción de Flúor</i>	48
3.3.2.	<i>Optimización de la concentración y masa para la adsorción de flúor</i>	51
3.3.3.	<i>Isotermas de Adsorción de Langmuir y Freundlich</i>	52
	CONCLUSIONES	57
	RECOMENDACIONES	58
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Requisitos Físicos y Químicos del Agua Potable	8
Tabla 2-1.	Composición Química de la Cascarilla de Arroz.....	13
Tabla 3-1.	Composición Elemental de la Cascarilla de Arroz	13
Tabla 1-2.	Preparación de Ácido Fosfórico (H_3PO_4)	31
Tabla 2-2.	Base del Diseño Experimental para la Adsorción de Flúor	34
Tabla 1-3.	Análisis Próximo de la Cascarilla de Arroz (CCA)	35
Tabla 2-3.	Análisis Fisicoquímico del Carbón Activado (CA).....	37
Tabla 3-3.	Radio de los poros del CA al 65%	42
Tabla 4-3.	Radio de los poros del CA al 75%	43
Tabla 5-3.	Radio de los poros del CA al 85%	45
Tabla 6-3.	Referencias del Área Superficial BET para CA de Cascarilla de Arroz.....	46
Tabla 7-3.	Prueba de laboratorio para la Adsorción de Flúor	47
Tabla 8-3.	Prueba de campo para la Adsorción de Flúor	47
Tabla 9-3.	Análisis de Varianza ANOVA para la Adsorción de Flúor	48
Tabla 10-3.	Coefficiente de Regresión para la Adsorción de Flúor	50
Tabla 11-3.	Respuesta de Optimización para la Adsorción de Flúor	51
Tabla 12-3.	Variación de la capacidad de adsorción de Flúor en función a la concentración de H_3PO_4 y masa de CA – Isoterma de Langmuir.....	53
Tabla 13-3.	Variación de la capacidad de adsorción de Flúor en función a la concentración de H_3PO_4 y masa de CA – Isoterma de Freundlich	54
Tabla 14-3.	Parámetros de las Isotermas de Langmuir y Freundlich para la Adsorción de Flúor a diferentes concentraciones de H_3PO_4	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Agua subterránea como parte del ciclo hidrológico	6
Figura 2-1. Carióspside de arroz y sus estructuras	12
Figura 3-1. Arreglo estructural de las capas planas de grafito	14
Figura 4-1. Estructura de las capas de carbón activado	15
Figura 5-1. Grupos funcionales presentes en la superficie de carbón activado	16
Figura 6-1. Tipos de carbón activado de acuerdo con el tamaño de los poros.....	17
Figura 7-1. Tipos de carbón activado de acuerdo con el tamaño de las partículas	18
Figura 8-1. Proceso de activación térmica del carbón	19
Figura 9-1. Procedimiento general para activación química del carbón	20
Figura 10-1. Etapas de adsorción de carbón activado.....	21
Figura 1-2. Comunidad Jesús del Gran Poder	25
Figura 2-2. Puntos de muestreo.....	26
Figura 1-3. Rendimiento del Carbón Activado (CA)	36
Figura 2-3. Espectro Infrarrojo de la Cascarilla de Arroz (CCA).....	38
Figura 3-3. Espectro Infrarrojo de la Ceniza de Cascarilla de Arroz.....	39
Figura 4-3. Espectro Infrarrojo del Carbón Activado (CA) al 65%	39
Figura 5-3. Espectro Infrarrojo del Carbón Activado (CA) al 75%	40
Figura 6-3. Espectro Infrarrojo del Carbón Activado (CA) al 85%	41
Figura 7-3. Micrografía SEM del Carbón Activado (CA) al 65% a) 1x120, b) 1x500, c) 1x2000	42
Figura 8-3. Micrografía SEM del Carbón Activado (CA) al 75% a) 1x500, b) 1x1400, c)1x2000	43
Figura 9-3. Micrografía SEM del Carbón Activado (CA) al 85% a) 1x500, b) 1x1100, c)1x2000	44
Figura 10-3. Isotermas de adsorción con N ₂ a 77 K de los carbones activados	46

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3. Efectos principales del CA en la adsorción de Flúor.....	49
Gráfico 2-3. Gráfico de Pareto sobre los efectos principales del CA en la adsorción de Flúor	50
Gráfico3-3. Superficies de respuesta estimadas para los efectos interactivos Masa vs Concentración de H ₃ PO ₄	52
Gráfico 4-3. Ajuste de datos al modelo de Isotherma de Adsorción de Langmuir	55
Gráfico 5-3. Ajuste de datos al modelo de Isotherma de Adsorción de Freundlich.....	55

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1: Modelo de Langmuir	23
Ecuación 2-1: Modelo de Freundlich.....	23
Ecuación 3-1: Modelo logarítmico de Freundlich	24
Ecuación 1-2: Contenido de Cenizas	29
Ecuación 2-2. Contenido de Materias Volátiles.....	29
Ecuación 3-2: Dilución de soluciones.....	30
Ecuación 4-2. Porcentaje de Rendimiento	31

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE ANÁLISIS DE LIXIVIADOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE
LA COMUNIDAD JESÚS DEL GRAN PODER

ANEXO B: INFORME DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS BET

ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA (CASCARILLA DE ARROZ)

ANEXO D: SÍNTESIS DE CARBÓN ACTIVADO

ANEXO E: CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

ANEXO F: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA

ANEXO G: EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE FLÚOR

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue la obtención de carbón activado a partir de la cascarilla de arroz para la adsorción de flúor en aguas subterráneas de la comunidad Jesús del Gran Poder perteneciente al cantón Guano provincia de Chimborazo. La síntesis del adsorbente se realizó mediante activación química utilizando ácido fosfórico a tres diferentes concentraciones: 65%, 75% y 85%. Los carbones activados sintetizados se caracterizaron mediante análisis instrumentales que comprendieron la espectroscopia infrarroja transformada de Fourier, microscopia electrónica de barrido y análisis del área superficial permitiendo determinar las características físicas del adsorbente. Para la evaluación de la adsorción se realizó un diseño factorial multinivel de 27 repeticiones y dos variables experimentales: concentración del agente activante y masa del carbón activado. Para ejecutar la experimentación se elaboraron filtros utilizando 2, 6 y 10 gramos de adsorbente en donde se vertió el agua recolectada de la comunidad con una concentración inicial de 1,99 ppm para luego medir la concentración final de flúor y así evaluar su eficiencia mediante las isothermas de Freundlich y Langmuir. El carbón sintetizado al 85% presentó un área superficial de 780,0 m²/g y una estructura homogénea constituida por mesoporos (60%) y microporos (40%) necesarios para la remoción de iones flúor. En base a los coeficientes de regresión R² (0,9463) se determinó que el proceso de adsorción se ajustó al modelo de Langmuir, desarrollándose en una superficie homogénea en una sola capa, removiendo hasta un 69,35% de iones flúor. En síntesis, la adsorción de flúor se optimizó utilizando ácido fosfórico al 83,7% y 7,5 gramos de carbón activado para mantener la concentración de flúor por debajo del parámetro de calidad 1,5 ppm. Se recomienda investigar métodos de post-tratamiento químico en el carbón activado con la finalidad de desarrollar grupos funcionales específicos que favorezcan la remoción de flúor.

Palabras clave: <ACTIVACIÓN QUÍMICA>, <AGENTE ACTIVANTE>, <REMOCIÓN>, <PIROLISIS>, <ISOTERMAS DE ADSORCIÓN>

The image shows a handwritten signature in blue ink on the left and an official circular stamp on the right. The stamp contains the text 'ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO' around the perimeter and 'UNIDAD DOCUMENTAL' at the bottom. In the center of the stamp is a small emblem or logo.

1534-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

The purpose of this research was to obtain activated carbon from rice husk for the adsorption of fluoride in groundwater of the Jesús del Gran Poder community belonging to Guano city, province of Chimborazo. The synthesis of the adsorbent was performed by chemical activation using phosphoric acid at three different concentrations: 65%, 75% and 85%. The synthesized activated carbons were characterized by instrumental analyses that included Fourier transformed infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and surface area analysis allowing to determine the physical characteristics of the adsorbent. For the evaluation of adsorption, a multilevel factorial design of 27 repetitions and two experimental variables were carried out: concentration of the activating agent and mass of the activated carbon. Doing the experimentation, filters were elaborated using 2, 6 and 10 grams of adsorbent where the water collected from the community was poured with an initial concentration of 1.99 ppm then measure the final concentration of fluoride and evaluate its efficiency by means of the Freundlich and Langmuir isotherms. The carbon synthesized at 85% presented a surface area of 780.0 m²/g and a homogeneous structure consisting of mesopores (60%) and micropores (40%) necessary for the removal of fluorine ions. Based on the regression coefficients R² (0.9463) it was determined that the adsorption process was adjusted to the Langmuir model, developing on a homogeneous surface in a single layer, removing up to 69.35% of fluorine ions. In summary, fluoride adsorption was optimized using 83.7% phosphoric acid and 7.5 grams of activated carbon to keep the fluoride concentration below the 1.5 ppm quality parameter. It is recommended to investigate methods of chemical aftertreatment in activated carbon in order to develop specific functional groups that favor the removal of fluoride.

Keywords: <CHEMICAL ACTIVATION>, <ACTIVATING AGENT>, <REMOVAL>, <PYROLYSIS>, <ADSORPTION ISOTHERMS>



Lic. Edison Renato Ruiz López

CI: 060395704-4

INTRODUCCIÓN

El consumo de agua en el mundo es de 1386 millones de $\text{Km}^3/\text{año}$, de estos el 97,5% es agua salada, el 2,5% (35 millones de km^3) es agua dulce; de esta cantidad, el 30% del agua son subterráneas distribuidas en fuentes de aguas y manantiales no protegidos (CNA 2011, p. 115).

En Ecuador, el volumen de agua consumida se acerca a los 414'000 173 $\text{m}^3/\text{año}$, de los cuales el 28,9%, corresponde a la explotación de fuentes subterráneas mismas que se caracterizan por presentar valores de pH que varían entre 6,5-8,5 y constituyentes químicos que se encuentran en menor concentración, como: S^{-2} , Br^- , I^- , PO_4^{-3} , BO^{-3} , F^- , Fe^{-2} , Mn^{+2} , Zn^{+2} . Sin embargo, estos constituyentes químicos pueden sobrepasar los criterios de calidad para agua de consumo humano (López 2018).

El flúor tiene efectos tanto benéficos como perjudiciales para la salud humana (Boischio 2003) y se encuentra propagado en el medio ambiente; por lo tanto, es probable que contengan al menos una pequeña cantidad de flúor (OMS 2002, p. 53). La reacción del flúor con el agua da lugar a la formación de fluoruro de hidrógeno y oxígeno, así como peróxido de hidrógeno y difluoruro de oxígeno en cantidades menores (ATSDR 2014, p. 3).

Aunque el flúor se encuentra naturalmente en las fuentes de agua, las concentraciones elevadas pueden ocasionar alteraciones en el sistema inmunológico, daños genéticos, cáncer, disfunción tiroidea, fluorosis dental clínica y fluorosis esquelética (OMS 2002, pp. 6-7). Entidades reguladoras nacionales e internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) establecen que el límite permisible de flúor en el agua potable no supere los 1,5 mg/L.

La preocupación por disminuir la concentración de flúor en aguas subterráneas se ha dispuesto en realizar estudios de remoción utilizando técnicas de adsorción con materiales de fácil adquisición (Trejo and Hernández 2004, p. 2). La eficiencia y la viabilidad del método dependerá del costo y de la accesibilidad a la materia prima adquirida en el mercado local (Trejo and Hernández 2004, p. 3).

La cascarilla de arroz posee buenas propiedades adsorbentes debido a su alto contenido de sílice y la activación del carbón obtenido de este residuo vegetal ha demostrado ser un eficiente removedor de elementos tóxicos como flúor y del arsénico (Ghosh, Chatterjee and Ganguly 2014, p. 187).

El carbón activado al someterlo a un tratamiento físico o químico incrementa la porosidad, superficie interna y el contenido superficial de grupos químicos como el oxígeno y el nitrógeno que le confieren gran capacidad de adsorción de moléculas consideradas contaminantes (Pereira, Cedeño and Romerosa 2017, p. 771).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La OMS señala que 844 millones de personas carecen de un servicio básico de suministro de agua potable, cifra que incluye a 159 millones de personas que dependen de aguas superficiales.

En la provincia de Chimborazo, en los cantones de Riobamba y Guano existe un total de 37 fuentes de agua de las cuales 22 (59,5%) se encuentran en operación (Reino 2013, p. 103). Las fuentes que abastecen a la comunidad Jesús del Gran Poder perteneciente al cantón Guano suministra un caudal promedio de 36 L/minuto y es empleada principalmente para consumo doméstico.

El agua es considerada como fuente principal de flúor (Boischio 2003), el consumo prolongado en concentraciones superiores a 1,5 mg/L es la principal causa de fluorosis dental y esquelética, trastornos gastrointestinales y disfunción renal (Vázquez and Bonilla 2001, p. 108). Esta problemática ha generado el desarrollo de normas que regulan la cantidad de estos iones especificando la concentración máxima permisible que debe contener el agua para consumo humano. Es así como, en Ecuador la INEN establece una concentración máxima de 1,5 mg/L para el agua de consumo humano (INEN 2014, p. 2).

La fuente de agua de la comunidad Jesús del Gran Poder presenta una concentración de flúor superior a los 1,9 mg/L representando una problemática para los pobladores de la localidad. Existen diversos métodos de remoción de bajo costo incluyendo la adsorción con alúmina activada, coagulación-precipitación, con carbón animal, o con materiales locales de fácil adquisición que sea económicamente rentable y que presenten una alta efectividad en la remoción de agentes contaminantes como el flúor y el arsénico (Trejo and Hernández 2004, p. 2). Por lo tanto, el problema de esta investigación se plantea de la siguiente manera: ¿Con el carbón activado obtenido de la cascarilla de arroz se logra la adsorción de flúor presente en aguas subterráneas de la comunidad Jesús del Gran Poder?

JUSTIFICACIÓN

En la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba comunidad Jesús del Gran Poder, el agua de consumo humano presenta concentraciones de flúor superiores a los 1,9 mg/L excediendo el límite (1,5 mg/L) permisible por el INEN (Boischio 2003). Debido a los altos niveles de flúor, la población presenta cuadros de fluorosis dental y esquelética por el constante consumo de agua con este contaminante (OMS 2002).

El agua proveniente de las fuentes incide directamente en la salud de los pobladores de la comunidad ya que no cuenta con ninguna planta de tratamiento para agua potable. En base a lo expuesto anteriormente, la propuesta de este estudio tiene como finalidad sintetizar carbón activado eficiente y de bajo costo para la remoción de flúor; la cual al ser integrada en el

tratamiento de agua potable disminuya la concentración de este constituyente por debajo de 1,5 mg/L ajustándose a la norma NTE INEN 1108 (INEN 2014).

La remoción del flúor se lo realizará mediante el método de adsorción por carbón activado, puesto a que la adquisición de materia prima es muy asequible y el costo de implementación es de bajo costo respecto a otras tecnologías como métodos electroquímicos, intercambio iónico y osmosis inversa mismas que son implementadas principalmente en países de primer mundo en donde la concentración de flúor en el agua potable no supera los 0,25 ppm (Trejo and Hernández 2004). La cascarilla de arroz al ser considerada como un desecho agrícola y al contener un alto porcentaje de celulosa, fibra bruta y ceniza, sirve como un buen adsorbente de bajo costo para elementos tóxicos como flúor, arsénico, etc. (Trejo and Hernández 2004).

La activación de la cascarilla de arroz se lo realizará mediante un método químico, pues según Pereira, Cedeño and Romerosa (2017) dicho método proporciona altos rendimientos, se desarrolla a bajas temperaturas, requiere un menor tiempo de activación y el grado de porosidad es mucho mayor a diferencia del método físico. Además, con el carbón activado obtenido se realizarán ensayos a nivel de laboratorio comprobando su rendimiento de adsorción dejando en claro la eficiencia del adsorbente en la remoción de flúor mejorando los estándares de calidad del agua y por ende la de los moradores de la comunidad Jesús del Gran Poder.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Obtener carbón activado a partir de la cascarilla de arroz para la adsorción de flúor en aguas subterráneas de la comunidad Jesús del Gran Poder.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima (cascarilla de arroz) mediante análisis de humedad, ceniza, materias volátiles y carbón fijo para establecer su aplicación en la síntesis de carbón activado.
- Sintetizar carbón activado mediante activación química utilizando ácido fosfórico a diferentes concentraciones para evaluar la eficiencia en la adsorción de flúor.
- Caracterizar el carbón activado mediante análisis fisicoquímicos e instrumentales para determinar las características del adsorbente.
- Evaluar la adsorción de flúor en aguas subterráneas mediante ensayos experimentales para validar la eficiencia del carbón activado.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes de la Investigación

En la investigación realizada por el departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Bharati Vidyapeeth en la India (Deshmukh, Attar and Waghmare 2009), el carbón de la cascarilla de arroz se obtuvo en la mufla a una temperatura de 250°C durante 5 horas. Para la activación química se utilizó ácido nítrico 1N en una relación 1:1 en peso, obteniendo carbón activado con una eficiencia del 65% en la remoción de flúor. El punto máximo de adsorción se obtuvo a un pH de 2-10 y el tiempo de contacto fue de 90 minutos a 40 rpm.

Por otra parte, Ghosh, Chatterjee and Ganguly (2014) en su estudio, obtuvo carbón activado a partir de la cascarilla de arroz con una eficiencia del 85% en la remoción de flúor. Para ello se mantuvieron constantes el tiempo (180 minutos) y la temperatura en el interior de la mufla (300°C) para aumentar su porosidad.

De manera similar, autores como Benítez, Pacheco and Sandoval (2017) estudiaron la remoción de flúor utilizando hueso bovino calcinado a una temperatura de 450°C, demostrando una eficiencia del 84,31%. Sin embargo, el inconveniente surgió al realizar la prueba organoléptica ya que se detectó un leve sabor y olor a carbón y putrefacción.

Otras investigaciones (Vinish V Nair citado en Pushpa and Radha 2019) han determinado que la cascarilla de arroz junto con la moringa oleífera es un adsorbente ideal para la remoción de flúor, alcanzando una eficiencia del 98,1% con un tiempo de contacto de 30 minutos. Para el diseño del filtro se emplearon 75% de carbón activado de cascarilla de arroz y 25% de moringa oleífera con un espesor de 4 cm y se redujo fundamentalmente la turbidez junto con un 90% de flúor en el agua.

1.2. Agua Subterránea

Es aquella agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Ordoñez 2011a, p. 9).

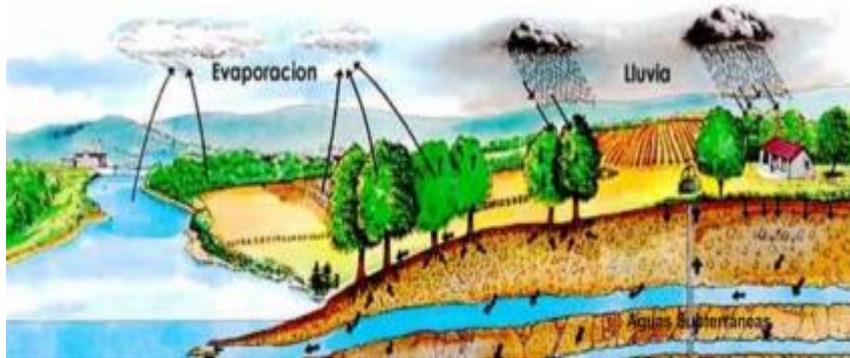


Figura 1-1. Agua subterránea como parte del ciclo hidrológico

Fuente: Ordoñez, 2011.

El agua subterránea se encuentra en casi todas partes y su calidad en general es muy buena. El hecho de que el agua subterránea está almacenada bajo tierra ayuda a que no se contamine y conserve su calidad. Adicionalmente, el agua subterránea es un recurso natural que se encuentra muchas veces cerca de los consumidores finales y por lo tanto no se necesitan grandes inversiones en términos de infraestructura, tratamiento y transporte normalmente necesario para el agua superficial (IGRAC 2011).

1.2.1. Calidad del Agua Subterránea

La disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos para determinados tipos de uso depende fundamentalmente de la calidad fisicoquímica, biológica y radiológica. La calidad del agua es definida por su composición y por el conocimiento de los efectos que pueden causar sus constituyentes (Reino 2013, p. 2). El conjunto de todos los elementos que la componen permite establecer patrones de calidad de agua, clasificándola de acuerdo con los límites establecidos y los usos para la que es apta (humano, agrícola, industrial, o abrevadero de ganado).

Según el Ministerio de Ambiente (2004, p. 294) el agua de consumo humano y uso doméstico es aquella que se emplea en actividades como:

- a) Bebida y preparación de alimentos para consumo humano.
- b) Satisfacción de necesidades domésticas individuales o colectivas tales como higiene personal y limpieza.

Para determinar la calidad de las aguas subterráneas es importante conocer los componentes, así como la concentración en la que se encuentran disueltas dichas sustancias pues en principio el agua subterránea tiende a aumentar las concentraciones de estos componentes a medida que se infiltra y aumenta su recorrido en los distintos acuíferos. Además de la composición del agua, Reino (2013, pp. 4–5) considera que existen ciertas características físicas que determinan su calidad como las que se detallan a continuación:

- *Temperatura:* Es la característica que depende del gradiente geotérmico, que incrementa 1°C conforme aumenta 30 metros de profundidad.
- *Conductividad eléctrica:* Es la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica y se mide en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Su valor aumenta en función de las sales disueltas en forma de iones y la temperatura. Para aguas subterráneas los valores van desde muy bajo hasta muy altos.
- *Color:* Hace referencia a las sustancias disueltas en agua, generalmente materia orgánica.
- *Olor y sabor:* Son parámetros subjetivos, aguas con cloruros mayor a 300 mg/l tienen sabor salado, mientras que SO_4^{2-} mayor a 400 mg/l tienen sabor amargo y salado.
- *Turbidez:* Se refiere a la dificultad del agua para transmitir la luz, debido a la presencia de sólidos en suspensión como: limos, arcillas, materia orgánica que impiden el paso de luz.
- *pH:* Es la medida de concentración de hidrogeniones presentes en el agua. En aguas subterráneas los valores oscilan entre 6,5 a 8,5.
- *DQO:* Demanda química de oxígeno (DQO), es la capacidad que tiene el agua para consumir oxígeno durante procesos químicos. Generalmente en aguas subterráneas los valores son de 1 a 5 mg/l de O_2 .
- *DBO:* Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es la medida de la cantidad de oxígeno necesario para consumir materia orgánica presente en el agua mediante procesos biológicos. Valores superiores a 1 ppm de O_2 sugieren contaminación.
- *Constituyentes iónicos:* En aguas subterráneas la gran mayoría de sustancias se encuentran disueltas en forma de iones, como, cationes: Sodio (Na^+), Potasio (K^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), y aniones como: Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Bicarbonato (HCO_3^-), Carbonato (CO_3^{2-}) y Nitrato (NO_3^-). Aunque estos componentes se encuentren en concentraciones pequeñas, se consideran iones fundamentales.
- *Constituyentes minoritarios:* Se encuentran en concentraciones inferiores al 1% con relación a los componentes fundamentales. Algunos de estos constituyentes son: Boro (B^{3+}), Bromuro (Br^-), Compuestos Fenólicos, Fosfato (PO_4^{3-}), Manganeso (Mn), Sílice (Si), Cobre (Cu^+) y Hierro (Fe^{2+}).
- *Constituyentes tóxicos y carcinógenos:* Dentro de este grupo lo constituyen los siguientes elementos: Flúor (F^-), Arsénico (As), Bario (Ba^{2+}), Cadmio (Cd^{2+}), Plomo (Pb) y Selenio (Se).
- *Gases disueltos:* Los principales son: Oxígeno disuelto (O_2), Gas carbónico (CO_2) y Gas sulfhídrico (H_2S).

Las aguas subterráneas se ven contaminadas de manera natural por la relación existente entre la dinámica del flujo y los asentamientos donde se encuentren ubicadas

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1108, quinta revisión 2014-01, establece los requisitos que debe cumplir el agua potable para el consumo humano (Tabla 1-1).

Tabla 1-1. Requisitos Físicos y Químicos del Agua Potable

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO
Características físicas		
Color	Unidad de color aparente (Pt-Co)	15
Turbiedad (NTU)	NTU	5
Olor		No objetable
Sabor		No objetable
Concentración de iones		
Antimonio (Sb)	mg/L	0,02
Arsénico (As)	mg/L	0,01
Bario (Ba)	mg/L	0,7
Boro (B)	mg/L	2,4
Cadmio (Cd)	mg/L	0,003
Cianuro (CN ⁻)	mg/L	0,07
Cloro libre residual*	mg/L	¹ 0,3 a 1,5
Cobre (Cu)	mg/L	2,0
Cromo (Cr)	mg/L	0,05
Fluoruros	mg/L	1,5
Mercurio (Hg)	mg/L	0,006
Níquel (Ni)	mg/L	0,07
Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/L	50,0
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/L	3,0
Plomo (Pb)	mg/L	0,01
Radiación total, α*	Bq/L	0,5
Radiación total, β**	Bq/L	1,0
Selenio (Se)	mg/L	0,04
¹ Rango para el cloro libre residual luego de un tiempo de contacto de 30 minutos. *Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: 210 Po, 224 Ra, 226 Ra, 232 Th, 234 U, 238 U, 239 Pu **Corresponde a la radiación emitida por los siguientes radionucleidos: 60 Co, 89 Sr, 90 Sr, 129 I, 131 I, 134 Cs, 137 Cs, 210 Pb		

Fuente: INEN, 2014.

Realizado por: Guaña, Luis, 2022.

1.3. Flúor

El flúor es el decimotercer elemento más abundante del mundo y constituye el 0,08% de la corteza terrestre. Es considerado como un halógeno gaseoso-venenoso univalente de color amarillo verdoso pálido. Es el más reactivo y electronegativo de todos los elementos que conforman la tabla periódica formando fácilmente compuestos con la mayoría de los elementos incluyendo a los gases nobles criptón, xenón y radón (Lenntech 2022).

1.3.1. Flúor y Contaminación en Aguas Subterráneas

El flúor en el agua subterránea se encuentra como molécula en una concentración muy variable. Entre los minerales más comunes que aportan F⁻ al agua subterránea están la fluorita CaF₂, fluorapatita (Ca₅(PO₄)₃F), anfíboles, micas, criolita (Na₃AlF₆), villiaumita (NaF), topacio (Al₂(SiO₄)F₂), trifluorita, maladrita que son abundantes en rocas ígneas, metamórficas y en los sedimentos derivados de la erosión de estas rocas (Rivera, Joel and Álvarez 2016, pp. 42–43).

Las aguas subterráneas muestran incrementos progresivos de flúor a lo largo de las líneas de flujo y demuestran la importancia del tiempo de residencia y su posición en la secuencia de flujo y reacción. En muchos acuíferos, la evolución de las aguas subterráneas a lo largo del gradiente de flujo ha tenido lugar durante siglos o milenios y la extracción de agua ha tenido una oportunidad significativa para el equilibrio con los minerales presentes en el acuífero mostrando un incremento en la concentración de minerales.

La exposición a las altas concentraciones de flúor en el agua potable produce fluorosis dental caracterizada por el moteado, picaduras y astillado del esmalte de los dientes. Una exposición prolongada a altas concentraciones de flúor desarrolla fluorosis esquelética presentándose dolor y rigidez en la columna vertebral y las articulaciones (Polo 2019, pp. 32–33).

1.3.2. Efectos por Ingestión de Flúor

El único impacto positivo demostrado del flúor en la salud humana es su contribución a la prevención de la caries dental (infección del esmalte dental) cuando es suministrada en dosis pequeñas y controladas (Polo 2019, p. 32). La hidroxiapatita en el esmalte de los dientes se compone de compuestos de calcio, magnesio y fosfato y es susceptible a la caries inducida por bacterias productoras de ácidos bucales. El flúor interactúa con la hidroxiapatita para formar fluorapatita, que es menos susceptible a la erosión por las bacterias orales (Peckham et al. 2014, p. 2).

El flúor afectaría principalmente al hueso que se encuentra en activa reabsorción ya que existe una similitud entre esta y el ion hidroxilo de la hidro-xiapatita, compitiendo ambos por depositarse

en la matriz ósea. Si las condiciones son favorables el 90% del flúor ingerido se absorbe en el estómago. La concentración máxima en el plasma se observa de 30 a 60 minutos después de la ingestión depositándose en tejidos, riñón y en el hueso. En adultos el 10% de flúor absorbido se deposita en los huesos, mientras que en los niños se registra un aumento al 50% registrándose un aumento de fluorosis en estos últimos años. Sin embargo, una de las principales preocupaciones sobre la fluoración del agua es la incapacidad de controlar la dosis de flúor ingerido de una persona lo que cuestiona el concepto de "dosis óptima" produciéndose alteraciones a niveles ósea (Rivera et al. 1993, pp. 279–280).

La fluorosis produce cambios en la estructura de los huesos volviéndolos frágiles; las primeras etapas de la fluorosis se caracterizan por aumento de masa ósea detectable radiográficamente.

Si la ingesta en altas concentraciones de flúor persiste por varios años, aparecen dolores articulares y dificultades en la ambulación del individuo. Algunas de estas dificultades se detallan a continuación:

- *Fluorosis dental:* Se produce por un hipo mineralización en la superficie del esmalte del diente que se desarrolla durante su formación. La fluorosis puede presentarse en forma de manchas blancas o líneas en la superficie del esmalte; moderada y severa con manchas ásperas e irregularidades ya sea de color blanco o café dejando el esmalte gravemente fracturado (Peckham et al. 2014, p. 4)
- *Fluorosis esquelética:* Está asociada con el enriquecimiento de flúor en el sistema óseo manifestando dolores esporádicos, endurecimiento de las articulaciones, osteoesclerosis de la pelvis y la columna pasando por dolores articulares crónicos, síntomas artríticos, calcificación de ligamentos, osteoesclerosis agravada, con o sin osteoporosis de los huesos hasta producir una severa limitación de los movimientos articulares, calcificación de ligamentos del cuello, columna vertebral, deformidades invalidantes de la columna y articulaciones principales, compresión de la médula espinal y defectos neurológicos (Puche and Rigalli 2007, p. 1).
- *Problemas tiroideos:* En algunos casos, el exceso de flúor puede dañar la glándula paratiroides provocando hiperparatiroidismo que implica la secreción incontrolada de hormonas paratiroides conllevando a un agotamiento del calcio en las estructuras óseas y concentraciones de calcio en la sangre más altas de lo normal. Las bajas concentraciones de calcio en los huesos los hacen más susceptibles a las fracturas.
- *Problemas neurológicos:* En 2017, se publicó un informe en donde se detallaba que la exposición al flúor antes del nacimiento podría ser una fuente de irregularidades cognitivas en el futuro. Los investigadores midieron los niveles de fluoruro en 299 mujeres durante el embarazo y en sus hijos entre las edades de 6 y 12 años. Evaluaron la capacidad cognitiva a las edades de 4 años y entre los 6 y los 12 años en donde los niveles más altos de flúor se

asociaron con puntajes más bajos en las pruebas de coeficiente intelectual documentándose al flúor como una neurotoxina peligrosa para el desarrollo infantil (Medical News Today 2019).

1.3.3. Métodos de Remoción de Flúor

Según Trejo and Hernández 2004, existen varias técnicas de tratamiento para la remoción de flúor, clasificándolos en métodos de alto y bajo costo.

1.3.3.1. Métodos de remoción de alto costo

Dentro de esta categoría se encuentran los métodos de osmosis inversa, intercambio iónico, electroquímicos y destilación y debido a su costo y nivel de sofisticación no son empleadas de forma masiva en las fuentes de agua de nuestro país.

- *Osmosis inversa*: Es un método que emplea altas presiones para forzar al agua a pasar a través de una membrana muy fina impidiendo el paso de partículas con diámetros mayores a los poros de la membrana imposibilitando el paso de minerales. La presión aplicada deberá ser superior a la presión osmótica y en cuanto mayor sea la presión aplicada, mayor será el flujo de permeado a través de la membrana (Condorchem envitech 2022).
- *Método electroquímico*: Este método está destinado principalmente para remover minerales en aguas de origen industrial y requiere de una gran demanda de energía eléctrica para su operación (Trejo and Hernández 2004, p. 1).
- *Intercambio iónico*: Es un método por el cual se sustituyen iones de una disolución por otros iones con la misma carga. Están formadas por una matriz polimérica a la que se le han unido una gran cantidad de radicales polares, ácidos o bases. Cuando el agua pasa a través de la resina, ésta toma iones del agua (sodio, cloruro, calcio, magnesio, etc.) y cede una cantidad equivalente en cuanto a carga de protones o de hidroxilos.(Condorchem envitech 2022).

1.3.3.2. Métodos de remoción de bajo costo

En esta categoría se incluyen las técnicas de coagulación-precipitación, adsorción con alúmina activada, carbón animal y utilizando materiales locales de fácil adquisición.

- *Coagulación-precipitación*: Esta técnica es relativamente barata y muy artesanal ya que la operación se realiza manualmente sin necesidad de aparatos; en el proceso se emplean cal y fosfato monosódico como floculantes en donde la precipitación es ayudada mediante la adición de carbón animal al agua (Trejo and Hernández 2004, p. 3).

- *Adsorción con alúmina activada:* La alúmina activada es una forma porosa y adsorbente de la alúmina parcialmente hidratada ($Al_2O_3 \cdot nH_2O$). Posee una gran área superficial y una alta capacidad para remover minerales. Puede extraer y absorber el 36 % de su propio peso en agua y puede ser utilizada fácilmente en la presencia de gases ácidos y alcalinos. La alúmina activada es simplemente reactivada utilizando el calor para regenerar cuando esté en plena forma hidratada y saturada (Aguilera, Ortíz and Sánchez 2012, pp. 2–3).
- *Carbón animal:* Se usa el carbonizado de hueso de res, cerdo, pollo o pescado y su eficiencia de remoción en la calidad de agua tratada depende en gran medida del proceso de elaboración del carbón. El carbón de hueso además de remover minerales posee la capacidad de remover color olor y algunos metales pesados (Trejo and Hernández 2004, p. 3).
- *Adsorción con materiales locales de fácil adquisición:* Esto hace referencia a desechos agrícolas, residuos naturales. La eficiencia y fácil adquisición del material determinará su costo y viabilidad de implementación.

1.4. Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz es la capa más externa del grano de arroz que se separa de los granos de arroz durante el proceso de molienda. Es considerada como un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice, factores importantes para ser apreciada como una fuente importante de combustible (Valverde, Sarria and Monteagudo 2007, p. 255). La cáscara de arroz es considerada como residuo orgánico y se produce en elevadas cantidades en industrias de la biomasa basada en la agricultura y la molienda de arroz.

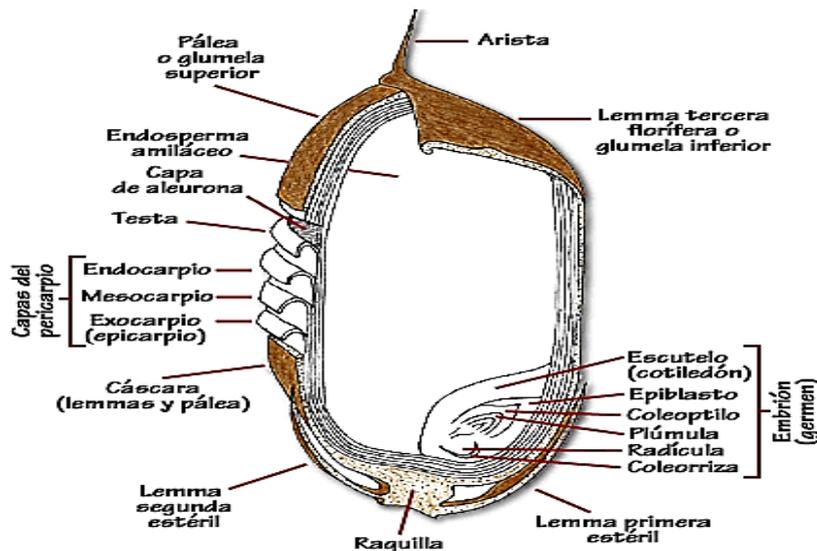


Figura 2-1. Cariósido de arroz y sus estructuras

Fuente: Rentería, 2018.

La superficie abaxial o externa de la cascarilla de arroz llamada exocarpo, se caracteriza por tener una estructura simétrica constituida por celdas convexas separadas por surcos y granos de compuestos de silicio dispersos sobre toda la superficie (Arcos, Pinto and Rodríguez 2007, p. 9).

1.4.1. Composición Química y Propiedades

La composición de la cascarilla de arroz evidencia una gran proporción de celulosa y su capacidad de adsorción se la atribuye a los compuestos lignocelulósicos que posee (Llanos Páez et al. 2016, p. 153). Cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante transformándola en una pasta sólida "grumo de cascarilla al rojo vivo" muy difícil de romper (Valverde, Sarria and Monteagudo 2007, p. 257).

Tabla 2-1. Composición Química de la Cascarilla de Arroz

ANÁLISIS COMPOSICIONAL	% CONTENIDO
Celulosa	60,12
Hemicelulosa	11,19
Lignina	6,66
Ceniza	15,9

Fuente: Llanos Páez et al. 2016.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

El contenido de humedad de la cascarilla de arroz al salir del descascarado varía entre 5 y 40% pero luego estar expuesta a la intemperie. En época no lluviosa, la humedad promedio de la cascarilla está aproximadamente entre el 8 y 15% (Valverde, Sarria and Monteagudo 2007, p. 256). Una de las propiedades físicas más importantes de la cáscara de arroz es su baja densidad por lo que requiere un gran espacio para su almacenamiento. Además, este material tiene determinadas propiedades fisicoquímicas que dificultan su biodegradación convirtiéndose en un importante contaminante.

Tabla 3-1. Composición Elemental de la Cascarilla de Arroz

CASCARILLA DE ARROZ	
COMPONENTE	%
Carbono	39,1

Hidrogeno	5,2
Nitrógeno	0,6
Oxigeno	37,2
Azufre	0,1
Cenizas	17,8
Total	100

Fuente: Arcos, Pinto and Rodríguez 2007.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

1.5. Carbón Activado

El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito solo que el orden en su estructura es menos perfecto (Castillo and Gonzales 2015, p. 10).

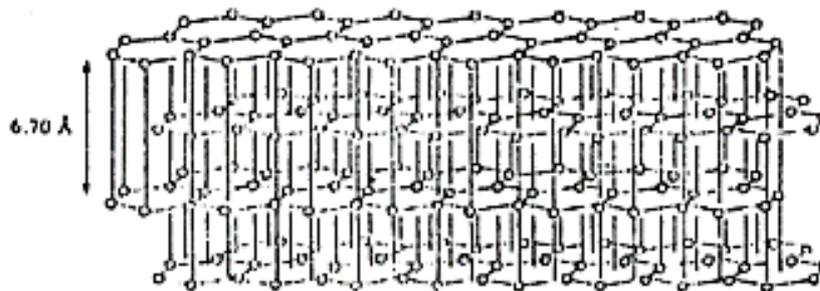


Figura 3-1. Arreglo estructural de las capas planas de grafito

Fuente: León, G. and León, D., 2020.

El área de superficie del carbón activado varía dependiendo de la materia prima y del proceso de activación. Las altas temperaturas, la atmósfera especial y la inyección de vapor en la síntesis del carbón activado es lo que “activa” y crea porosidad dejando mayormente una “esponja” de esqueleto de carbón (León, G. and León, D. 2020, pp. 5–7).

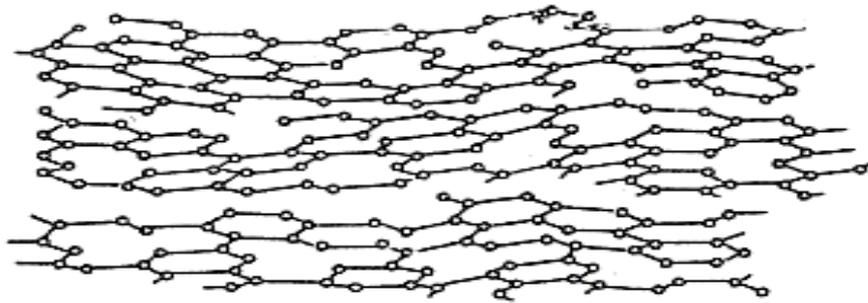


Figura 4-1. Estructura de las capas de carbón activado

Fuente: León, G. and León, D., 2020.

A pesar de ser un material muy eficiente, el costo del carbón activado suele ser alto iniciando un interés creciente en la búsqueda de diversas fuentes y alternativas para reducir los costos de producción. Los productos utilizados en la síntesis de carbón activado deberán investir un alto contenido de carbono y un bajo porcentaje de compuestos inorgánicos. Estas dos condiciones las cumplen los desechos sólidos de la agricultura (cáscaras, semillas, madera y bagazo), las cuales, en un futuro podrían consolidarse como materias primas efectivas para la síntesis de carbón activado (Rodríguez et al. 2018, p. 412).

1.5.1. Composición química

La composición química del carbón activado es aproximadamente de un 75-80% en carbono, 5-10% en cenizas, 6-10% en oxígeno y 0,5% en hidrógeno. Su estructura es netamente carbón puro al igual que el diamante, grafito, negro de humo, entre otros; lo cual le brinda la propiedad de adsorber. (Castillo and Gonzales 2015, p. 15).

1.5.2. Estructura física

El carbón activo posee una estructura microcristalina que recuerda en cierta medida a la del grafito. Esta estructura normalmente da lugar a una distribución de tamaño de poro según su radio: macroporos ($r > 25$ nm), mesoporos ($25 > r > 1$ nm) y microporos ($r < 1$ nm) (Castillo and Gonzales 2015, p. 15). Además, contienen en su estructura pequeñas cantidades de heteroátomos tales como oxígeno, hidrógeno o nitrógeno, permitiendo que sustancias polares sean débilmente retenidas sobre la superficie del carbón activado; esto se debe a que los átomos de carbono situados en los bordes de los planos presentan una alta actividad disponible ya que no están saturados de átomos de carbono y poseen electrones libres. Estos sitios están normalmente unidos a heteroátomos dando lugar a grupos funcionales superficiales que pueden modificar sus propiedades

adsorbentes. Además, dada al área alta de fin de plano, le otorga la capacidad de quimisorber oxígeno, el cual puede disociarse en átomos que reaccionen químicamente con átomos de carbono para formar compuestos oxigenados superficiales; este proceso de oxidación es más significativo en carbones tratados a altas temperaturas. Los átomos de carbono de los planos basales poseen orbitales π , misma que contienen electrones más o menos deslocalizados afectando a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos (Grisales and Rojas 2016, pp. 6–7).

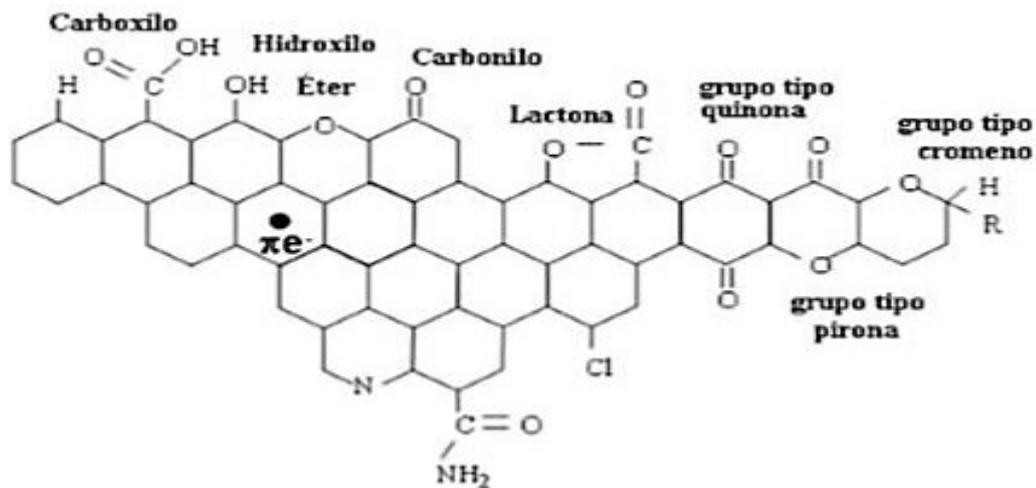


Figura 5-1. Grupos funcionales presentes en la superficie de carbón activado

Fuente: Grisales and Rojas, 2016.

1.5.3. Propiedades del carbón activado

Entre las propiedades más importantes que presenta el carbón activado se destaca su elevada capacidad de eliminación de sustancias, permitiendo la purificación de líquidos y gases por la baja selectividad de retención y alta superficie interna. Esto se debe a la superficie interna que posee, así como la porosidad y el tamaño de los poros. Además, la naturaleza del carbón activado le permitirá retener con mayor facilidad moléculas de mayor volumen como colorantes e hidrocarburos, sin embargo, las propiedades del carbón activo no dependen exclusivamente de la superficie y porosidad pues cuando un producto a eliminar posee alta polaridad, bajo volumen y es disuelto en el aire, la retención tiene eficacia si el carbón activado se asocia con reactivos específicos o se aprovecha las propiedades catalíticas del mismo carbón (Navarrete, Quijano and Vélez 2014, p. 36–37).

Gracias a las diversas propiedades que presenta el carbón activado, lo convierte en un material con diversas aplicaciones, desde filtros de refrigerador o peceras hasta sistemas industriales como plantas de tratamiento para aguas residuales o sistemas de elaboración de antibióticos.

1.5.4. Tipos de carbón activado

Según Carrillo and Sánchez 2013, el carbón activado se clasifica de acuerdo con el tamaño de los poros y tamaño de las partículas:

- *Tamaño de los poros:* La distribución de los poros en el carbón activado está bien determinada, aunque dependerá en gran medida del método de activación, duración del proceso y la materia prima que se utilice. De acuerdo con ello se clasifica en: microporos, mesoporos y macroporos (Carrillo & Sánchez, 2013; citados en Navarrete, Quijano and Vélez 2014).

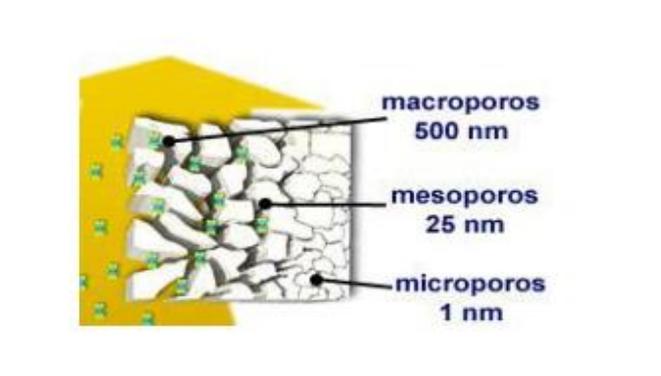


Figura 6-1. Tipos de carbón activado de acuerdo con el tamaño de los poros

Fuente: Navarrete, Quijano and Vélez, 2014.

Según la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) esta clasificación se basa en el diámetro de los poros; es así como: los microporos tienen un tamaño adecuado (≤ 2 nm) para retener moléculas pequeñas, que corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores o solventes. Los mesoporos tienen dimensiones entre 2 – 50 nm y son adecuados para moléculas de tamaño intermedio a los anteriores. Los macroporos tienen dimensiones adecuadas (> 50 nm) para retener moléculas grandes, como colores intensos, moléculas con grupos funcionales clorados, moléculas de gran peso molecular o sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica (León, G. and León, D. 2020, p. 8).

- *Tamaño de las partículas:* Se clasifican en dos: Carbón activado en polvo (CAP) que presenta tamaños menores a 100 μm , con dimensiones entre 15 a 25 nm y Carbón activado granular (CAG) con dimensiones en un rango de 1 a 5 mm, a la vez estos se dividen en CAG que no presentan forma específica y aquellos que presentan forma definida (Carrillo & Sánchez, 2013; citados en Navarrete, Quijano and Vélez 2014).



Figura 7-1. Tipos de carbón activado de acuerdo con el tamaño de las partículas

Fuente: Navarrete, Quijano and Vélez, 2014.

Los CAG sin forma específica se obtienen por molienda, tamizado y clasificación de trozos más grandes; mientras que los CAG con forma definida se pueden obtener por extrusión de carbón en polvo luego de ser mezclados con diferentes aglomerantes. Entre los principales CAG con forma definida se destacan: las fibras, telas, filtros, membranas de carbón, entre otros (Navarrete, Quijano and Vélez 2014, p. 40).

1.6. Métodos de Activación

El carbón activo puede sintetizarse a partir de todo tipo de material carbonoso, o bien, a partir de cualquier carbón mineral no grafitico. Sin embargo, cada materia prima brindará características y cualidades distintas al producto. En cuanto al proceso de activación, existen dos tecnologías básicas: activación térmica (activación física) y por deshidratación química (Luna et al. 2007, p. 42)

1.6.1. Activación Física

El método de activación física tiene lugar en dos etapas: carbonización y activación del carbonizado mediante la acción de gases oxidantes como vapor de agua, dióxido de carbono, aire o mezcla de los mismos, siendo el oxígeno el agente activante responsable de quemar las partes más reactivas del esqueleto carbonoso y el alquitrán retenido dentro de la estructura porosa; y la extensión del quemado depende de la naturaleza del gas empleado y de la temperatura de activación. Es característico en este método un bajo rendimiento en la etapa de activación (30%) (Luna et al. 2007, p. 4).

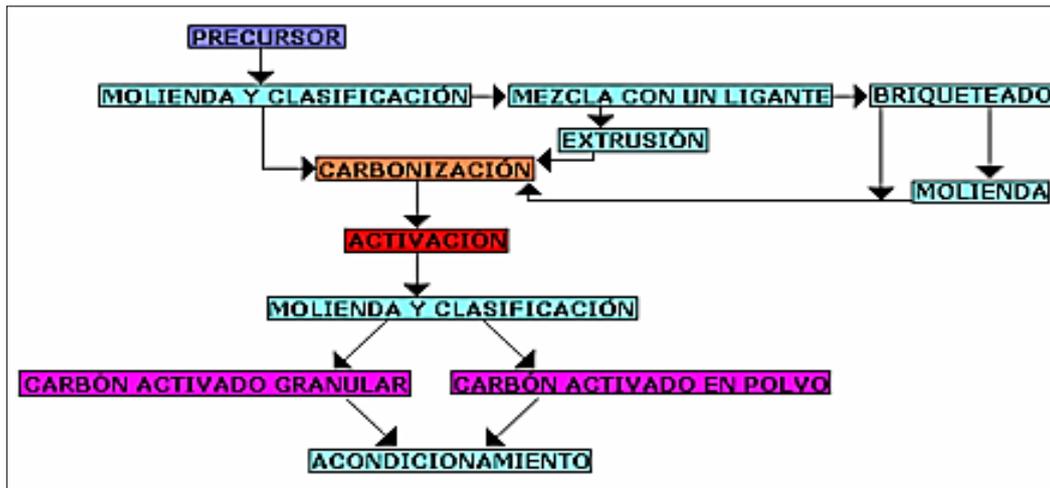


Figura 8-1. Proceso de activación térmica del carbón

Fuente: Castillo and Gonzales, 2015.

En la carbonización se eliminan elementos como el hidrogeno y el oxígeno del precursor para dar lugar a un esqueleto carbonoso con una estructura porosa rudimentaria. Durante la gasificación el carbonizado se expone a una atmósfera oxidante (vapor de agua, dióxido de carbono, o mezcla ambos) que elimina los productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y el área específica. El carbón que se obtiene es llamado carbón primario similar al usado para asar carnes (Luna et al. 2007, p. 42).

1.6.2. Activación Química

El método de activación química se caracteriza porque la carbonización y la activación tienen lugar en una sola etapa. En este caso la activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 450 y 900°C (Castillo and Gonzales 2015, p. 29). La activación del biocarbón se lo realiza utilizando agentes químicos tales como ácido fosfórico, cloruro de zinc, hidróxido de potasio o tiocianato potásico (Grisales and Rojas 2016, p. 9). La activación química se realiza exclusivamente para carbones producidos de materia prima vegetal de origen reciente obteniéndose rendimientos de hasta un 50% y la economía del proceso depende principalmente de la recuperación del agente activante utilizado.

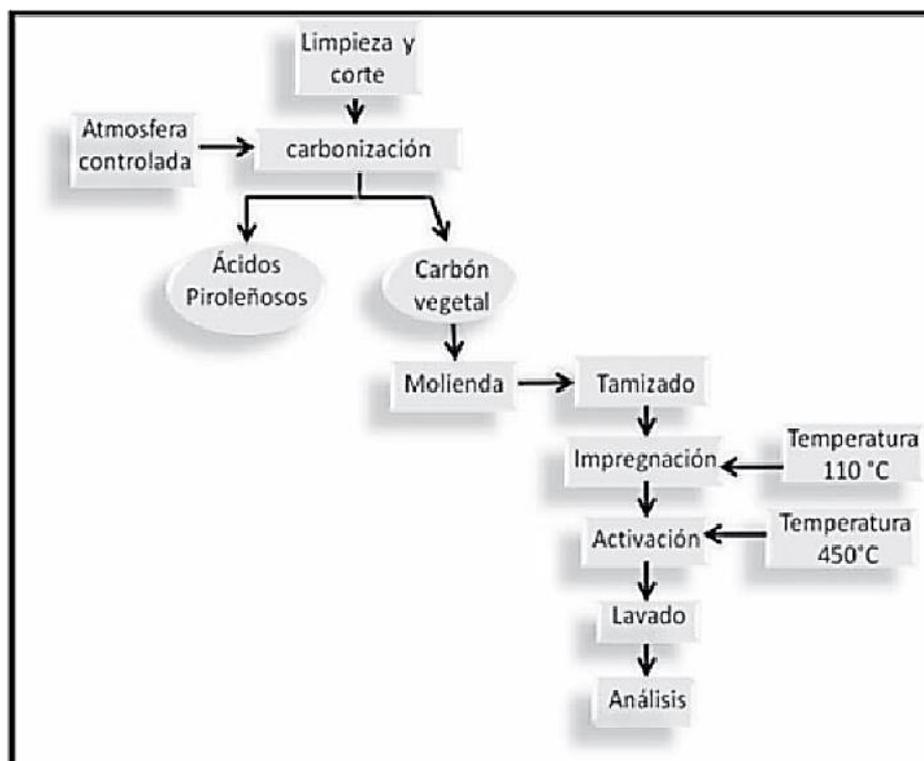


Figura 9-1. Procedimiento general para activación química del carbón

Fuente: Barragán and Echeverry, 2011.

Las ventajas de la activación por el método químico implican menor gasto energético, menor tiempo de activación, un mayor rendimiento y permite obtener carbones con mayor área superficial y microporosidad (Asimbaya et al. 2015, p. 2).

1.6.2.1. Activación utilizando ácido fosfórico

En este tipo de activación, el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante (H_3PO_4) reduciendo en una manera muy significativa la formación del alquitrán. La activación tiene lugar en una etapa a temperaturas que pueden variar entre 400 y 900°C (Castillo and Gonzales 2015, p. 53). El ácido fosfórico contribuye a la formación de micro y mesoporos mostrando un alta especificidad y área de superficie sobre el carbón activado aumentando su rendimiento de adsorción con los iones presentes en su entorno (Sobiesiak et al. 2006, pp. 173–174).

1.7. Adsorción

La adsorción es el proceso de interacción que existe entre los campos de fuerzas cuando la superficie de un sólido entra en contacto con un fluido (líquido o gas), siendo el sólido el adsorbente y el líquido, el adsorbato (Paredes Doig 2011, p. 10). Las fuerzas que actúan en este proceso

son las Fuerzas de Dispersión de London, siendo la Fuerza de Van der Waals que existe entre las moléculas con un alcance extremadamente corto, y, por lo tanto, son sensibles a la distancia entre la superficie de carbono y la molécula de adsorbato. El corto alcance y la naturaleza aditiva de estas fuerzas dan como resultado que el carbón activado tenga las fuerzas de adsorción física más fuertes que cualquier otro material conocido (Chemviron 2022). El proceso de adsorción se da en tres etapas:

- 1) Difusión externa
- 2) Difusión interna
- 3) Adsorción del adsorbato

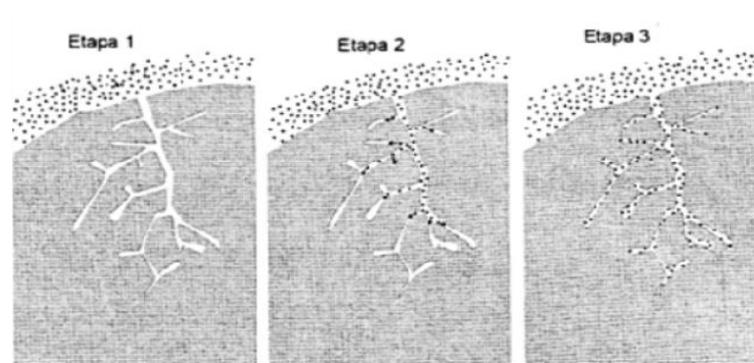


Figura 10-1. Etapas de adsorción de carbón activado

Fuente: Paredes Doig, 2011.

En la primera etapa (difusión externa) el adsorbato se aproxima a la superficie externa del sólido venciendo la resistencia que se encuentra acumulada en una fina película alrededor del adsorbente. En la segunda etapa (difusión interna), el adsorbato migra a través de la red porosa del sólido y finalmente en la última etapa se lleva a cabo el proceso de adsorción del adsorbato a la superficie del adsorbente (Obregón 2012, p. 4). Al iniciar el proceso, la atracción es mayor debido a la disponibilidad de la superficie, y conforme se da la adsorción existe menos superficie libre y por ende la velocidad de adsorción decrece mientras incrementa la velocidad de desorción hasta llegar al equilibrio dando como resultado una mayor concentración del fluido alrededor de la superficie sólida (Paredes Doig 2011, p. 10).

1.7.1. Tipos de adsorción

1.7.1.1. Adsorción Física

También denominada fisisorción. En este proceso el adsorbato se encuentra unido a la superficie del sólido por enlaces débiles mediante interacciones de Van der Waals. La entalpía de adsorción

varía entre 10 a 20 kJ/mol, es considerada como un proceso reversible ya que al incrementar la temperatura se reduce la adsorción. Además, el proceso de adsorción se da en cualquier punto del adsorbente manteniendo la estructura química del adsorbato y se lo realiza a cabo en una monocapa o multicapas; cabe destacar que no existen reacciones superficiales como neutralización o descomposición (Paredes Doig 2011, p. 12).

1.7.1.2. Adsorción Química

Adsorción química o quimisorción, se caracteriza por presentar enlaces de tipo covalente entre los centros activos del material adsorbente y adsorbato (material retenido). Este proceso es similar a las reacciones químicas pues existe un intercambio electrónico adsorbato-adsorbente (Bonifacio and Zegarra 2019, p. 28) y su entalpía de adsorción varía entre 40 a 400 kJ/mol. El proceso se da en una monocapa y pueden darse reacciones superficiales como disociación, catálisis, reconstrucción, etc. En la quimisorción el adsorbato cambia su estructura química respecto al precursor (Paredes Doig 2011, p. 12).

1.7.2. Isotermas de adsorción

El proceso de adsorción se describe por medio de isotermas, en ellas se indica cómo las moléculas adsorbidas se distribuyen entre la fase líquida y sólida cuando el proceso de adsorción alcanza un equilibrio. Los modelos más empleados que explican el fenómeno de adsorción son las isotermas propuestas por Langmuir y Freundlich (Rivas et al. 2014, p. 44).

1.7.2.1. Isotherma de adsorción de Langmuir

La isoterma de Langmuir es un modelo teórico válido para la adsorción en una monocapa sobre una superficie completamente homogénea con un número finito de sitios idénticos y específicos de adsorción y con una interacción despreciable entre las moléculas del adsorbato (Figueroa, Moreno and Hormaza 2015, p. 109).

Algunos autores (Ortega and Nuñez 2012; Rivas et al. 2014) señalan que el modelo de Langmuir asume ciertos supuestos como, por ejemplo: existe un número específico de sitios donde se puede adsorber una molécula, cuando dichos sitios están ocupados no se da la adsorción, provocando que el sistema se sature. Además, considera que el calor de adsorción es independiente del grado de recubrimiento, así como la energía de las moléculas adsorbidas es independiente de la presencia de otras moléculas debido a que todos los sitios son equivalentes. El modelo de Langmuir se describe mediante:

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Ecuación 1-1: Modelo de Langmuir

Fuente: Ortega and Nuñez, 2012.

Donde q_e significa la cantidad adsorbida, q_{max} representa la capacidad máxima de adsorción (mg/g), K_L es la constante de Langmuir que indica la afinidad del adsorbato por el adsorbente (L/mg) y C_e es la concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L) (Figueroa, Moreno and Hormaza 2015, p. 109).

1.7.2.2. Isoterma de adsorción de Freundlich

La isoterma de Freundlich representa la relación empírica entre la concentración de un soluto adsorbido en la superficie de un sólido y la concentración del soluto en la fase líquida (Figueroa, Moreno and Hormaza 2015, p. 110).

El modelo de Freundlich asume que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por múltiples sitios de adsorción con energías características; es decir el calor de adsorción entre adsorbato-adsorbente varía de un sitio a otro, no son equivalentes (Paredes Doig 2011, p. 18). La isoterma de Freundlich se expresa mediante:

$$q = Kf * C^{(1/n)}$$

Ecuación 2-1: Modelo de Freundlich

Fuente: Ortega and Nuñez, 2012.

Donde q representa la cantidad adsorbida por unidad de peso de adsorbente, Kf es una constante indicativa de la capacidad de adsorción del adsorbente, C representa la concentración del adsorbato y n es una constante que indica la intensidad de adsorción, la cual está restringida a valores mayores que la unidad. Cuando n se encuentra en un rango de 2 a 10 representa una buena intensidad de adsorción; un rango entre 1-2 representa una intensidad moderada y valores inferiores a 1 son característicos de una adsorción débil (Treybal, 1981; citado en Ortega and Nuñez 2012). La ecuación descrita anteriormente se puede ajustar para modelar el equilibrio de adsorción bajo su forma logarítmica, donde la representación $\log(q)$ versus $\log C$ dará una línea recta cuyo intercepto es igual a $\log Kf$ y cuya pendiente es $1/n$. De este modo la ecuación queda representada de la siguiente manera:

$$\log(q) = \log Kf + \frac{1}{n} \log C$$

Ecuación 3-1: Modelo logarítmico de Freundlich

Fuente: Ortega and Nuñez, 2012.

Cuando el comportamiento de adsorción se ajusta adecuadamente a una isoterma con una base teórica y como en este caso el modelo de Freundlich es una relación completamente empírica, es apropiado usar otra isotermas en su lugar como, las isotermas de adsorción de Langmuir o BET («Ecuación de Freundlich» 2012).

1.7.3. Factores que influyen en la capacidad de adsorción

- *Área superficial:* La capacidad de adsorción es proporcional al área superficial; es decir, es en función del grado de activación.
- *Tamaño del poro:* El proceso de adsorción se facilita por la correcta distribución del tamaño de los poros.
- *Tamaño de partícula:* El tamaño de partícula no influye sobre el área superficial total y por ende sobre la capacidad de adsorción.
- *Temperatura:* Las temperaturas bajas aumentan la capacidad de adsorción.
- *Concentración del adsorbato:* Este factor es proporcional a la capacidad de adsorción; es decir, altas concentraciones de adsorbato proveen grandes fuerzas de empuje durante el proceso de adsorción.
- *pH:* La capacidad de adsorción aumenta en función de la solubilidad del adsorbato; es decir, en condiciones de pH que favorecen dicha solubilidad.
- *Tiempo de contacto:* Se requiere de un tiempo de contacto mínimo para alcanzar el equilibrio en el proceso de adsorción y maximizar su eficiencia.
- *Densidad aparente:* Indica la actividad de un volumen de carbón.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Diseño de la Investigación

2.1.1. Localización de estudio

La comunidad “Jesús del Gran Poder” está ubicada en el cantón Guano, provincia de Chimborazo. Su población está conformada por 79 familias que se dedican principalmente a la actividad agrícola. El suministro de agua para el consumo doméstico proviene de fuentes de agua subterráneas.



Figura 1-2. Comunidad Jesús del Gran Poder

Fuente: Guaiña, Luis, 2022.

2.1.2. Unidad de análisis

Flúor presente en aguas subterráneas de la comunidad Jesús del Gran Poder.

2.1.3. Población de estudio

Cascarilla de arroz (CCA), al cual se le someterá una serie de operaciones para la obtención de carbón activado para posterior tratamiento en la adsorción de flúor.

2.1.4. Selección de la muestra

2.1.4.1. Muestreo

El muestreo es el primer paso para la determinación de la calidad de una fuente de agua. Para ello, la muestra debe ser representativa evitando su contaminación en el transcurso de llegada al laboratorio (INEN 2000, p. 2).

Las muestras de agua se recogieron en siete puntos referenciales de la localidad de estudio (figura 2-2). Los sitios de muestreo constan de: 2 fuentes de agua, 1 centro de captación, 1 sistema de filtración, 2 tanques de reservorio y del suministro de agua de una casa al azar.

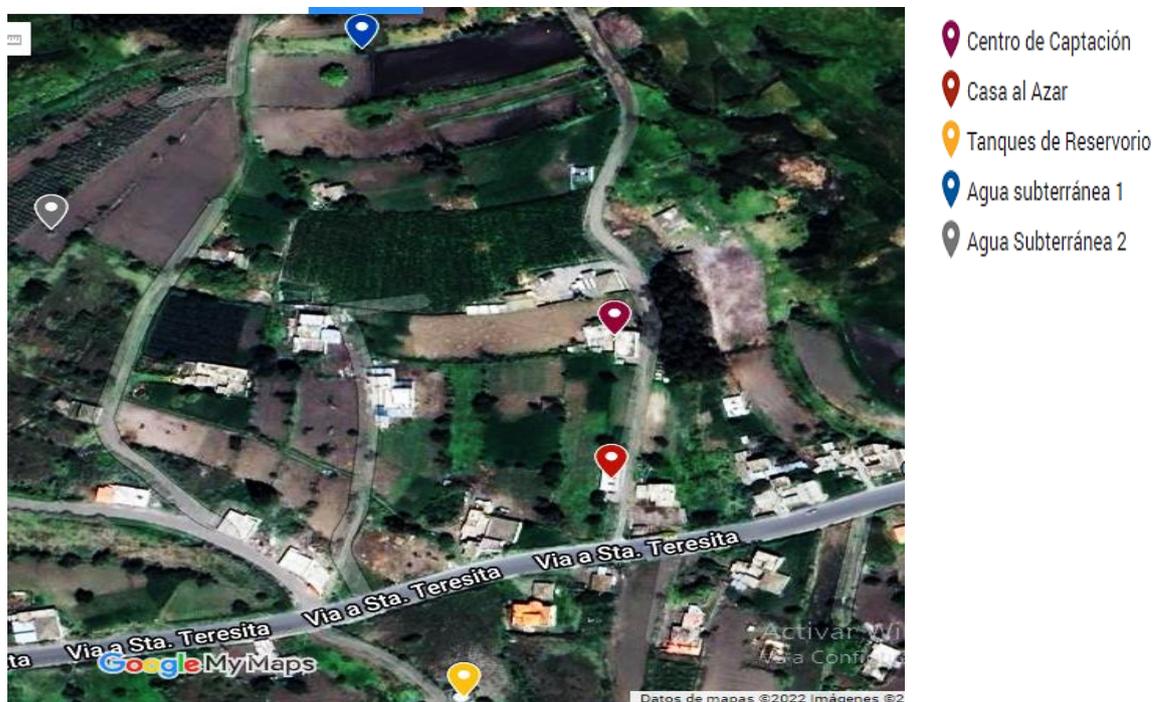


Figura 2-2. Puntos de muestreo

Fuente: Guaiña, Luis, 2022.

2.1.4.2. Métodos y Materiales

El procedimiento para la toma de muestra de agua de la comunidad se realizó en base a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 226:2000 y al protocolo propuesto por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (Mendoza et al. 2011, pp. 5–6). Para el análisis fisicoquímico del agua se utilizó el método SPANDS en donde se pudo determinar la concentración de flúor presente en las muestras recolectadas.

De acuerdo con Lucas Mendoza et al. (2011, p. 2), los envases para la toma de muestras deberán ser de plástico o vidrio y de preferencia nuevos. El envase solo puede ser lavada con agua destilada y al momento de la toma, se deberá enjuagar al menos tres veces con el agua a muestrear y no deberá exceder los 7 días de almacenamiento bajo refrigeración para realizar los análisis fisicoquímicos.

2.1.4.3. Toma de muestra

La cantidad de muestra necesaria para un análisis fisicoquímico es de aproximadamente 1000 ml (1 litro) como mínimo (Lucas Mendoza et al. 2011, p. 2). En primer lugar, se rotuló los envases con el nombre de los siete puntos de referencia de los cuales se tomó la muestra, se desechó la parte superficial del agua de las fuentes para descartar cualquier contaminación causada por agentes extraños. Se enjuago 2 a 3 veces con el agua a muestrear, se recogió la muestra sin dejar cámaras de aire en el interior para que no ocurra una variación de volumen debido a diferencias térmicas, finalmente se cerró el envase asegurando un cierre hermético.

2.1.4.4. Transporte de la muestra

Las siete muestras recolectadas fueron etiquetadas y guardadas en una hielera tipo cooler con suficiente hielo para conservar la muestra por debajo de los 10°C evitando transformaciones por acción microbiana o variación de pH por alteración de carbonatos o bicarbonatos (Lucas Mendoza et al. 2011, p. 2) hasta su llegada al laboratorio.

2.1.4.5. Análisis fisicoquímico del agua

Los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de “Calidad de Agua” de la Facultad de Ciencias, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Los análisis comprendieron los siguientes parámetros: pH, conductividad, color, turbidez, dureza total, alcalinidad, sólidos totales disueltos, nitratos, flúor.

- *Análisis de Flúor:* El método para la determinación de flúor implica la reacción de fluoruro con una solución de tinte circonio rojo. El fluoruro se combina con parte del circonio para formar un complejo incoloro, blanqueando así el color rojo en cantidad proporcional a la concentración de flúor (HACH 2000, p. 131). El análisis de flúor se realizó utilizando el fotómetro DR 2800 según el Manual de Análisis HACH. Para ello se ajustó la longitud de onda correcta a 580 nm y se insertó el elevador de celdas de 10 mL en el compartimento. Se colocó 10 mL de muestra preparada en una celda y del mismo modo se realizó con el blanco, colocando 10 mL de agua desionizada en una nueva celda. Posteriormente se agregó 2 mL de reactivo

SPANDS en cada celda y se procedió a dar lectura en el fotómetro. Se debe tener cuidado con el reactivo a medir, ya que se trata de un compuesto que es tóxico y corrosivo; el resultado se muestra en mg/L de F- (HACH 2000, pp 128–129).

2.2. Parte Experimental

2.2.1. Acondicionamiento de la Materia Prima

La cascarilla de arroz (CCA) fue adquirida en la Piladora “La Fe” ubicada en el recinto “El Relicario” Av. Panamericana km. 78 Vía Balzar provincia de Guayas. Previo al proceso de trituración, la CCA fue lavada con agua destilada para eliminar impurezas presentes en la materia prima. La trituración se lo realizó en el molino marca Thomas utilizando mallas de 1 y ½ mm obteniéndose un granulado de menor tamaño facilitando el proceso de tamizado. Para obtener un tamaño de partícula más homogéneo, el granulado obtenido se hizo pasar a través de un tamiz No. 80 obteniendo partículas con diámetro de 0,180 mm. Finalmente, el producto tamizado fue secado en una estufa a 110°C durante dos horas reduciendo significativamente la humedad existente en la CCA.

2.2.2. Caracterización de la Materia Prima

La cascarilla de arroz (CCA) fue caracterizada mediante un análisis próximo que consistieron en la determinación del: contenido de humedad, cenizas, materias volátiles y carbón fijo.

2.2.2.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30% (Valverde, Sarria and Monteagudo 2007, p. 256).

La determinación de humedad se lo realizó por el método de secado utilizando la termobalanza marca RADWAG PMC 50. Para ello se pesaron 5g de muestra previamente tamizada distribuyéndola uniformemente en el platillo. Transcurrido un tiempo de 5 a 10 minutos, se tomó la lectura esperando que esta permanezca estable durante 2 minutos registrándola como porcentaje total de humedad; el proceso se realizó por triplicado con la finalidad de apoyar sus resultados.

2.2.2.2. Contenido de cenizas

El contenido de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo del material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa es importante conocer el porcentaje en la generación de ceniza ya que en carbones activados como el proveniente de la CCA podría funcionar como un aditivo en materiales de construcción o en la fabricación de filtros para la adsorción de minerales (Valverde, Sarria and Monteagudo 2007, p. 257).

Para la determinación de cenizas, se etiquetó y taró 3 crisoles para luego ser llevados a la estufa a una temperatura de 105°C por una hora y así eliminar su humedad. Los crisoles se enfriaron en un desecador para luego ser pesados. En cada uno de los crisoles se pesa 3 gramos de muestra y se inicia el proceso de calcinación utilizando un reverbero hasta que la muestra deje de emanar humo. La muestra calcinada se trasladada al interior de una mufla a una temperatura de 550°C durante 5 horas. Se deja que la temperatura en el interior de la mufla descienda gradualmente hasta la temperatura ambiente en las siguientes 24 horas. Transcurrido este tiempo las muestras son llevadas a un desecador pesando cada una de ellas y registrando su valor correspondiente. Todo el proceso se realizó por triplicado y el contenido de cenizas se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% C_e = \frac{m_{ce}}{m_s} \times 100$$

Ecuación 1-2: Contenido de Cenizas

Fuente: Valverde, Sarria and Monteagudo, 2007.

Donde:

C_e = Contenido de cenizas, en %

m_{ce} = masa de cenizas, en g

m_s = masa de la muestra original, en g

2.2.2.3. *Contenido de materias volátiles*

La determinación de materias volátiles se realizó pesando 1g de muestra en un crisol para luego ser llevada a la mufla a una temperatura de 950 °C durante 7 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, se llevó el crisol al desecador hasta que alcance la temperatura ambiente procediendo a pesar y registrar el valor obtenido.

$$\% Mv = \frac{m_s - m_{nv}}{m_s} \times 100$$

Ecuación 2-2. Contenido de Materias Volátiles

Fuente: Valverde, Sarria and Monteagudo, 2007.

Donde:

Mv = Contenido de materias volátiles, en %

m_s = masa de la muestra original, en g

m_{nv} = masa de los compuestos no volátiles, en g

2.2.2.4. Carbón fijo

El porcentaje de carbón fijo se determinó por diferencia utilizando la siguiente fórmula:

$$\% C_f = 100 - \% Humedad - \% Cenizas - \% Materias volatiles$$

2.2.3. Síntesis de Carbón Activado

2.2.3.1. Obtención del Carbón de la Cascarilla de arroz

La carbonización de la cascarilla de arroz se realizó por pirólisis, para ello la muestra seca fue alimentada en el reactor a una temperatura de 400 °C por 4 horas con el fin de obtener carbón de la cascarilla de arroz. La temperatura del reactor debe ir aumentando de manera controlada para conseguir una porosidad uniforme. Posterior a la etapa de pirólisis se deja enfriar el equipo por 24 horas retirando la muestra y envasándola en recipientes de vidrio para que no sufra alteraciones de ningún tipo.

2.2.3.2. Preparación de la solución de Ácido Fosfórico

Se prepararon las soluciones de ácido fosfórico (agente activante) a diferentes concentraciones: 65%, 75% y 85% (v/v). Para ello, se empleó una solución madre con una concentración del 85% y para su dilución se utilizó la siguiente fórmula:

$$C1 \times V1 = C2 \times V2$$

Ecuación 3-2: Dilución de soluciones

Dónde:

- $C1$ = concentración del H_3PO_4 en (%)
- $V1$ = volumen que se sacó del frasco del 85% en (mL)
- $C2$ = concentraciones que se halló (65,75, 85) en (%)
- $V2$ = volumen que se preparó (mL)

Reemplazando valores se obtuvo para preparar 100 mL de H_3PO_4 al 65%

$$85\% \times V_1 = 65\% \times 0,1L$$

$$V_1 = 0,07647L = 76,47mL \text{ de } H_3PO_4$$

Se retiró 76,47mL del frasco que contenía H₃PO₄ al 85% y se transfirió a un balón de aforo de 100 mL. Se realizó el mismo procedimiento para las siguientes dos concentraciones. En la tabla 1-2 se muestra los volúmenes requeridos para la preparación de las soluciones de ácido fosfórico (H₃PO₄).

Tabla 1-2. Preparación de Ácido Fosfórico (H₃PO₄)

CONCENTRACIÓN REQUERIDA (%)	VOLUMEN DE MUESTRA MADRE (mL)	VOLUMEN DE AGUA DESTILADA (mL)
65	76,47	25,53
75	88,24	11,76
85	100	-----

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

2.2.3.3. Activación del Carbón de la Cascarilla de Arroz

Para iniciar la activación química, se pesaron 60 gramos de carbón de la cascarilla de arroz y se sumergió en 300 mL de ácido fosfórico a tres diferentes concentraciones: 65%, 75% y 85%. Para el proceso de impregnación se utilizó un agitador magnético durante 3 dejando reposar la solución obtenida por 24 horas a temperatura ambiente. Transcurrido ese tiempo y con la finalidad de elevar la eficiencia de impregnación, las muestras fueron llevadas a la estufa durante 2 horas a 105°C. A continuación, se realizaron lavados del carbón activado con agua destilada e NaOH al 0,1 N hasta alcanzar un pH neutro con la finalidad de eliminar el excedente de reactivo que haya quedado en la solución. Finalmente, la muestra es secada en una estufa a 105°C toda la noche para eliminar el exceso de agua. El carbón obtenido se almacenó en recipientes de vidrios herméticos previamente etiquetados.

2.2.3.4. Rendimiento del Carbón Activado

El rendimiento se calculó entre el peso del carbón activado obtenido y el peso de la cascarilla de arroz seco.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Peso carbón activado}}{\text{Peso cascarilla de arroz}} \times 100$$

Ecuación 4-2. Porcentaje de Rendimiento

2.2.3.5. Procedimiento elaboración del filtro

Se utilizó la metodología propuesta por Carrillo and Sánchez (2013) con varias modificaciones. Primero se tomó un envase de polietileno de uso alimentario con capacidad de un litro y se cortó la parte superior para facilitar la elaboración del filtro. El envase se sujetó de manera vertical en un soporte metálico verificando que la cabeza se encuentre hacia abajo. En la parte inferior (boca) del envase se colocó algodón con la finalidad de atrapar elementos sólidos, posteriormente el papel filtro de poro grueso se cortó y se colocó por encima del algodón a modo de sostén para el carbón activado, y por último se colocó el carbón activado de la cascarilla de arroz a diferentes gramajes. Después del armado del filtro, se vertió la muestra de agua dentro del recipiente esperando a que inicie el proceso de filtración cronometrando el tiempo que tarda en atravesar toda la columna de filtrado. El agua filtrada se almacenó en un vaso de precipitación de 500 mL y finalmente se midió la cantidad de flúor presente en la solución utilizando el fotómetro DR 800 para calcular su eficiencia.

2.2.3.6. Evaluación de Adsorción de Flúor

Las variables experimentales en este estudio fueron la concentración de ácido fosfórico y la masa del adsorbente (variables independientes) mientras que la adsorción de flúor es el parámetro por evaluarse (variable dependiente). En primer lugar, se evaluó la eficiencia del carbón activado en el proceso de adsorción a nivel de laboratorio, en donde se utilizó una solución patrón de flúor a 1000 ppm, la cual se diluyó a 1,97 ppm, valor cercano a la concentración de F^- que presenta las fuentes de agua de la comunidad. Para ello se pesaron 2, 6 y 10 g de carbón activado al 65%, 75% y 85% con ácido fosfórico empaquetándolas en una columna que contenía algodón y papel filtro. La solución diluida se vertió en los filtros y la adsorción de flúor se cuantificó en el fotómetro DR 2800.

Una vez evaluada la eficiencia del carbón activado a nivel de laboratorio, se realizó la experimentación a nivel de campo con la muestra de agua recolectada de la comunidad, la cual presenta una concentración de 1,99 ppm iones flúor. El agua recolectada es trasvasada en las columnas de filtrado procediendo a medir el contenido de F^- en la solución filtrada. Este proceso se lo realizará por triplicado con el fin de obtener datos suficientes para el diseño experimental y poder optimizar el sistema de filtrado.

2.2.4. Caracterización de Carbón Activado

Al igual que la materia prima (cascarilla de arroz), el carbón activado fue caracterizado mediante un análisis próximo que consistió en: la determinación de humedad, cenizas, materias volátiles y carbón fijo. Además, se realizaron caracterizaciones mediante análisis instrumentales como la espectroscopia IR, microscopia SEM y análisis BET.

2.2.4.1. Espectroscopia Infrarrojo con Transformada de Fourier

El análisis de espectroscopia infrarroja FT-IR se realizó en el laboratorio de Química Instrumental de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH. En ella se pudo determinar los grupos funcionales presentes en la superficie de la materia prima, carbón de la cascarilla de arroz y del carbón activado en un rango espectral de 400 cm^{-1} hasta 4000 cm^{-1} . Para los análisis se recoge una mínima cantidad de muestra y se coloca sobre el lente del equipo JASCP FTIR-4100 empezando a realizar las lecturas correspondientes de manera automática.

2.2.4.2. Microscopia Electrónica de Barrido

El microscopio electrónico de barrido construye una imagen virtual a partir de alguna de las señales emitidas por la muestra y se va formando a medida a medida que el haz de electrones se desplaza sobre una porción de su superficie. La imagen se visualiza en un tubo de rayos catódicos donde las bobinas de deflexión del haz están sincronizadas con el barrido del haz de electrones en el microscopio. Modulando la intensidad del haz del tubo de rayos catódicos se obtiene finalmente un registro punto a punto en la pantalla que es precisamente la imagen electrónica proporcionada por el microscopio (Ipohorski and Bozzano 2013, pp. 45–47).

El análisis tuvo lugar en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH. Para ello se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido JSM-IT100. Para el análisis se recogió una mínima cantidad de muestra sobre una cinta doble faz y con el uso de una pinza fina se colocó sobre cada uno de los 4 compartimientos del portamuestra. Se realizaron micrografías a tres aumentos para distinguir la porosidad que presenta el carbón activado y así corroborar su eficiencia en el proceso de adsorción.

2.2.4.3. Análisis BET

El análisis BET permite detectar poros, evaluar su morfología, y distribución de tamaños a través de su superficie específica. Se denomina superficie específica al área de la superficie por unidad de masa (m^2/g) de todas las partículas que forman un gramo de material. En el caso de los carbones activados, la superficie de las partículas presenta una alta reactividad fisicoquímica con el medio

lo que implica la existencia de fenómenos como la adsorción de cationes y moléculas de agua o variación de la carga eléctrica y de las fuerzas de atracción-repulsión entre partículas en función del pH, salinidad y temperatura del medio (Colpas, Tarón and González 2017, p. 64). El análisis se ejecutó en el área de Investigación perteneciente a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.

2.3. Diseño Experimental

Para evaluar el efecto combinado de las variables independientes (concentración del agente activante y masa del carbón activado) en la remoción de flúor (variable dependiente), se realizó un diseño factorial multinivel que consta de 27 experimentos. El diseño se ejecutó en un solo bloque y todas las corridas experimentales se realizaron por triplicado. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado ya que esto proporciona protección contra los efectos de las variables ocultas. En la tabla 2-2 se detalla la base del diseño experimental para la adsorción de flúor.

Tabla 2-2. Base del Diseño Experimental para la Adsorción de Flúor

Número de factores experimentales		2	
Número de bloques		1	
Número de respuestas		1	
Número de corridas		27	
Error grados de libertad		19	
Aleatorización		Si	
Factor	Bajo	Alto	Niveles
Concentración	-1,0	1,0	3
Masa	-1,0	1,0	3
Respuesta		Unidades	
Flúor		mg/L	

Fuente: STATGRAPHICS

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los análisis fisicoquímicos realizado a las muestras de agua recolectadas de la comunidad Jesús del Gran Poder se especifican en el ANEXO A, evidenciando que cumple con los requisitos permisibles dispuestos por la norma INEN 1108 a excepción del parámetro de flúor que se encuentra fuera del rango permitido.

3.1. Caracterización de Materia Prima

La cascarilla de arroz (CCA) fue caracterizada mediante un análisis próximo que consistió en determinar el contenido de humedad, cenizas, materias volátiles y carbón fijo del residuo vegetal. Los resultados se muestran en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Análisis Próximo de la Cascarilla de Arroz (CCA)

PARÁMETRO	REPETICIONES			RESULTADO	¹ REFERENCIA
	1	2	3	$\bar{x} \pm SD$	
Humedad (%)	9,395	9,316	9,386	9,366 \pm 0,0432	11,62
Cenizas (%)	19,118	19,059	19,158	19,111 \pm 0,0498	16,94
Materias Volátiles (%)	10,505	10,584	10,514	10,534 \pm 0,0432	12,29
Carbón Fijo (%)	60,982	61,041	60,942	60,989 \pm 0,0498	59,15

*Los resultados se expresan en términos de la media \pm desviación estándar de tres repeticiones.

Fuente: ¹Pereira, Cedeño and Romerosa, 2017.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

El análisis de cenizas es un buen indicador de la calidad del carbón mineral y, por lo tanto, del carbón activado. En la tabla 1-3 se reporta el porcentaje de ceniza en la CCA con un valor de 19,11% encontrándose próximos a los propuestos por Valverde, Sarria and Monteagudo (2007) el cual reporta un promedio del 19,54%. El contenido de ceniza es considerada alto comparado con otras fibras naturales que suelen varían entre el 1 y 8,3%. Adicionalmente se sabe que más del 90% de la ceniza es sílice, lo que explica el bajo contenido de humedad de la cascarilla de arroz (9,36%), ya que la esta posee la capacidad de adsorber agua.

Por otra parte, el contenido de carbón fijo indica que posee un alto porcentaje de carbono disponible para la combustión de carbón. El carbón fijo obtenido (60,98%) se encuentra cercano al reportado (59,15%) por Pereira, Cedeño and Romerosa (2017) brindando al material excelentes propiedades como adsorbente.

3.2. Caracterización de Carbón Activado

3.2.1. Rendimiento del Carbón Activado

Bravo and Garzón (2017) indican que el rendimiento aproximado entre materia prima y carbón activado oscila en una relación 3:1. Además, se considera que el rendimiento teórico o ideal de un procedimiento debería ser el 100%, valor que es difícil de alcanzar experimentalmente, por lo que rendimientos cercanos al 100% son denominados cuantitativos. En este sentido, rendimientos sobre el 90% se consideran excelentes, mayor al 80% son calificados como “muy buenos”, superiores al 70% son “buenos”, alrededor del 40 a 50% son “regulares” y por debajo de esta son deficientes.

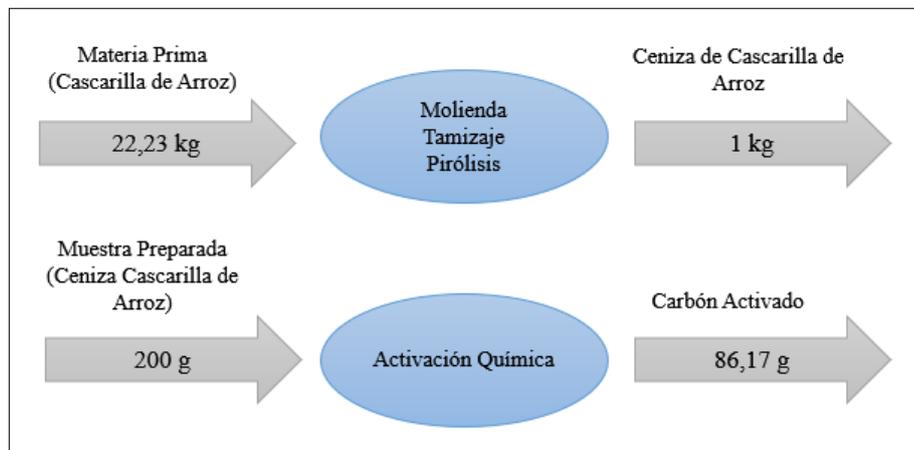


Figura 1-3. Rendimiento del Carbón Activado (CA)

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso carbón activado}}{\text{Peso cascarilla de arroz}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{86,17 \text{ g}}{200 \text{ g}} \times 100 = 43\%$$

Hanum, Bani and Wirani (2017) propone un rendimiento máximo del 49,33% de carbón activado obtenido en condiciones similares al de la presente investigación donde se obtuvo un rendimiento del 43% considerándose como regulares en la escala descrita por (Bravo and Garzón 2017, p. 26).

3.2.2. Análisis fisicoquímicos

En la tabla 2-3, se presenta los resultados de la caracterización fisicoquímica del carbón activado de la cascarilla de arroz, donde se muestra el porcentaje de humedad, cenizas, materias volátiles y carbón fijo.

Tabla 2-3. Análisis Fisicoquímico del Carbón Activado (CA)

PARÁMETRO	REPETICIONES			RESULTADO
	1	2	3	$\bar{x} \pm SD$
Humedad (%)	3,343	3,174	3,256	3,257 \pm 0,0432
Cenizas (%)	10,522	11,138	10,887	10,848 \pm 0,0498
Materias Volátiles (%)	15,505	15,584	15,714	15,601 \pm 0,0432
Carbón Fijo (%)	70,293	70,294	70,295	70,294 \pm 0,0498

*Los resultados se expresan en términos de la media \pm desviación estándar de tres repeticiones

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En la tabla 2-3 el porcentaje de humedad es de 3,25%; valor que se encuentra por debajo del establecido por la Norma NTE INEN 1991:1994 1995-1 (INEN 1991, p. 3), la cual señala un máximo del 12% en el contenido de humedad para el carbón activado de uso industrial. El contenido de cenizas (10,84%) y materia volátil (15,60%) son porcentajes relativamente bajos, por efecto de la carbonización de la cascarilla de arroz. Vera and Morocho (2015), en experimentaciones similares en la síntesis del carbón activado establece un promedio del 66,82% de carbón fijo, valor muy cercano al de este estudio 70,293% confiriéndole una gran capacidad de adsorción. Según Alam et al. (2020) afirma que una gran cantidad de contenido de cenizas no debería estar presente en los precursores ya que puede obstaculizar el desarrollo de poros durante el tratamiento térmico justificando el proceso de pirolisis previo a la producción de carbón activado. Como resultado, el área superficial del CA sintetizado a partir de materiales lignocelulósicos con bajo contenido de cenizas se vuelve más alta que en la CCA sin procesar (Alam et al. 2020, p. 4). Además, el contenido de ceniza se ajusta de manera correcta a la norma NTE INEN 1991:1994 la cual sugiere un máximo del 12% m/m. Sin embargo, el contenido de carbón fijo es superior al 50% indicando una menor cantidad de impurezas en el CA favoreciendo a la eficiencia del adsorbente.

3.2.3. Análisis de espectroscopia FT-IR

A continuación, se presentan los espectros FT-IR de la materia prima (CCA), el carbón de la cascarilla de arroz y el carbón activado sintetizado con ácido fosfórico al 65%, 75% y 85%.

3.2.3.1. Espectro FT-IR de la Cascarilla de Arroz (CCA)

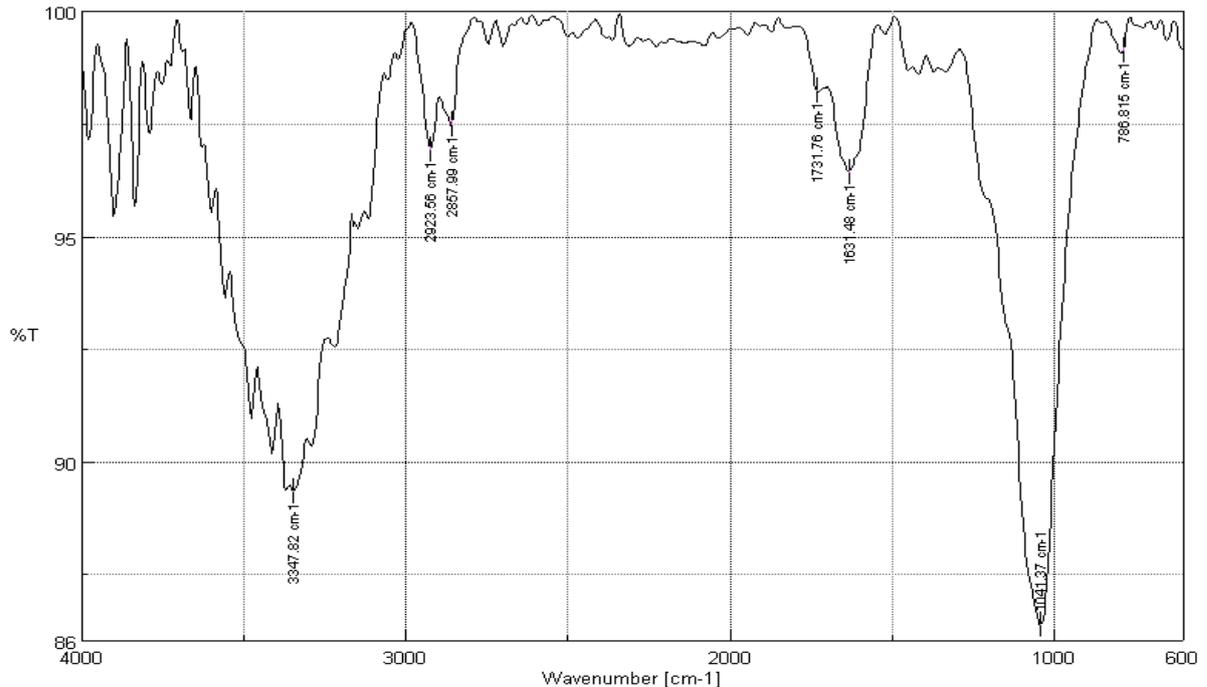


Figura 2-3. Espectro Infrarrojo de la Cascarilla de Arroz (CCA)

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

La figura 2-3 muestra un espectro FT-IR para la cascarilla de arroz en donde se observa bandas de absorción características para los grupos funcionales de compuestos orgánicos. La cascarilla de arroz presenta compuestos tales como lignina y celulosa cuyo grupo funcional es el hidroxilo (-OH). Las bandas $2923,56\text{ cm}^{-1}$, $1731,76\text{ cm}^{-1}$, $1643,54\text{ cm}^{-1}$ y $1631,48\text{ cm}^{-1}$ corresponden a enlaces C=O, C=C y C-H característicos de materiales orgánicos tales como lignocelulosa. Por otra parte, en el rango de los $1041,37\text{ cm}^{-1}$ emerge la banda del grupo funcional Si-O indicando el alto contenido de sílice presente en la muestra. En estudios realizados por Rodríguez et al. (2012) se observa un pico menos pronunciado de la sílice en la banda de los $1087,87\text{ cm}^{-1}$ evidenciándose la diversidad de CCA.

3.2.3.2. Espectro FT-IR de la Cascarilla de Arroz

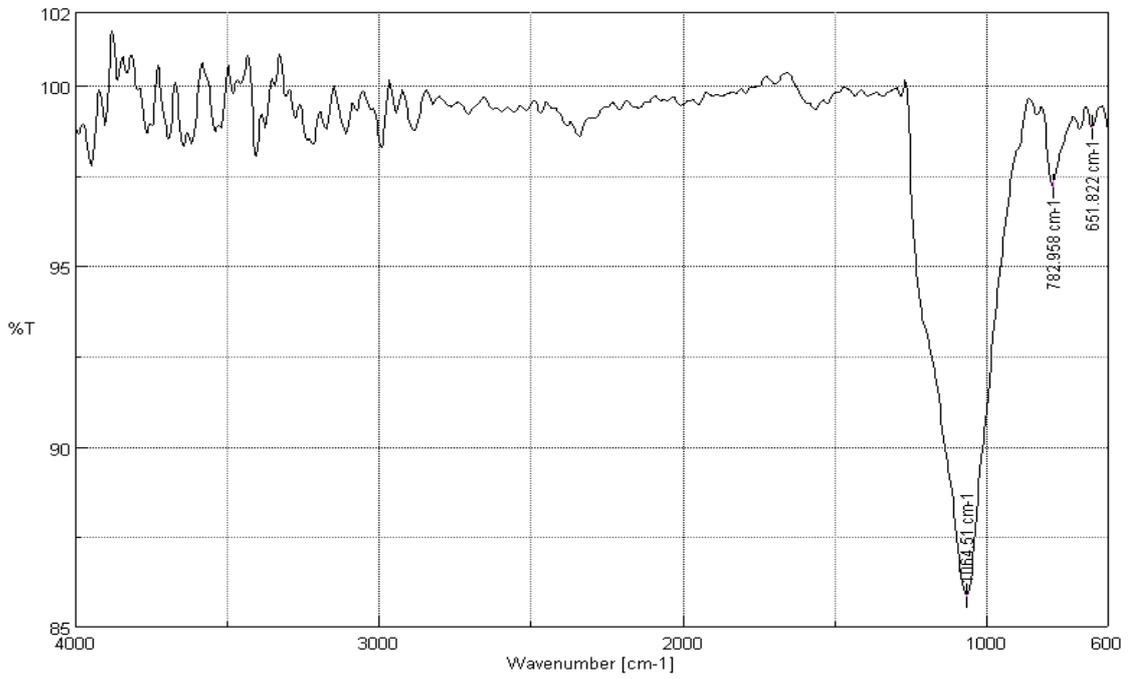


Figura 3-3. Espectro Infrarrojo del carbón de Cascarilla de Arroz

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

La Figura 3-3 se observa el espectro FT-IR para el carbón de cascarilla de arroz, la banda mejor marcada es la de la sílice Si-O y en una menor intensidad la del OH perteneciente a los grupos carboxilo.

3.2.3.3. Espectro FT-IR del Carbón Activado (CA) al 65%

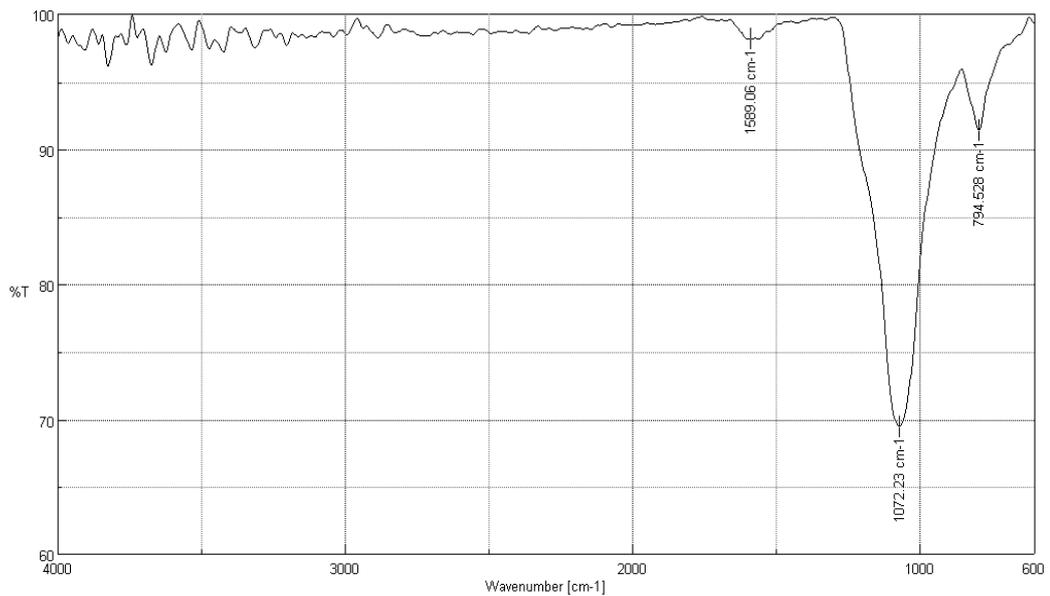


Figura 4-3. Espectro Infrarrojo del Carbón Activado (CA) al 65%

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En la figura 4-3 se ilustra el espectro infrarrojo de la muestra de cascarilla de arroz tratada con H_3PO_4 al 65%. En ella se observa la disminución en la intensidad de las bandas relacionadas con el SiO_2 con el espectro del carbón de la cascarilla de arroz (figura 3-3). Las bandas asociadas con la parte orgánica se hallan alrededor de los 1580 y 1721 cm^{-1} en donde se comienza a predominar la banda ancha representativa del modo vibracional de tensión del enlace $Si - O - Si$ debido a que las bandas asociadas a grupos funcionales de la parte orgánica han desaparecido por su descomposición y posterior volatilización.

3.2.3.4. Espectro FT-IR del Carbón Activado (CA) al 75%

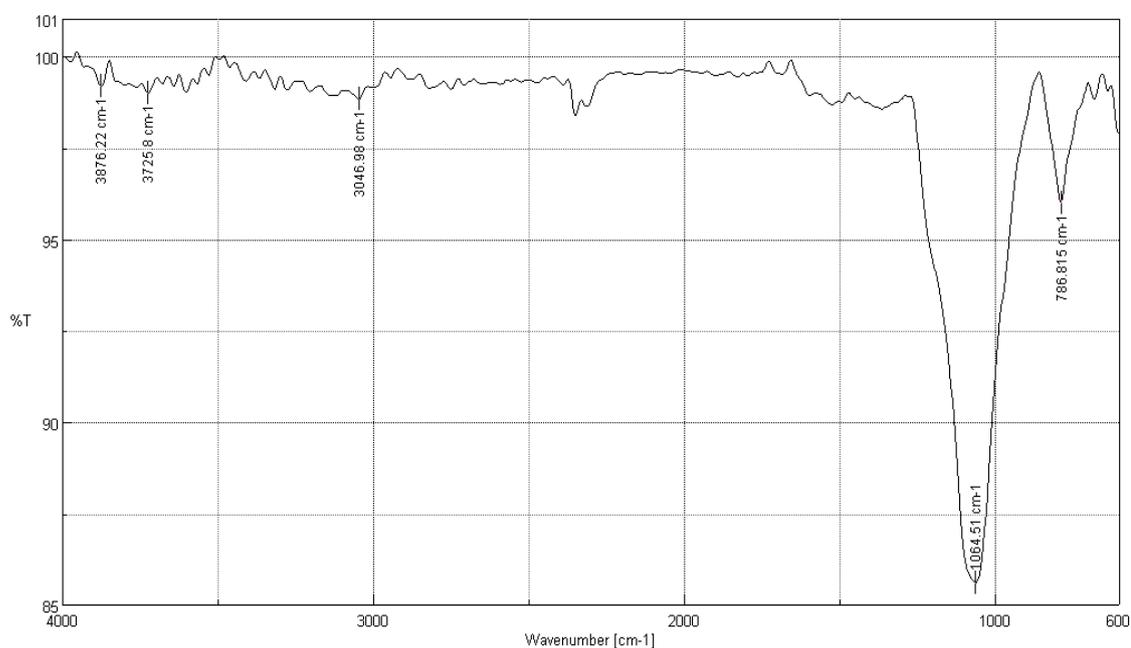


Figura 5-3. Espectro Infrarrojo del Carbón Activado (CA) al 75%

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En la figura 5-3 se observa picos mejor marcados pertenecientes a la sílice. La banda presente en los $1064,51\text{ cm}^{-1}$ corresponde a la sílice (SiO_2) presente en el CA. La banda $3046,98\text{ cm}^{-1}$ corresponde al enlace C-H característico de materiales orgánicos tales como lignocelulosa. Las bandas de $786,52\text{ cm}^{-1}$ corresponde a los estiramientos vibracionales simétricos y asimétricos de los grupos C-H de las cadenas alifáticas. Las bandas presentes en los rangos $1538,92\text{ cm}^{-1}$ y $1604,48\text{ cm}^{-1}$ corresponden a los grupos carbonilo y carboxílico respectivamente y la banda presente en el rango de $3340,1\text{ cm}^{-1}$ indica al estiramiento asimétrico de los enlaces simples de O-H.

3.2.3.5. Espectro FT-IR del Carbón Activado (CA) al 85%

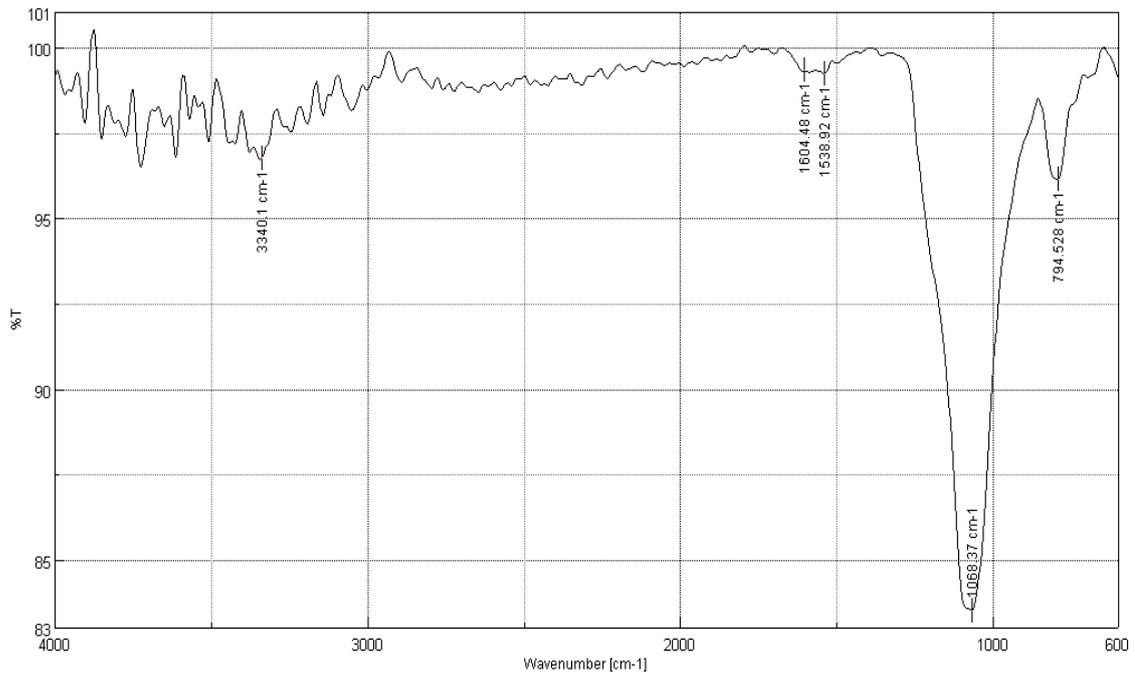


Figura 6-3. Espectro Infrarrojo del Carbón Activado (CA) al 85%

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En la figura 6-3 se observa que el pico mejor marcado pertenece a la sílice. La banda presente en los $1068,37 \text{ cm}^{-1}$ corresponde a la sílice (SiO_2) presente en el CA. Las bandas de $794,53 \text{ cm}^{-1}$ corresponden a los estiramientos vibracionales simétricos y asimétricos de los grupos C-H de las cadenas alifáticas. Las bandas presentes en el rango de $1538,92 \text{ cm}^{-1}$ y $1604,48 \text{ cm}^{-1}$ corresponden a los grupos carbonilo y carboxílico respectivamente mientras que la banda presente en el rango de $3340,1 \text{ cm}^{-1}$ pertenece al estiramiento asimétrico de los enlaces simples de O-H. En base a los espectros FT-IR obtenidos del carbón activado y de acuerdo con estudios similares realizados por Rodríguez, Campos and Pérez (2019), se puede afirmar que el aumento en la absorción en la región entre 3200 y 3600 cm^{-1} (relacionada con la vibración de los grupos OH) y de la banda en 1600 cm^{-1} (relacionada con la vibración del enlace C=O) son cambios evidentes ocasionados por el aumento en la concentración del ácido utilizado durante la activación que generan un aumento en la adsorción de moléculas de agua en la superficie y del grupo de carbonos oxidados respectivamente.

3.2.4. Análisis de microscopía SEM

En la figura 7-3 se presenta las micrografías a diferentes resoluciones del carbón activado al 65%, 75% y 85% con ácido fosfórico.

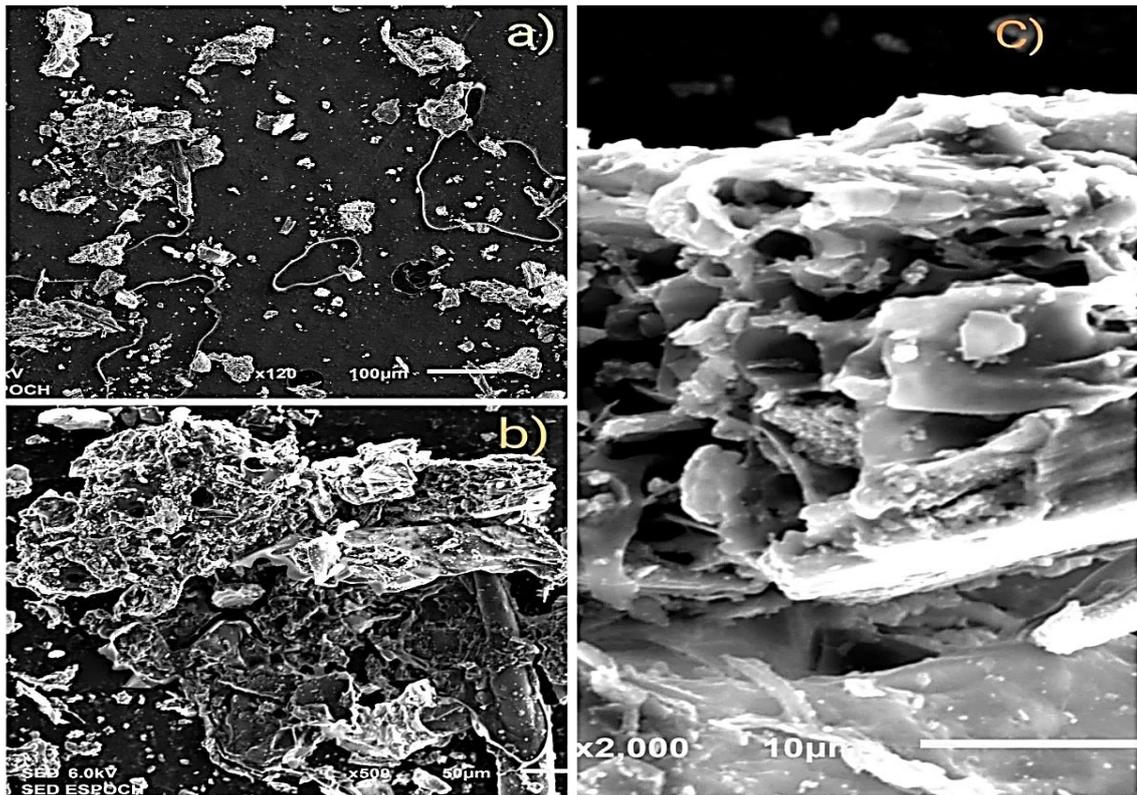


Figura 7-3. Micrografía SEM del Carbón Activado (CA) al 65% a) 1x120, b) 1x500, c) 1x2000
Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

Se realizó un análisis mediante microscopía electrónica para visualizar la superficie del carbón activado con H_3PO_4 al 65%; las imágenes capturadas en este equipo fueron obtenidas en una resolución a 120, 500 y 2000 aumentos. La IUPAC clasifica a los poros de acuerdo con el tamaño de los diámetros. De este modo, los macroporos son aquellos que tienen diámetros mayores a 50 nm, los mesoporos se sitúan entre 50 y 2 nm de diámetro, y los microporos son aquellos con diámetros inferiores a 2 nm (León, G. and León, D. 2020, p. 8).

Tabla 3-3. Radio de los poros del CA al 65%

Área (μm) ²	Radio (nm)
0,016	9,027
0,091	51,341
0,003	1,861
0,034	19,182
Radio promedio	16,293

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

Para medir el área de poro se utilizó el software IMAGEJ en donde se logró medir las superficies de las imágenes obtenidas del SEM. De los datos obtenidos se puede apreciar la presencia de macroporos (20%), mesoporos (60%) y microporos (20%), lo cual favorece el proceso de adsorción. Al realizar el cálculo de varios de los radios de poro se valúa su promedio con el fin de generalizar el radio de poro.

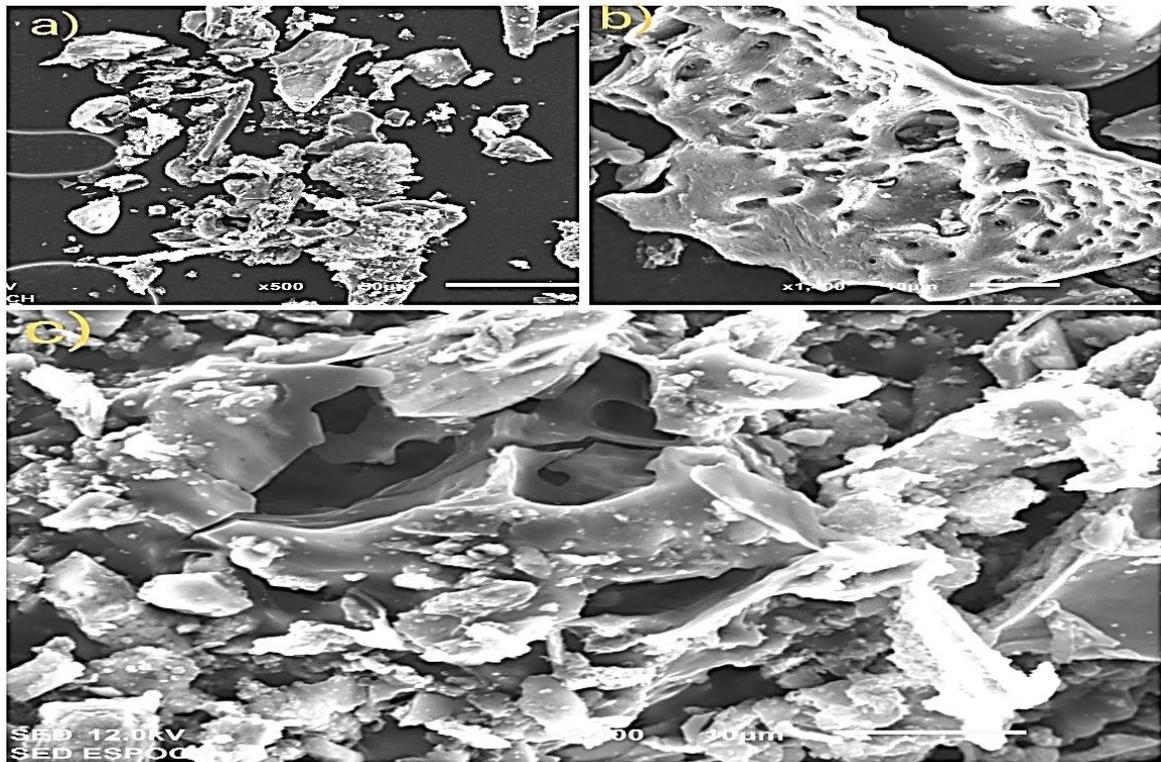


Figura 8-3. Micrografía SEM del Carbón Activado (CA) al 75% a) 1x500, b) 1x1400, c) 1x2000

Realizado por: Guiña, Luis, 2022

En la figura 8-3 se aprecia una estructura superficial heterogénea donde se puede distinguir una superficie formada por mesoporos y microporos indispensables para el proceso de adsorción.

Tabla 4-3. Radio de los poros del CA al 75%

Área (μm^2)	Radio (nm)
0,0033	1,861
0,0090	5,077
0,0027	1,523
0,0240	13,541
0,0122	6,882
Radio promedio	5,777

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022

Es evidente que al aumentar la concentración de ácido fosfórico incrementa la cantidad de mesoporos (60%) y microporos (40%) en la superficie del CA por lo que teóricamente se espera un mejor rendimiento de adsorción.

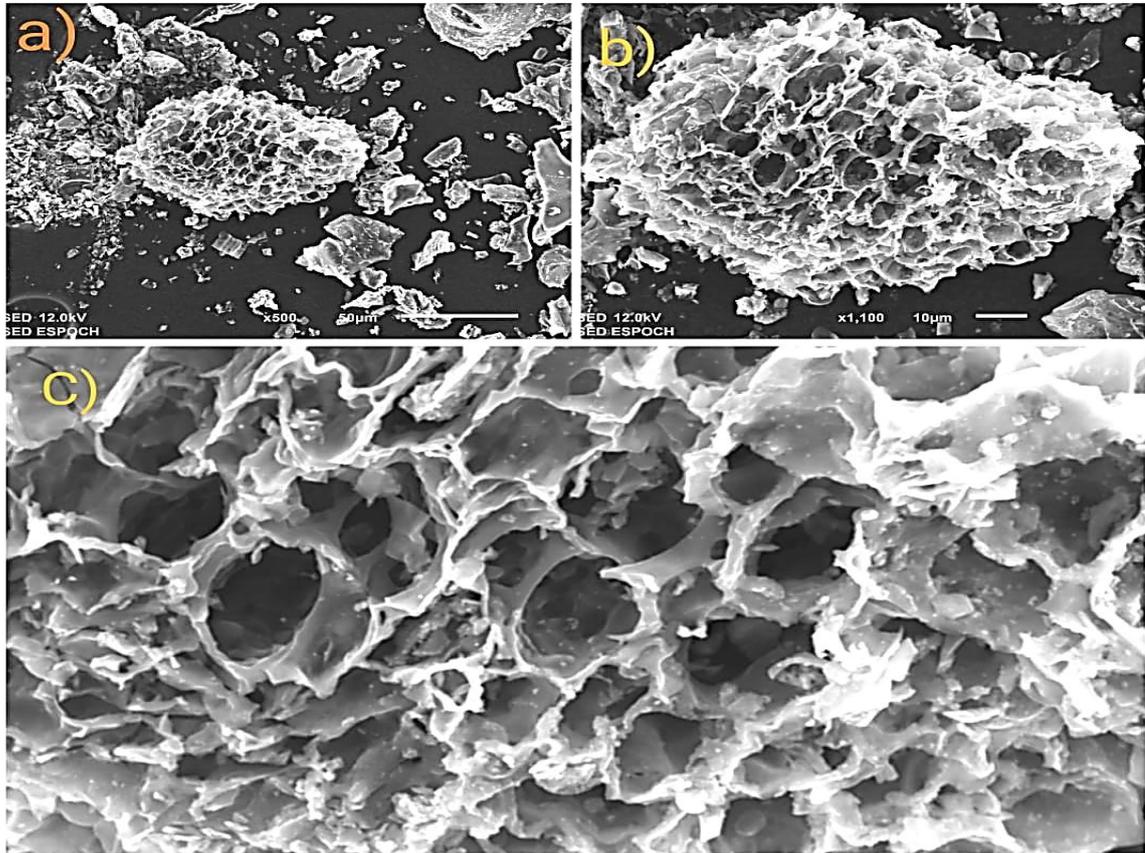


Figura 9-3. Micrografía SEM del Carbón Activado (CA) al 85% a) 1x500, b) 1x1100, c)1x2000

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022

Al observar la figura 9-3 se aprecia una estructura superficial homogénea comparado con las caracterizaciones anteriores. En ella se distingue la presencia de mesoporos (40%) y microporos (60%) básicos para el proceso de adsorción. Su estructura homogénea evidencia el efecto del agente activante (H_3PO_4) acompañado del tratamiento de pirólisis sobre la cascarilla de arroz para formar concavidades.

Tabla 5-3. Radio de los poros del CA al 85%

Área (μm^2)	Radio (nm)
0,0031	1,748
0,0028	1,579
0,0024	1,354
0,0090	5,078
0,0042	2,369
Radio promedio	2,425

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022

La activación con ácido fosfórico promueve un proceso de dilatación del material (Rojas, Gutiérrez and Colina 2016, pp 457–460), donde el H_3PO_4 asume un papel de agente deshidratador durante la activación inhibiendo la formación de cualquier líquido que pueda obstruir la formación de poros en la muestra de CCA. Luego de haber removido el agente activante mediante lavados con agua destilada e hidróxido de sodio al 1%, se puede presenciar las cavidades porosas generadas. Esto se puede establecer con las imágenes obtenidas en las figuras 7-3, 8-3 y 9-3. En la figura 9-3 se aprecia una mayor cantidad de microporos (60%) por lo que se asume que la adsorción de flúor es más eficiente con respecto a los carbones activados a 65% y 75%. En trabajos similares se obtuvieron poros con un tamaño mayor a los 1,5 nm ideal para el proceso de adsorción. Rodríguez, Campos and Pérez (2019) sugiere un tamaño de poro superior a los 1,3 nm para que el proceso de remoción se lleve a cabo.

3.2.5. *Análisis BET*

El carbón activado sintetizado a una concentración del 85% de ácido fosfórico, mostró un área superficial de $780,0 \text{ m}^2/\text{g}$ (ANEXO B) que al ser comparada con los valores de referencia de la tabla 6-3 se evidencia que el área superficial aumenta según crece la relación del agente activante (H_3PO_4) en que se sumerja el carbón de la cascarilla de arroz. Dado que el área superficial está directamente relacionada con la porosidad de la muestra que se ha formado de la activación química posterior al tratamiento químico-térmico el área superficial acrecienta mejorando el proceso de adsorción. De este modo, se establece que la superficie específica BET del adsorbente sintetizado cumple con el requisito establecido por la norma NTE INEN1991:1994 1995-10; misma que manifiesta un mínimo de $600 \text{ m}^2/\text{g}$ (INEN 1991, p. 3).

Tabla 6-3. Referencias del Área Superficial BET para CA de Cascarilla de Arroz

Material (Nombre)	Tratamiento	Área superficial
CB	Blanco, cenizas sin activar	141
CA1	Cenizas + H ₃ PO ₄ relación 1:1	160
CA2	Cenizas + H ₃ PO ₄ relación 1:2	225
CA3	Cenizas + H ₃ PO ₄ relación 1:3	312

Fuente: Rodríguez, Campos and Pérez 2019.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

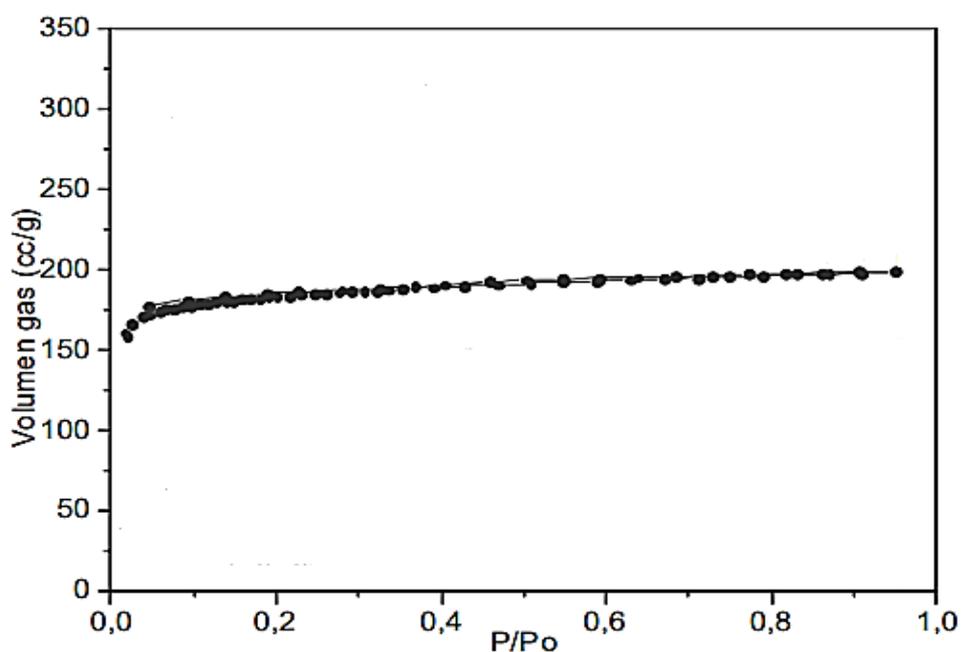


Figura 10-3. Isotermas de adsorción con N₂ a 77 K de los carbones activados

Fuente: Área de Investigación, Universidad Central del Ecuador, 2022.

En las isotermas de adsorción con N₂ a 77 K (figura 10-3), se observa que el carbono forma una especie de codo característico de las isotermas de adsorción tipo 1 o Langmuir a presiones cercanas a 0,1. Este tipo de isoterma es característica de sólidos microporosos muy comunes en carbones activados en donde el llenado de los poros se da en una sola capa o monocapa (García and Martí 2020, pp 244–248). Para este tipo de isoterma, cada poro del sólido puede albergar una sola molécula de N₂, teniendo los poros igual actividad para la adsorción.

3.3. Evaluación de la Adsorción de Flúor (F⁻)

En la tabla 7-3 se presentan los datos de la adsorción de flúor que se realizó a nivel de laboratorio. Para ello se utilizó una solución patrón de F⁻ con una concentración de 1,97 mg/L y se pesaron 2, 6 y 10 g de carbón activado al 85%.

Tabla 7-3. Prueba de laboratorio para la Adsorción de Flúor

CONCENTRACIÓN DE FLÚOR (mg/L)	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO (%)	MASA DEL ADSORBENTE (g)	CONCENTRACIÓN DEL ADSORBATO EN LA SOLUCIÓN (ppm)
	85	2	1,88
		6	1,57
		10	1,22

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

El agua recolectada en la comunidad Jesús del Gran Poder, presenta una concentración de 1,99 mg/L iones F⁻. En la tabla 8-3 se registran los datos de adsorción a nivel de campo utilizando 2, 6 y 10 g de carbón activado al 65%, 75% y 85% respectivamente.

Tabla 8-3. Prueba de campo para la Adsorción de Flúor

CONCENTRACIÓN DE FLÚOR (mg/L)	CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO (%)	MASA DEL ADSORBENTE(g)	CONCENTRACIÓN DEL ADSORBATO EN LA SOLUCIÓN (ppm)
1,99	65	2	1,94
			1,93
			1,95
		6	1,65
			1,65
			1,64
		10	1,22
			1,21
			1,21
	75	2	1,91
			1,92
			1,91
		6	1,59
			1,59
			1,61
			1,17

		10	1,18
			1,18
		2	1,88
1,89			
1,88			
85	6	1,55	
		1,56	
		1,56	
	10	1,12	
		1,12	
		1,11	

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

Comparando los resultados de la tabla 7-3 con los valores de la tabla 8-3, se evidencia una mayor adsorción en la prueba de campo que en la prueba de laboratorio ya que sus valores fueron 44,22% y 38,07% de iones F⁻ respectivamente.

3.3.1. Análisis de Varianza ANOVA para la Adsorción de Flúor

La masa del carbón activado y la concentración del agente activante tienen respuestas con diferencias significativas sobre la adsorción de flúor en la solución. Cuando el valor P-value es menor a 0,05 y a un nivel de confianza del 95% (tabla 9-3) evidenciando un efecto significativo en la respuesta adsorción al manipular una de las dos variables. El modelo de regresión obtenido para el porcentaje de adsorción de flúor explica el 99% de su variabilidad en el carbón activado obtenido a partir de cascarilla de arroz.

Tabla 9-3. Análisis de Varianza ANOVA para la Adsorción de Flúor

Fuente	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: concentración	0,0296056	1	0,0296056	446,45	0,0000
B: masa	2,48645	1	2,48645	37495,14	0,0000
AA	0,0000462963	1	0,0000462963	0,70	0,4128
AB	0,0012	1	0,0012	18,10	0,0004
BB	0,0212019	1	0,0212019	319,72	0,0000
Total, Error	0,00139259	21	0,0000663139		

Total (Corregido)	2,5399	26			
--------------------------	--------	----	--	--	--

Fuente: STATGRAPHICS.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

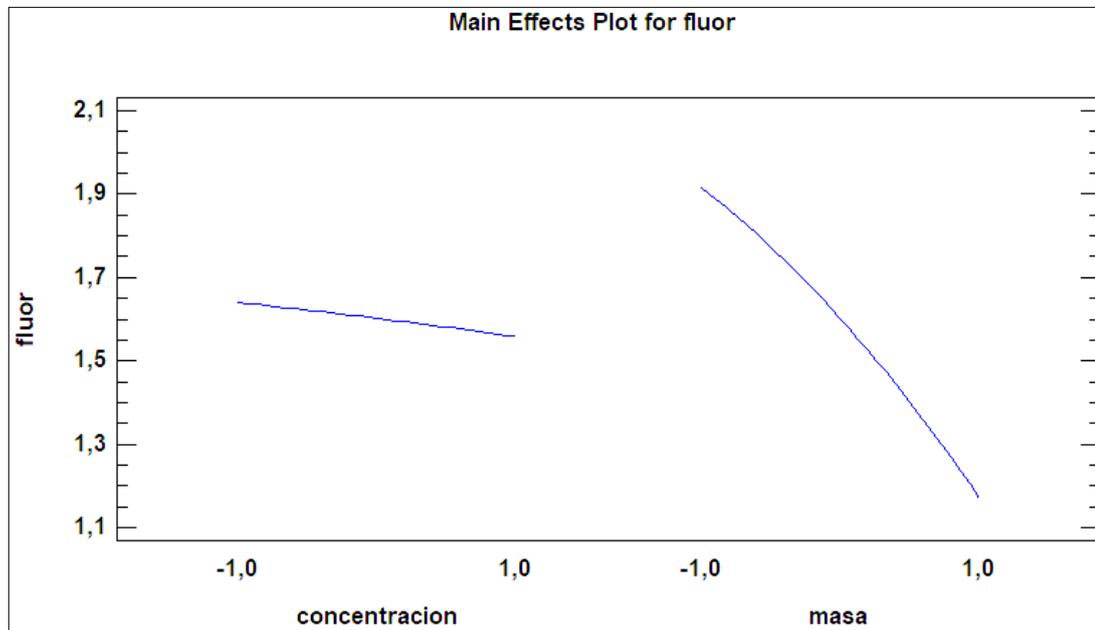


Gráfico 1-3. Efectos principales del CA en la adsorción de Flúor

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En el grafico 1-3 se aprecia dos curvas por separado; donde la masa de carbón activado varía desde el nivel más bajo (2g) al nivel más alto (10g) demostrando que la adsorción de flúor aumenta significativamente a medida que variamos el gramaje del adsorbente. Al manipular la variable concentración el efecto es mínimo y genera una ligera variación en la concentración del adsorbato en la solución.

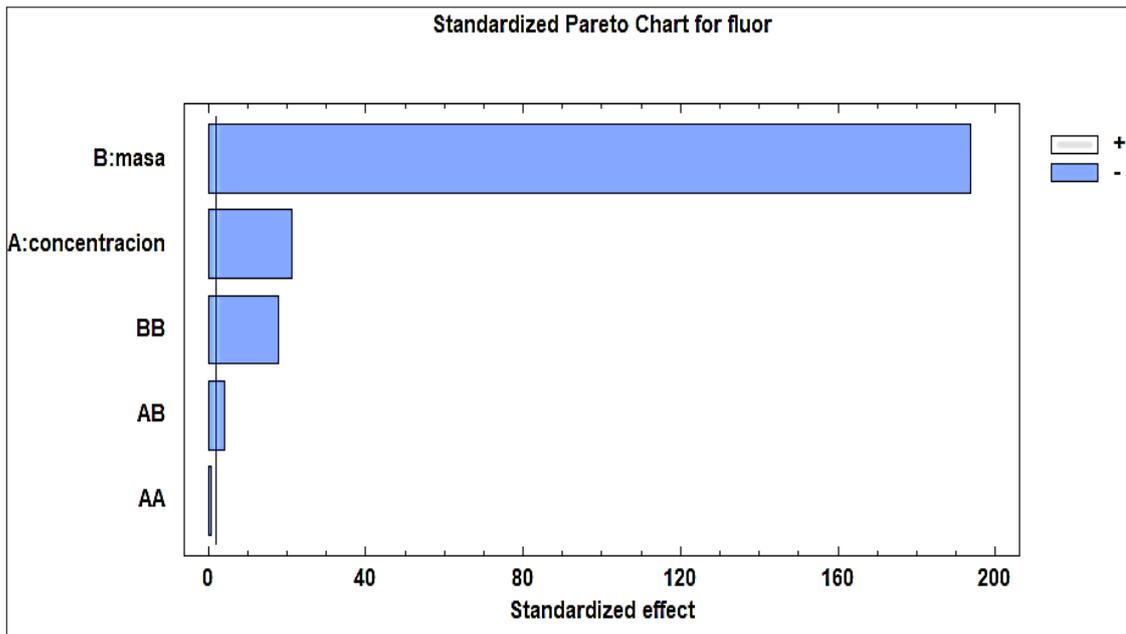


Gráfico 2-3. Gráfico de Pareto sobre los efectos principales del CA en la adsorción de Flúor
Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

Del gráfico 2-3 se puede establecer que el factor B (masa) y A (concentración) son los factores más determinantes sobre la adsorción de flúor. El diagrama de Pareto nos ayuda a determinar los efectos estandarizados de mayor a menor demostrando una mejor adsorción cuando se manipula la masa del carbón activado y no la concentración del agente activante.

Tabla 10-3. Coeficiente de Regresión para la Adsorción de Flúor

Coeficiente	Estimado
Constante	1,60185
A: concentración	-0,0405556
B: masa	-0,371667
AA	-0,00277778
AB	-0,01
BB	-0,0594444
$\text{FLÚOR} = 1,60185 - 0,0405556 * \text{concentración} - 0,371667 * \text{masa} - 0,00277778 * \text{concentración}^2 - 0,01 * \text{concentración} * \text{masa} - 0,0594444 * \text{masa}^2$	

Fuente: STATGRAPHICS.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En la tabla 10-3 se indica la ecuación ajustada del modelo estadístico, en ella se describe el comportamiento de la respuesta adsorción de flúor en función del momento en el que se manipulan las variables concentración y masa del carbón activado. La calidad del modelo ajustado

se evaluó en base al coeficiente de determinación R^2 donde se reflejó un valor de 0,9991, indicando una buena correlación entre datos experimentales predichos por el modelo.

3.3.2. Optimización de la concentración y masa para la adsorción de flúor

La optimización permite mejorar un proceso al ajustar sus parámetros con la finalidad de minimizar costos y maximizar el rendimiento, la productividad y la eficiencia del sistema de filtrado (SYDLE 2022). En base a ello, se optimizaron las variables concentración del agente activante y masa del carbón activado para mejorar el proceso de adsorción el cual nos permita mantener la concentración de flúor por debajo de los 1,5 ppm ajustándose al parámetro de calidad que establece la Norma INEN 1108 - quinta revisión. Los valores óptimos para remover flúor hasta los 1,5 son: ácido fosfórico a una concentración del 83,7% y 7,5g del adsorbente (CA).

Tabla 11-3. Respuesta de Optimización para la Adsorción de Flúor

Objetivo: Mantener el flúor a 1,5 ppm			
Valor óptimo = 1,5			
Factor	Bajo	Alto	Valor óptimo
Concentración	-1,0	1,0	0,977008
Masa	-1,0	1,0	0,152564

Fuente: STATGRAPHICS.

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En el grafico 3-3 se observa el efecto de las variables masa y concentración con sus respectivas interacciones para la adsorción de flúor. Para ello se usó la ecuación del modelo ajustado para generar varias superficies de respuesta con el fin de entender el efecto de las variables sobre el adsorbato.

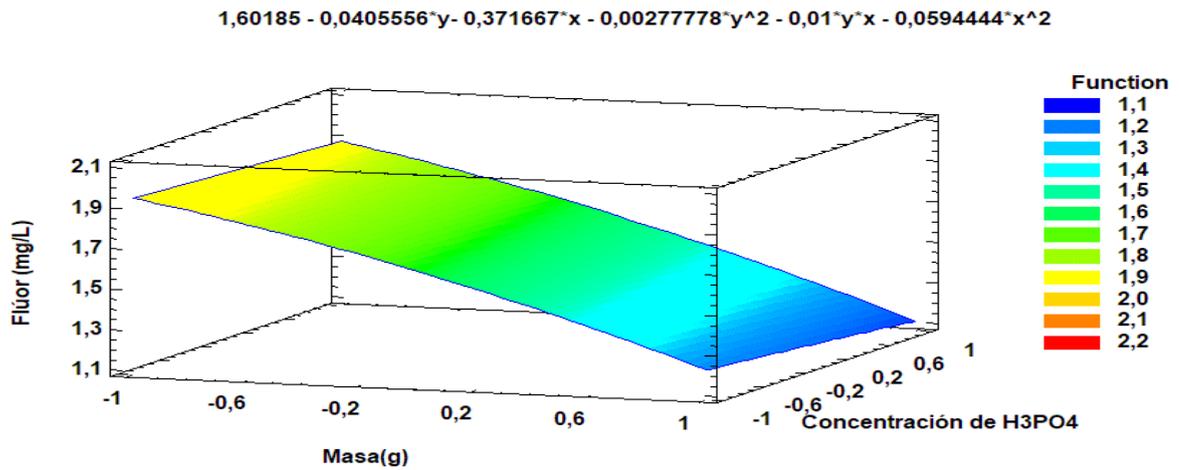


Gráfico 3-3. Superficies de respuesta estimadas para los efectos interactivos Masa vs Concentración de H₃PO₄

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

3.3.3. *Isotermas de Adsorción de Langmuir y Freundlich*

Para determinar la eficiencia del carbón activado en el proceso de adsorción es necesario recurrir al uso de las isotermas. En la tabla 12-3 y 13-3 se describen los resultados de los modelos de Langmuir y Freundlich en base a los datos experimentales del equilibrio de adsorción de los iones F⁻ en el adsorbente y el adsorbato libre. Con el fin de determinar el tipo de isoterma que mejor describe el proceso de adsorción se desarrollaron pruebas de remoción a diferentes concentraciones de ácido fosfórico y masa de carbón activado donde la concentración inicial de flúor fue de 1,99 mg/L.

Tabla 12-3. Variación de la capacidad de adsorción de Flúor en función a la concentración de H₃PO₄ y masa de CA – Isoterma de Langmuir

Concentración de H ₃ PO ₄ %	Masa CA(g)	C=Eje X (adsorbato)	q	Eje Y (C/q)
65	2	1,94	0,000025	77600
		1,91	0,00004	47750
		1,95	0,00002	97500
	6	1,65	5,66667E-05	29117,6471
		1,65	5,66667E-05	29117,6471
		1,64	5,83333E-05	28114,2857
	10	1,22	0,000077	15844,1558
		1,21	0,000078	15512,8205
		1,21	0,000078	15512,8205
75	2	1,91	0,00004	47750
		1,92	0,000035	54857,1429
		1,91	0,00004	47750
	6	1,59	6,66667E-05	23850
		1,59	6,66667E-05	23850
		1,61	6,33333E-05	25421,0526
	10	1,17	0,000082	14268,2927
		1,18	0,000081	14567,9012
		1,18	0,000081	14567,9012
85	2	1,88	0,000055	34181,8182
		1,89	0,00005	37800
		1,88	0,000055	34181,8182
	6	1,55	7,33333E-05	21136,3636
		1,56	7,16667E-05	21767,4419
		1,56	7,16667E-05	21767,4419
	10	1,12	0,000087	12873,5632
		1,11	0,000088	12613,6364
		1,11	0,000088	12613,6364

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

Tabla 13-3. Variación de la capacidad de adsorción de Flúor en función a la concentración de H₃PO₄ y masa de CA – Isoterma de Freundlich

Concentración de H ₃ PO ₄ %	Masa CA(g)	C= (adsorbato)	q	Eje X (log q)	Eje Y (log q)
65	2	1,94	0,000025	0,28780173	-4,60205999
		1,91	0,00004	0,28103337	-4,39794001
		1,95	0,00002	0,29003461	-4,69897
	6	1,65	5,66667E-05	0,21748394	-4,24667233
		1,65	5,66667E-05	0,21748394	-4,24667233
		1,64	5,83333E-05	0,21484385	-4,23408321
	10	1,22	0,000077	0,08635983	-4,11350927
		1,21	0,000078	0,08278537	-4,1079054
		1,21	0,000078	0,08278537	-4,1079054
75	2	1,91	0,00004	0,28103337	-4,39794001
		1,92	0,000035	0,28330123	-4,45593196
		1,91	0,00004	0,28103337	-4,39794001
	6	1,59	6,66667E-05	0,20139712	-4,17609126
		1,59	6,66667E-05	0,20139712	-4,17609126
		1,61	6,33333E-05	0,20682588	-4,19836765
	10	1,17	0,000082	0,06818586	-4,08618615
		1,18	0,000081	0,07188201	-4,09151498
		1,18	0,000081	0,07188201	-4,09151498
85	2	1,88	0,000055	0,27415785	-4,25963731
		1,89	0,00005	0,2764618	-4,30103
		1,88	0,000055	0,27415785	-4,25963731
	6	1,55	7,33333E-05	0,1903317	-4,13469857
		1,56	7,16667E-05	0,1931246	-4,14468279
		1,56	7,16667E-05	0,1931246	-4,14468279
	10	1,12	0,000087	0,04921802	-4,06048075
		1,11	0,000088	0,04532298	-4,05551733
		1,11	0,000088	0,04532298	-4,05551733

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

Las representaciones graficas de los isotermas son descritas en el gráfico 4-3 y 5-3 describiendo al modelo de Langmuir y de Freundlich respectivamente.

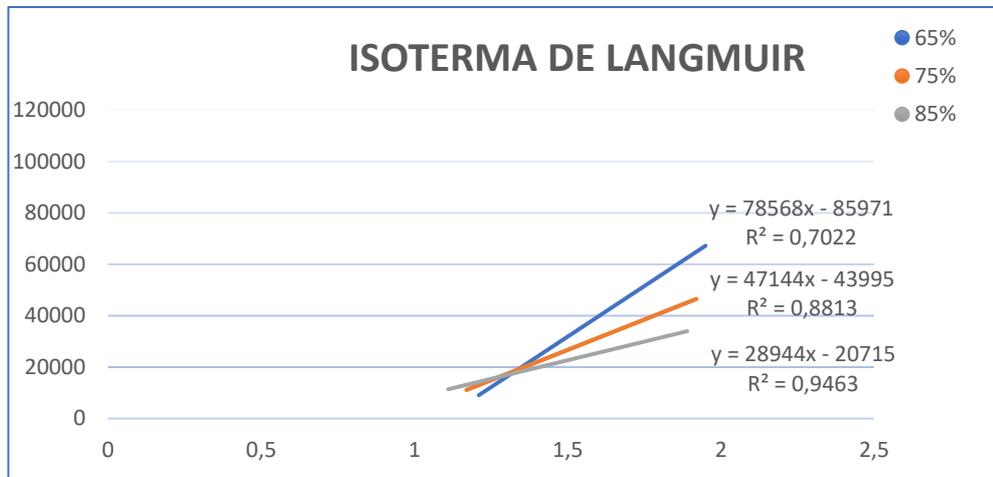


Gráfico 4-3. Ajuste de datos al modelo de Isoterma de Adsorción de Langmuir

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

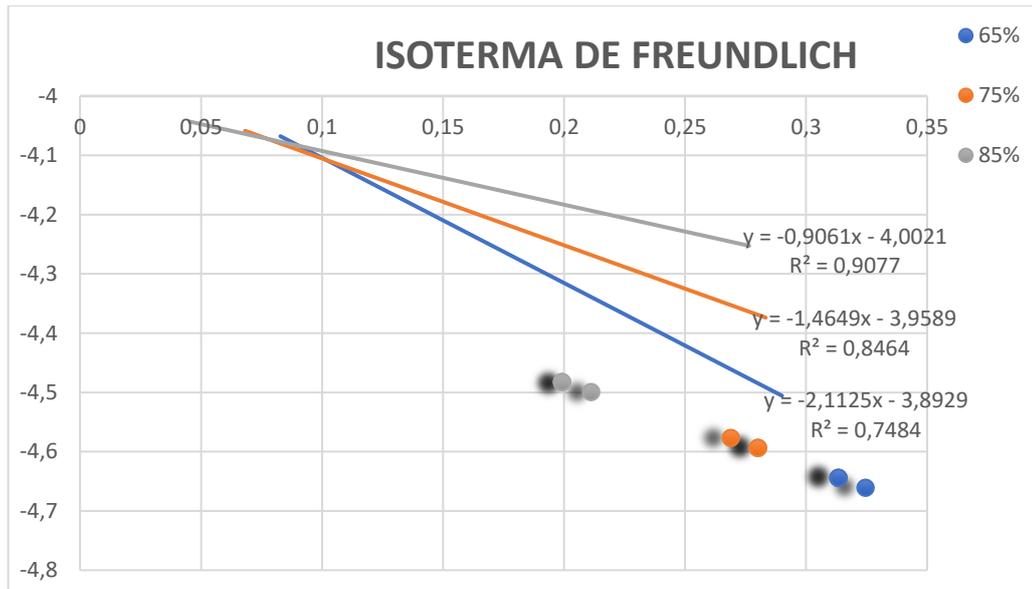


Gráfico 5-3. Ajuste de datos al modelo de Isoterma de Adsorción de Freundlich

Realizado por: Guaiña, Luis, 2022.

En la tabla 14-3 se presentan los valores de las constantes isotérmicas de los dos modelos de adsorción junto con su coeficiente de determinación (R^2). Dado que R^2 toma valores máximos de 0,9463 para Langmuir y 0,9077 para Freundlich se puede concluir que el proceso de adsorción se describe de mejor manera mediante la isoterma de Langmuir ya que los parámetros de este modelo aumentan con el incremento de la concentración; esto implica que la adsorción de flúor se limita a un proceso en una monocapa sobre la superficie del adsorbente.

Tabla 14-3. Parámetros de las Isotermas de Langmuir y Freundlich para la Adsorción de Flúor a diferentes concentraciones de H₃PO₄

MODELO DE ADSORCIÓN	PARÁMETROS	CONCENTRACIÓN		
		65	75	85
Langmuir	R ²	0,7022	0,8813	0,9463
	K	-0,89	-1,08	-1,38
	b	0,000013	0,000021	0,000035
Freundlich	R ²	0,7484	0,8464	0,9077
	n	-0,47	-0,68	-1,12
	Kd	0,00013	0,00011	0,00009

Realizado por: Guaña, Luis, 2022.

En lo que respecta al isoterma de Langmuir K y b relacionan la capacidad máxima de adsorción (mg/L) y la energía libre de adsorción (L/mg) respectivamente, por lo que de manera teórica el CA tiene la capacidad de remover un máximo de 69,35% iones flúor en la solución. Mientras que el isoterma de Freundlich surge al considerar una superficie heterogénea del adsorbente que muestra una distribución de diferentes sitios de adsorción. Entre sus parámetros n representa la capacidad de adsorción (mg/L) y Kd la intensidad de adsorción, por lo que de manera experimental se esperaría que el adsorbente retenga el 43,71 % iones de flúor presentes en la solución, demostrando así la veracidad de los valores obtenidos en este estudio que fueron del 44,22%.

CONCLUSIONES

La cascarilla de arroz presenta un bajo contenido de humedad (9,36%) y de materias volátiles (10,53%). Sin embargo, el contenido de cenizas (19,11%) es un buen indicador de la calidad de carbón activado y el alto contenido de carbón fijo (60,98%) es ideal para la combustión, brindando al material excelentes propiedades como adsorbente.

El carbón activado presentó mejores resultados de adsorción al utilizar ácido fosfórico al 85%, permitiendo remover hasta un 44,22% de flúor en la solución y alcanzando una concentración (1,11 ppm) que se ajusta a los parámetros de calidad de la Norma INEN 1108.

Los análisis SEM y BET permitieron demostrar que el tamaño de poro disminuye según aumenta la concentración del agente activante en la solución; de este modo el carbón activado al 85% con ácido fosfórico generó un 60% de microporos y un área superficial de 780 m²/g ideales para el proceso de adsorción. Los análisis FT-IR demostraron que los picos predominantes en el carbón activado al 75% y 85% pertenecen a la sílice (SiO₂), evidenciando su alta capacidad de adsorción. Además, se identificaron bandas correspondientes a los grupos de las cadenas alifáticas (C-H), grupos carbonilo, carboxílico y enlaces simples O-H.

En base a los coeficientes de regresión (R²) se puede definir que el proceso de adsorción se ajusta al modelo de la isoterma de Langmuir, la cual se desarrolla en una superficie homogénea logrando remover hasta un 69,35% de iones flúor. Por otra parte, con el modelo de Freundlich se remueve un máximo de 44,22% de flúor en la solución.

RECOMENDACIONES

Se recomienda investigar métodos de post-tratamiento químico en el carbón activado con la finalidad de desarrollar grupos funcionales específicos que favorezcan la remoción de flúor.

En base a los resultados obtenidos de la eficiencia del carbón activado mediante activación química, se recomienda cotejar los valores procedentes de una activación física para validar la eficiencia de adsorción.

Se recomienda realizar la pirolisis a temperaturas diferentes a la del presente estudio, con el fin de comprobar el aumento de porosidad y área superficial del carbón activado y su efecto en el proceso de adsorción.

GLOSARIO

Activación: Es un proceso por el cual los materiales carbonáceos incrementan su superficie específica. Los métodos de activación son: activación química y activación física (NTE INEN 1991, p. 1).

Adsorción Física: Es un proceso en donde el adsorbato se encuentra unido a la superficie del sólido por enlaces débiles mediante interacciones de Van der Waals; la entalpía de adsorción varía entre 10 a 20 kJ/mol y es considerada como un proceso reversible ya que al incrementar la temperatura se reduce la adsorción (Paredes Doig 2011, p. 12).

Análisis BET: Permite detectar poros, evaluar su morfología, y distribución de tamaños a través de su superficie específica; es decir, mediante el área de la superficie por unidad de masa (m^2/g) de todas las partículas que forman un gramo de material (Colpas, Tarón and González 2017, p. 64).

Carbón Activado: Es un material obtenido de la carbonización de materias primas carbonáceas, es un material microporoso formado por microcristales que poseen una relación específica de micro y macro poros, con una superficie interna mayor a $600 \text{ m}^2/\text{g}$, que le confiere altas propiedades de adsorción (NTE INEN 1991, p. 1).

Fluorosis: Es una afección causada por la ingesta excesiva de flúor, que produce cambios en la estructura de los huesos volviéndolos frágiles; las primeras etapas de la fluorosis se caracterizan por aumento de masa ósea detectable radiográficamente. La fluorosis puede ser de dos tipos: dental o esquelética (Puche and Rigalli 2007, p. 50).

Isoterma de Langmuir: Es un modelo teórico válido para la adsorción en una monocapa sobre una superficie completamente homogénea con un número finito de sitios idénticos y específicos de adsorción y con una interacción despreciable entre las moléculas del adsorbato (Figueroa, Moreno and Hormaza 2015, p. 109).

Isoterma de Freundlich: Es un modelo que asume heterogeneidad en la superficie del adsorbente, conformada por múltiples sitios de adsorción con energías características; el calor de adsorción entre adsorbato-adsorbente varía de un sitio a otro y no son equivalentes (Figueroa, Moreno and Hormaza 2015, p. 110).

Muestreo: Es un procedimiento realizado para determinar la calidad de una fuente de agua. Para ello, la muestra debe ser representativa evitando su contaminación en el transcurso de llegada al laboratorio (Gallo et al. 2011, p. 1).

Optimización: Es un proceso que permite mejorar un procedimiento al ajustar sus parámetros con la finalidad de minimizar costos y maximizar el rendimiento, la productividad y la eficiencia del sistema de filtrado (SYDLE 2022).

BIBLIOGRAFÍA

AGUILERA, E., ORTÍZ, J. & SÁNCHEZ, M. “Adsorbentes usados para la deshidratación de gas húmedo dulce”. *Tecnología Química*, vol. 33 (2012) pp. 1–10.

ALAM, M., et al. “The potentiality of rice husk-derived activated carbon: From synthesis to application”. *Processes*, vol. 8, no. 2, (2020) pp. 1–38. ISSN 22279717. DOI 10.3390/pr8020203.

ARCOS, C., PINTO, D. & RODRÍGUEZ, J. “Casarilla de arroz como fuente de SiO₂”. *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 41, (2007), (Colombia) pp. 7–20. ISSN 0120-6230.

ASIMBAYA, C., et al. “Obtención de Carbón Activado a partir de Residuos Lignocelulósicos de Canelo, Laurel y Eucalipto”. *Revista Politécnica Nacional*, vol. 36, no. 3, (2015), (Ecuador) pp. 1–6.

ATSDR. *Public Health Statement*. [en línea]. Atlanta: 2014. [Consulta: 14 December 2021]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp11-c1.pdf>.

BARRAGÁN, P. & ECHEVERRY, N. “Identificación de las Variables Óptimas para la Obtención de Carbón Activado a partir del Precursor Guadua Angustifolia Kunth”. *Revista de la Academia Colombiana De Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, [en línea], 2011, (Colombia) 35(135), pp. 157–166. [Consulta: 7 March 2022]. Disponible en: <https://n9.cl/3f9q4>

BENÍTEZ, J., PACHECO, L. & SANDOVAL, C. Propuesta de un sistema de tratamiento para disminuir fluoruros del agua del pozo de Caserío Escamil (Trabajo de Titulación) (Grado). Universidad De El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Cantón Santa Rosa, Agua Caliente (Chalatenango – El Salvador). 2017. pp. 1-115

BOISCHIO, A. *Flúor en el agua de consumo* [blog]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2003. [Consulta: 19 November 2021]. Disponible en: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=8193:2013-fluor-agua-consumo&Itemid=39798&lang=es.

BONIFACIO, C. & ZEGARRA, M. Evaluación del tiempo de carbonización y concentración del ácido fosfórico en la preparación de carbón activado a partir de la cáscara de naranja valencia

a nivel laboratorio (Trabajo de Titulación) (Grado). [en línea] Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química. Huancayo (Perú). 2019. pp. 16-75 [Consulta: 18 March 2022]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5467/Bonifacio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

BRAVO, K. & GARZÓN, A. Eficiencia del Carbón Activado Procedente del Residuo Agroindustrial de Coco (*Cocos Nucifera*) para Remoción de Contaminantes en Agua (Trabajo de Titulación) (Grado). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Facultad de Medio Ambiente. (Calceta – Ecuador). 2017. pp. 1-50

CARRILLO, Y. & SÁNCHEZ, N. Elaboración de un Filtro a base de Carbón Activado obtenido del Endocarpio de Coco con el propósito de reducir la dureza en el Agua Potable (Trabajo de Titulación) (Grado). Universidad de El Salvador, Facultad de Química y Farmacia. (San Salvador - El Salvador). 2013. pp. 22-90

CASTILLO, D. & GONZALES, H. *Manual del Carbón Activo*. [en línea]. Sevilla – España: Aguedia.net, 2015. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: www.aguedia.net.

CHEMVIRON. *Carbón Activado* [blog]. Chemviron: Kuraray Company, 2022. [Consulta: 5 March 2022]. Disponible en: <https://www.chemviron.eu/products/activated-carbon/>.

CNA. *Agua en el Mundo*. 8° ed. S.I. – México: Estadísticas del Agua en México, 2011. Pp. 114-126

COLPAS, F., TARÓN, A. & GONZÁLEZ, R. “Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola *Saccharum officinarum*”. *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 34, no. 2 (2017), (Colombia) pp. 62–72. ISSN 0120-0135. DOI 10.22267/rcia.173402.72.

CONDORCHEM ENVITECH. *La ósmosis inversa y sus diferentes aplicaciones*. [blog]. S.I., 2022. [Consulta: 10 March 2022]. Disponible en: <https://condorchem.com/es/blog/la-osmosis-inversa-y-sus-diferentes-aplicaciones/>.

DESHMUKH, W., ATTAR, S.J. & WAGHMARE, M.D. “Investigation on Sorption of Fluoride in Water Using Rice Husk as an Adsorbent”. *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 8, no. 2 (2009), (India) pp. 217–223.

ECUACIÓN DE FREUNDLICH. *Ecuación de Freundlich* [blog]. S.l., 2012. [Consulta: 15 March 2022]. Disponible en: https://hmong.es/wiki/Freundlich_equation.

FIGUEROA, D., MORENO, A. & HORMAZA, A. “Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz”. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, [en línea], 2015, (Colombia) 14(26), pp. 105–120. [Consulta: 15 March 2022]. ISSN 1692 - 332. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n26/v14n26a08.pdf>.

GALLO, L., et al. *Protocolo de Muestreo, Transporte y Conservación de Muestras de Agua con Fines Múltiples*. Buenos Aires – Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2011. pp. 1-11.

GARCÍA, V. & MARTÍ, E. *Operaciones Básicas en la Industria Química*. Madrid - España: Editorial Síntesis, 2020. ISBN 978-84-917150-2-3., pp. 17-323.

GHOSH, S., CHATTERJEE, A. & GANGULY, S. “A Novel Technique for Fluoride Removal from Drinking Water using Rice Husk Charcoal”. *Strategic Technologies of Complex* [en línea], 2014, (India) pp. 186–190. [Consulta: 16 December 2021]. ISBN: 978-93-83083-85-5. Disponible en: chrome-extension://oemmndcblldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.krishisanskriti.org/vol_image/10Sep201512090330.pdf.

GRISALES, A. & ROJAS, W. *Obtención de Carbón Activado a partir de Activación Química (Trabajo de Titulación) (Grado)*. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología, Programa de Tecnología Química. (Pereira – Colombia). 2016. pp. 14-93

HACH. *Manual de Análisis de Agua* [en línea]. 2da ed. Colorado – Estados Unidos: HACH COMPANY, 2000. [Consulta: 13 February 2022]. Disponible en: <http://www.hach.com>.

HANUM, F., BANI, O. & WIRANI, L. “Characterization of activated carbon from rice husk by HCl activation and its application for lead (Pb) removal in car battery wastewater”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 180, no. 1 (2017), (S.l), pp. 2–12. DOI 10.1088/1757-899X/180/1/012151.

HUÍZAR, R., CARRILLO, J. & JUÁREZ, F. “Fluoruro en el Agua Subterránea: Niveles, Origen y Control Natural en la Región de Tenextepango”. *Investigaciones Geográficas (Mx)* [en

línea], 2016, (México) no. 90, pp. 40–58. [Consulta: 20 May 2022]. ISSN 0188-4611. DOI 10.14350/rig.47374. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56946869005>.

IGRAC. *¿Qué es el agua subterránea?* [blog]. International Groundwater Resources Assessment Centre, 2011. [Consulta: 23 February 2022]. Disponible en: <https://www.unigrac.org/es/es/que-es-agua-subterranea>.

IPOHORSKI, M. & BOZZANO, P. “Microscopía Electrónica de Barrido en la Caracterización de Materiales. *Ciencia e Investigación*, vol. 63, no. 3 (2013), (México) pp. 43–53.

LENNTECH. *Chemical properties of fluorine - Health effects of fluorine - Environmental effects of fluorine* [blog]. Estados Unidos: 2022. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/f.htm>.

LEÓN, G. & LEÓN, D. *Uso del carbón activado en la industria cosmética*. [en línea]. 2da ed. S.l.: Corporación Universitaria Rafael Núñez, 2019. [Consulta: 16 February 2022]. Disponible en: <http://site.curn.edu.co:8080/jspui/handle/123456789/302>.

LITEPLO, R., et al. *Fluorides* [en línea]. Ginebra–Suiza: World Health Organization, 2002. [Consulta: 19 November 2021]. Disponible en: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/42415/1/WHO_EHC_227.pdf.

LLANOS PÁEZ, O., et al. “La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación”. *Producción + Limpia* [en línea], 2016, (S.l.) 11(2), pp. 150–160. [Consulta: 5 June 2022]. ISSN 19090455. DOI 10.22507/pml.v11n2a12. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200013.

LÓPEZ, M. Evaluación de las Semillas de *Moringa Oleífera* para la Remoción de Fluoruros en Aguas de Consumo Humano (Trabajo de Titulación) (Grado). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. (Quito – Ecuador). 2018. pp. 1-86

LUNA, D., et al. “Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco”. *ContactoS 64*, (2007), (México) pp. 39–48.

MEDICAL NEWS TODA. *Fluoride: Risks, uses, and side effects.* [blog]. S.l: Yvette Brazier, 21 de febrero, 2018. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/154164#risks>.

NAVARRETE, D., QUIJANO, N. & VÉLEZ, C. Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante (Trabajo de Titulación) (Grado). [en línea] Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. (Guayaquil – Ecuador). 2014. pp. 20-172 [Consulta: 18 March 2022]. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/29845/1/D-70080.pdf>.

NTE INEN 1991:1994. *Productos Químicos Industriales. Carbón Activado para Uso Industrial. Requisitos.*

NTE INEN 1108:2014. *Requisitos para Agua Potable.* [en línea], [Consulta: 19 November 2021]. Disponible en: [chrome-extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.pudeleco.com/files/a16057d.pdf](http://www.pudeleco.com/files/a16057d.pdf)

OBREGÓN, D. Estudio Comparativo de la Capacidad de Adsorción de Cadmio utilizando Carbones Activados preparados a partir de Semillas de Aguaje y Aceituna (Trabajo de Titulación) (Licenciatura). [en línea] Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. (Lima – Perú). 2012. p. 1-81 [Consulta: 18 March 2022]. Disponible en: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/5717/OBREGON_DANIEL_ADSORCION_CADMIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

ORDOÑEZ, J. *Aguas Subterráneas - Acuíferos.* Lima-Perú: Sociedad Geográfica de Lima, 2011. ISBN: 978-9972-602-78-8, pp. 5–41.

ORTEGA, N. & NUÑEZ, O. “Adsorción de aldehídos insaturados sobre TiO₂”. *Avances en Ciencias e Ingeniería* [en línea], 2012, (Venezuela) 3(1), pp. 81–91. [Consulta: 17 March 2022]. ISSN 0718-8706. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3876654>.

PAREDES DOIG, A.L. Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbón activado preparado a partir de la cáscara de castaña (Trabajo de Titulación) (Licenciatura). [en línea] Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. (Lima-Perú). 2011. pp. 7-95 [Consulta: 18 January 2022]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/827>.

PECKHAM, S. & AWOFOESO, N. “Water Fluoridation: A Critical Review of the Physiological Effects of Ingested Fluoride as a Public Health Intervention”. *The Scientific World Journal* [en línea], 2014, (Reino Unido) pp. 1–10. [Consulta: 12 December 2021]. DOI 10.1155/2014/293019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/293019>.

PEREIRA, F., et al. “Purificación de agua mediante carbón activo proveniente de la cáscara de arroz”. *Ciencia y Tecnología* [en línea], 2017, (Ecuador) 1(1), pp. 767–776. [Consulta: 16 December 2021]. ISSN 2588-056X. Disponible en: <chrome-extension://oemmnrcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/download/148/125>.

POLO, A. Contaminación Geogénica en las Aguas Subterráneas de España (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad de Alcalá, Universidad Rey Juan Carlos. (Alcalá de Henares-España). 2019. pp. 13-45.

PUCHE, R. & RIGALLI, A. “Fluorosis Esquelética”. *Actualizaciones en Osteología* [en línea], 2007, (Argentina) 3(1), pp. 1–3. [Consulta: 20 January 2022]. Disponible en: chrome-extension://oemmnrcbldboiebfnladdacbfmadadm/http://osteologia.org.ar/files/pdf/rid13_13.pdf.

PUSHPA, B. & RADHA, N. “A Review on the Removal of Fluoride using Inexpensive Adsorbents”. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* [en línea], 2019, (India) 8(12), pp. 303–309. [Consulta: 31 December 2021]. ISSN 2278-0181. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV8IS120195>.

RENTERIA, C. *Una Nueva Tendencia: El Aceite de Salvado de Arroz* [blog]. México: Alimentos, 2018. [Consulta: 18 March 2022]. Disponible en: <https://www.revistaalimentos.com/ediciones/ed-75-los-nuevos-motores-la-industria/una-nueva-tendencia-aceite-salvado-arroz/>.

RIVAS, C., et al. “Isoterma de Langmuir y Freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃”. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente* [en línea], 2014, (Venezuela) 26(1), pp. 43–49. [Consulta: 15 March 2022]. ISSN 1315-0162. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739465008.pdf>.

RIVERA, S., et al. “Flúor: Potenciales Efectos Adversos”. *Revista Chilena de Pediatría*, vol. 64, no. 4 (1993), (Chile) pp. 278–283.

RODRÍGUEZ, A., et al. “Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión”. *Scientia et Technica Año XXIII*, vol. 23, no. 3 (2018), (Colombia) pp. 411–419. ISSN 0122-1701.

RODRÍGUEZ, A., CAMPOS, A.M. & PÉREZ, A. “Obtención y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cascarilla de arroz”. *Revista Mutis*, vol. 9, no. 1 (2019), (Colombia) pp. 29–39. ISSN 22561498. DOI 10.21789/22561498.1515.

RODRÍGUEZ, Y., et al. “Adsorbentes a base de Cascarilla de Arroz en la retención de Cromo de efluentes de la industria de curtiembres”. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 10, no. 1 (2012), (Colombia) pp. 146–156.

ROJAS, J., GUTIÉRREZ, E. & COLINA, G. “Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola”. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, no. 4 (2016), (Venezuela) pp. 453–462. ISSN 14057743. DOI 10.1016/j.riit.2016.11.005.

SOBIESIAK, M., et al. “Phosphoric Acid and Steam as Activation Agents for Carbonized Porous Polymer Surfaces”. *Adsorption Science & Technology*, vol. 24, no. 2 (2006), (Ucrania) pp. 167–175.

SYDLE. *Optimización de Procesos* [blog]. S.l.: Gestión por Procesos, 2022. [Consulta: 9 May 2022]. Disponible en: <https://www.sydle.com/es/blog/que-es-optimizacion-de-procesos-6126ac39b060f57604039a57/>.

TULSMA-LIBRO VI: 2004. *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*. [en línea]. S.l.: [Consulta: 11 January 2022]. Disponible en: <chrome-extension://oemmndcblldboiebfnladdacbfmadadm/http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>.

TREJO, R. & HERNÁNDEZ, V. “Estado del arte de la remoción de fluoruros del agua”. *Conciencia Tecnológica* [en línea], 2004, (México) no. 25, pp. 1–3. [Consulta: 9 December 2021]. ISSN 1405-5597. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94402504>.

VALVERDE, A., SARRIA, B. & MONTEAGUDO, J. “Análisis Comparativo de las Características Fisicoquímicas de la Cascarilla de Arroz”. *Scientia et Technica Año XIII* [en línea], 2007, (Colombia) no. 37, pp. 255–260. [Consulta: 16 January 2022]. ISSN 0122-1701. Disponible en: <chrome-extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4784298.pdf>.

VÁZQUEZ, R. & BONILLA, A. “Exposición a fluoruros del agua potable en la ciudad de Aguascalientes, México”. *Rev. Panamá Salud Pública/Pan Am J Public Health* [en línea], 2001, (México) 10(2), pp. 108–113. [Consulta: 17 December 2021]. Disponible en: <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/2001.v10n2/108-113/es>.

VERA, V. & MOROCHO, D. Evaluación de Adsorción de Plomo y Mercurio en Carbón Activado (Trabajo de Titulación) (Grado). [en línea] Universidad Técnica de Machala, Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud, Carrera de Ingeniería Química. (Machala–Ecuador). 2015. pp. 1-35 [Consulta: 13 June 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/3653/1/CD000027-TRABAJO%20COMPLETO-pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE ANÁLISIS DE LIXIVIADOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA COMUNIDAD JESÚS DEL GRAN PODER

ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

INFORME DE ANÁLISIS DE LIXIVIADOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS UBICADA EN LA COMUNIDAD JESÚS DEL GRAN PODER

Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Guaiña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1) 1°37'24.05"S, 78°37'25.93"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 2) 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 3) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 4) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 5) 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 6) 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 7) 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis
pH	-	4500-H-B

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	pH
Pozo1	8.15
Pozo2	7.78
Centro de captación	7.92
Centro de captación+ filtrado	7.89
Llave de agua	8.20
Tanque de reservorio 1	8.21
Tanque de reservorio 2	8.17

ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Guaiña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1) 1°37'24.05"S, 78°37'25.93"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 2) 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 3) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 4) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 5) 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 6) 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 7) 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis
Conductividad	µSiemens/cm	2510-B

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	CONDUCTIVIDAD
Pozo1	539.2
Pozo2	897.2
Centro de captación	708.8
Centro de captación+ filtrado	772.2
Llave de agua	786.2
Tanque de reservorio 1	765.8
Tanque de reservorio 2	769.5

ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Gualña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Color	-	2120-C

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	COLOR
Pozo1	14
Pozo2	15
Centro de captación	8
Centro de captación+ filtrado	8
Llave de agua	5
Tanque de reservorio 1	10
Tanque de reservorio 2	7

ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Gualña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Turbidez	NTU	2130-B

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	COLOR
Pozo1	1
Pozo2	0.95
Centro de captación	0.9
Centro de captación+ filtrado	0.85
Llave de agua	0.6
Tanque de reservorio 1	0.8
Tanque de reservorio 2	0.55

ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Gualña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Dureza	mg/L	2340-C

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	DUREZA
Pozo1	300.27
Pozo2	580.53
Centro de captación	601.55
Centro de captación+ filtrado	535.49
Llave de agua	480.44
Tanque de reservorio 1	505.46
Tanque de reservorio 2	500.46

ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Gualña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	2540-C

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES
Pozo1	327.3
Pozo2	547.9
Centro de captación	442.5
Centro de captación+ filtrado	469.3
Llave de agua	467.8
Tanque de reservorio 1	470.1
Tanque de reservorio 2	467.5



Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Guaiña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1) 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 2) 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 3) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 4) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 5) 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 6) 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 7) 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Fluoruros	mg/L	4500-F-D

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	FLUORUROS
Pozo1	1.63
Pozo2	1.95
Centro de captación	1.57
Centro de captación+ filtrado	1.47
Llave de agua	1.98
Tanque de reservorio 1	1.89
Tanque de reservorio 2	1.60



Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Guaiña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1) 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 2) 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 3) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 4) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 5) 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 6) 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 7) 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Alcalinidad	mg/L	2320-B

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	ALCALINIDAD
Pozo1	262.5
Pozo2	287.5
Centro de captación	100
Centro de captación+ filtrado	131.25
Llave de agua	137.5
Tanque de reservorio 1	125
Tanque de reservorio 2	187.5



Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Guaiña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1) 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 2) 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 3) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 4) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 5) 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 6) 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 7) 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Silice	mg/L	4500-SiO ₂ -D

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	SÍLICE
Pozo1	45.1
Pozo2	42.9
Centro de captación	51.3
Centro de captación+ filtrado	40.8
Llave de agua	50.3
Tanque de reservorio 1	49.5
Tanque de reservorio 2	49.7



Fecha: 08 de septiembre del 2021

Análisis solicitado por: Sr. Luis Amado Guaiña Remache

Tipo de muestras: Aguas subterráneas

Localidad:

- 1) 1°37'24.05"S, 78°37'25.937"W, ALTITUD: 2693m (Pozo1)
- 2) 1°37'24.435"S, 78°37'30.058"W, ALTITUD: 2716m (Pozo2)
- 3) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación)
- 4) 1°37'24.53"S, 78°37'22.041"W, ALTITUD: 2711m (Centro de captación+ filtrado)
- 5) 1°37'24.55"S, 78°37'22.351"W, ALTITUD: 2715m (Llave de agua)
- 6) 1°37'29.788"S, 78°37'21.497"W, ALTITUD: 2721m (Tanque de reservorio 1)
- 7) 1°37'34.614"S, 78°37'23.108"W, ALTITUD: 2743m (Tanque de reservorio 2)

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	Métodos de análisis
Nitrógeno Nitratos	mg/L	4500-NO ₃ -C

RESULTADOS

DETALLE DE MUESTRA	NITRÓGENO NITRATOS
Pozo1	12.5
Pozo2	5.7
Centro de captación	8.8
Centro de captación+ filtrado	9.2
Llave de agua	9.6
Tanque de reservorio 1	10.5
Tanque de reservorio 2	11.6



ESPOCH
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Observaciones:

Atentamente.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gina Álvarez R.', is written over a horizontal line.

Dra. Gina Álvarez R.

RESPONSABLE TECNICO LABORATORIO

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

ANEXO B: INFORME DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS BET

INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1. Información general

Orden de trabajo N°: **5** N° Informe: **005**
Ref. Proforma: **AI-2022- 005**

Razón Social / Nombres Apellidos:	Luis Guaña Remache	Muestra tomada por:	Ciente
RUC ó CI:	603945395		
Dirección:	Riobamba		
Fecha de emisión:	24 de marzo del 2022		
Fecha de muestreo:	N/A		
Fecha de recepción de la muestra:	17 de marzo de 2022		
Fecha de realización del análisis:	22 de marzo de 2022		
Correo electrónico:	luisguaña@yahoo.com		
Teléfono:	998963199		
Persona de Contacto:	Luis Guaña Remache	Teléfono:	998963199

2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	ZnCl2 Activado
Descripción:	Poivo en funda ziploc
Tipo:	N/A
Equipo:	Auto Chem II Micromeritics
Lugar:	Laboratorio A-210
Analista:	Ing. Jhoselin Alvear
Descripción:	Análisis de área superficial Método BET
Observaciones:	Ninguna

3. Resultados

Debido a la extensión de los resultados, todos los documentos de respaldo se envía al correo electrónico del cliente.

N°	Nombre	Método	Valor	Unidades
1	ZnCl2 Activado	Interno. Área superficial BET, single point	4.2463	m2/g



PABLO ANDRES
LONDONO LARREA

Ing. Pablo Londoño
Responsable Técnico
24 de marzo de 2022

ANEXO C: CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA (CASCARILLA DE ARROZ)

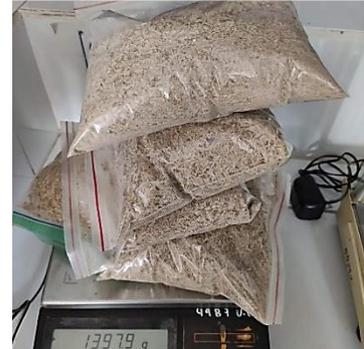
Molienda



Tamizaje



Peso (Cascarilla de arroz)



Determinación de humedad



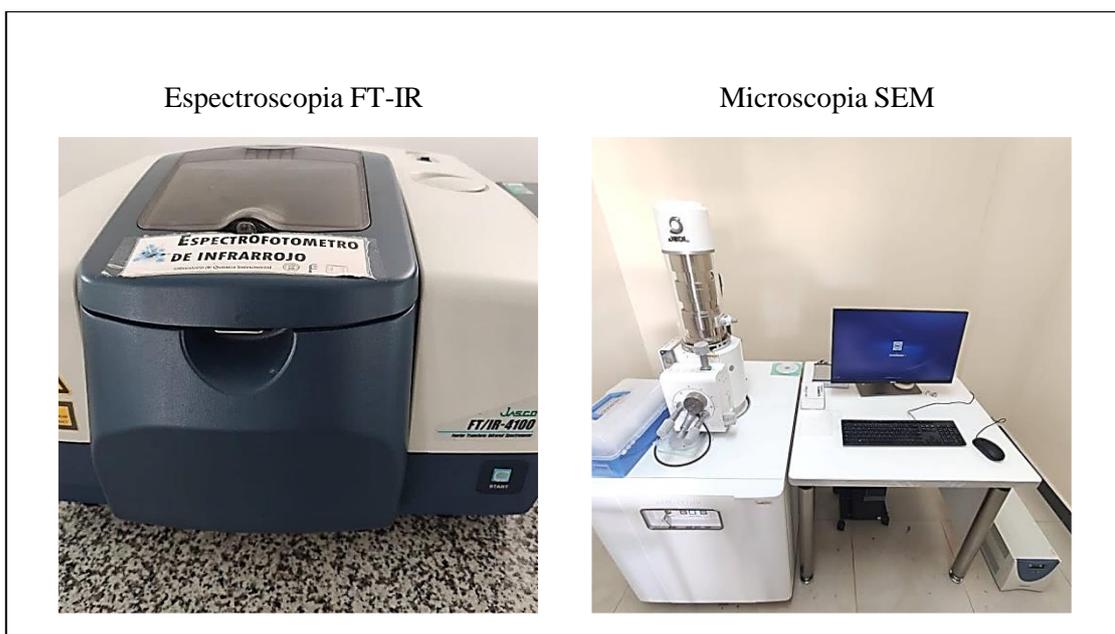
Determinación de cenizas



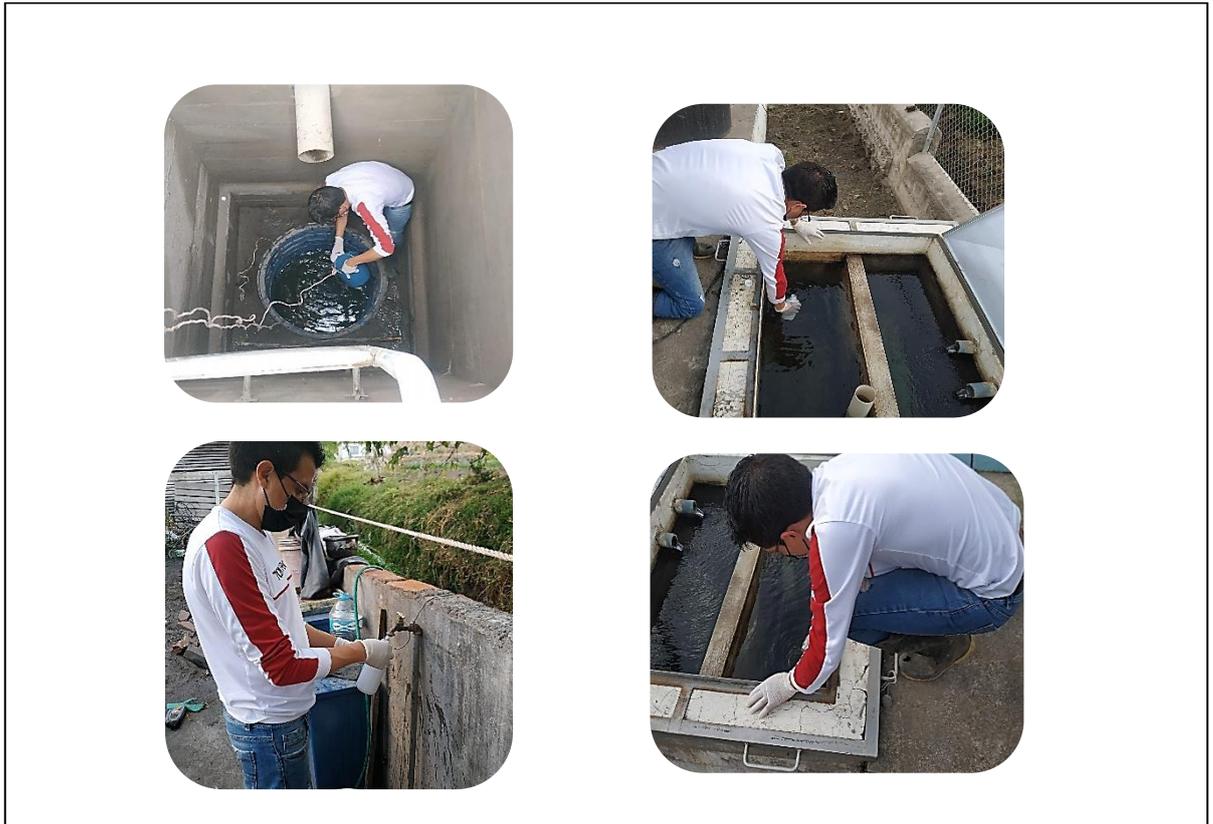
ANEXO D: SÍNTESIS DE CARBÓN ACTIVADO



ANEXO E: CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO



ANEXO F: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA



ANEXO G: EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE FLÚOR

