TECNOLOGÍA QUÍMICA
UNIVERSIDAD DE ORIENTE

Vol.46 (2026)
ISSN: 2224-6185

Método espectrofotométrico amoniacal para la evaluación del agotamiento del carbón activado en la producción de ron cubano

Ammonia spectrophotometric method for evaluating activated carbon exhaustion in Cuban rum production

Amanda M. Maturell - Portuondo[1] https://orcid.org/0000-0002-3674-1893
Freddy Fong - Casas[1] https://orcid.org/0000-0002-3821-5117
Harold Crespo - Sariol[2] https://orcid.org/0000-0002-1826-582X
Yudith González - Díaz[3*] https://orcid.org/0000-0003-124-1146

[1] CubaRon, Santiago de Cuba, Cuba
[2] Sociedad HECHO EN ITALIA srl., Torino, Italia
[3]Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba
*Autor para correspondencia: yudithgd1971@gmail.com

RESUMEN

En la industria ronera cubana, el carbón activado granular utilizado en la refinación de aguardiente añejado se declara "agotado" mediante criterio sensorial, lo que provoca el desecho prematuro del material y pérdidas económicas. En este trabajo se aplicó la espectrofotometría amoniacal (S-NH_3) para determinar el perfil de agotamiento del carbón en cuatro roneras cubanas, y se desarrolló un modelo sigmoidal de Boltzmann para el análisis cuantitativo de los datos experimentales. Los perfiles se ajustaron al modelo con coeficientes de regresión superiores al 96 %. Mediante análisis diferencial de las curvas se calcularon la longitud no utilizada del lecho (LUB), el coeficiente fraccional de recuperación (φ) y la eficiencia neta de manejo (e□). La recuperación de las capas menos agotadas incrementó la eficiencia de explotación del carbón desde 40-60 % hasta valores >70 %, alcanzando 92 % en la Ronera 1. El método propuesto constituye una herramienta

cuantitativa, económica y generalizable para el manejo eficiente del carbón activado en la producción de ron cubano.

Palabras clave: carbón activado granular; espectrofotometría amoniacal; perfil de agotamiento; refinación de aguardiente; ron cubano; modelo de Boltzmann.

ABSTRACT

In the Cuban rum industry, granular activated carbon used in aged spirits refining is declared "exhausted" by sensory criteria, leading to premature material disposal and economic losses. In this work, the ammonia spectrophotometry method (S-NH_3) was applied to determine the exhaustion profile of activated carbon in four Cuban rum factories, and a sigmoidal Boltzmann model was developed for quantitative analysis of the experimental data. Exhaustion profiles were fitted to the model with regression coefficients above 96%. Differential analysis of the curves allowed calculation of the unused bed length (LUB), fractional recovery coefficient (φ), and net management efficiency (e□). Recovery of the less exhausted layers increased carbon exploitation efficiency from 40-60% to values above 70%, reaching 92% in the best-performing factory (Factory 1). The proposed method constitutes a quantitative, economical, and generalizable tool for efficient activated carbon management in Cuban rum production.

Keywords: granular activated carbon; ammonia spectrophotometry; exhaustion profile; aged spirit refining; Cuban rum; Boltzmann model.

Recibido: 08/01/2026

Aceptado: 20/03/2026

Introducción

El ron constituye uno de los productos de mayor tradición y relevancia económica en Cuba, con una industria que anualmente importa entre 10 y 12 toneladas de carbón activado granular (CAG) a un costo aproximado de 7 000 USD/tonelada para el proceso de refinación de aguardiente añejado. [1, 2, 3]

El criterio actual para declarar el carbón como "agotado" es exclusivamente sensorial: los maestros roneros determinan el momento de recambio cuando el efluente no alcanza los estándares organolépticos requeridos. [2] Este enfoque, aunque funcional para la calidad del producto, no permite cuantificar el grado real

de saturación del carbón a lo largo del lecho. Estudios previos en una ronera de referencia demostraron que hasta un 30 % del carbón declarado como agotado aún posee capacidad adsorbente aprovechable, localizado en las capas inferiores del adsorbedor. [4, 5]

Recientemente, Crespo, *et al*. [4, 5, 6] desarrollaron el método de espectrofotometría amoniacal (S-NH_3), una técnica rápida y económica que cuantifica el nivel de agotamiento del carbón a partir del cambio de color de una solución amoniacal en contacto con los compuestos tánicos adsorbidos. Sin embargo, este método solo fue validado en una fábrica, quedando pendiente su generalización a otras roneras cubanas que operan bajo diferentes condiciones tecnológicas.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo matemático basado en el perfil de agotamiento del carbón activado granular obtenido mediante espectrofotometría amoniacal (S-NH_3) y modelado con una función sigmoidal de Boltzmann que permita calcular indicadores cuantitativos de eficiencia de manejo y recuperación del carbón.

Materiales y métodos

Muestreo del carbón activado granular

Se seleccionaron cuatro roneras de las regiones oriental, central y occidental de Cuba. En cada fábrica se identificó un adsorbedor de lecho fijo (flujo descendente) declarado como "agotado" por los especialistas según el criterio sensorial habitual. Se tomaron muestras de carbón a diferentes profundidades del lecho, desde el tope (0 %) hasta el fondo (100 %), utilizando un toma-muestras patentado (Patente CU 2016-0178).[4, 5] En cada capa se extrajeron cinco muestras radiales (centro, a 1/4, 1/2 y 3/4 del radio, y cerca de la pared interna) que fueron homogeneizadas para garantizar la representatividad.

Método espectrofotométrico amoniacal (S-NH_3)

El procedimiento se realizó según lo descrito en [5, 6, 7]. Para cada muestra de carbón (3,2 g, previamente secada a 110 °C durante 3 h en estufa de convección forzada y tamizada en tamiz de malla 140, abertura 0,106 mm, para eliminar partículas de polvo) se añadieron 20 mL de solución de amoníaco (6,25-6,5 % p/p). La mezcla se agitó a 50 rpm durante 6 h a temperatura controlada (25 ± 2 °C) en frascos herméticamente cerrados. La solución coloreada resultante se filtró a presión (filtro PTFE de 0,45 µm) y se midió la absorbancia a λ = 634 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (cubeta de cuarzo, 1 cm de paso óptico).

El espectrofotómetro se calibró con una solución de amoníaco sin carbón (blanco) antes de cada serie de mediciones. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

El coeficiente fraccional de recubrimiento (θ), que representa la fracción de superficie adsorbente ocupada, se calculó mediante la ecuación empírica reportada [4, 6]:

$$\theta = 0.67 \cdot (A^*)^{0.28} \qquad (1)$$

Con: $(0 \leq A^* \leq 2)$

Donde

A^*: Absorbancia de equilibrio en unidades de absorbancia (U.A.)

Modelación matemática

Los valores de θ en función de la profundidad relativa del lecho (h/H_t, en %) se ajustaron al modelo sigmoidal de Boltzmann de cuatro parámetros:

$$\theta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 + e^{\left(\frac{\left(\frac{h}{Ht}\right) - \left(\frac{h}{Ht}\right)_0}{W}\right)}} + \theta_2 \qquad (2)$$

donde:

- θ_1: coeficiente fraccional de recubrimiento en el tope del lecho (0 %)
- θ_2: coeficiente fraccional de recubrimiento en el fondo del lecho (100 %)
- $\left(\frac{h}{Ht}\right)_0$: punto central de la zona de transferencia de masa (ZTM), en %
- *W:* anchura de la ZTM, en %

El ajuste se realizó mediante el software Origin 8.1 utilizando regresión no lineal.

Indicadores de eficiencia

A partir del modelo ajustado se calcularon los siguientes indicadores:

- Longitud no utilizada del lecho (LUB):

$$LUB = 100 - \left(\frac{h}{Ht}\right)_0 \qquad (3)$$

- Eficiencia de uso del lecho:

$$e_b = 1 - \frac{LUB}{100} = \frac{\left(\frac{h}{Ht}\right)_0}{100} \qquad (4)$$

- Coeficiente fraccional de recuperación (φ): fracción de la LUB que puede ser efectivamente recuperada, calculada mediante:

$$\varphi = 1 - \frac{2 \cdot \int_{\left(\frac{h}{H_t}\right)_o}^{100} \theta \cdot d\left(\frac{h}{H_t}\right)}{(\theta_1 - \theta_2) \cdot LUB} \quad (5)$$

- LUB recuperable:

$$LUB_r = \varphi \cdot LUB \quad (6)$$

- Eficiencia neta de manejo:

$$e_n = e_b + LUB_r \quad (7)$$

Resultados y discusión

Perfiles de agotamiento del carbón activado

La tabla 1 presenta los valores promedio de absorbancia de equilibrio y los coeficientes fraccionales de recubrimiento obtenidos para las cuatro roneras estudiadas. En todos los casos, el mayor nivel de agotamiento se encontró en la capa superior del adsorbedor (0 %), mientras que las capas del fondo (100 %) mostraron los menores valores de θ, indicando capacidad adsorbente remanente.

Tabla 1- Absorbancia de equilibrio promedio ($\overline{A^*}$) y coeficiente fraccional de recubrimiento (θ) para las capas de carbón en los adsorbedores agotados

Ronera	Parámetro	Profundidad relativa (h/H_t, %)								
		0	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100
1	$\overline{A^*}$	0,90	0,76	0,67	0,43	0,23	0,013	0,011	0,010	0,011
	θ	0,651	0,620	0,599	0,529	0,444	0,199	0,190	0,185	0,190
2	$\overline{A^*}$	0,63	0,58	0,56	0,38	0,25	0,17	0,009	0,008	0,008
	θ	0,589	0,575	0,570	0,511	0,454	0,408	0,179	0,173	0,173
3	□*	0,72	0,66	0,51	0,23	0,12	0,07	0,03	0,013	0,006
	θ	0,611	0,596	0,555	0,444	0,370	0,318	0,251	0,199	0,160
0*	□*	1,20	1,00	0,87	0,28	0,061	0,012	0,015	-	0,011
	θ	0,705	0,670	0,644	0,469	0,306	0,194	0,207	-	0,190

*Datos de la Ronera 0 extraídos de [4,6] como referencia. Los valores de profundidad para esta ronera son: 0, 13,3, 26,7, 40, 53,3, 66,7, 86,7, 100 %.

(-) Dato no disponible; la profundidad de muestreo correspondiente no fue registrada en el estudio original

La figura 1 muestra los perfiles experimentales de agotamiento (θ vs. h/H_t) para las cuatro roneras. Se observa una disminución, que va de gradual a abrupta, de la fracción de recubrimiento a lo largo del lecho, lo que evidencia la existencia de una zona de transferencia de masa (ZTM) donde ocurre el frente de adsorción. [7, 8, 9, 10]

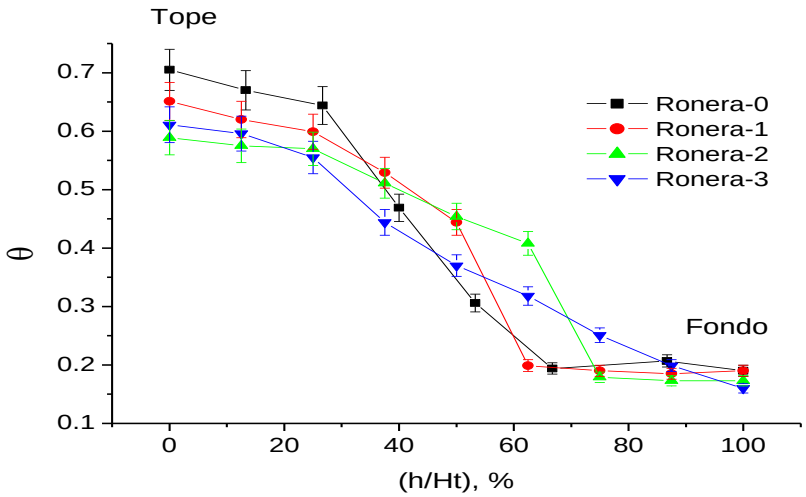


Fig. 1- Perfil de agotamiento experimental de los adsorbedores de las cuatro roneras

Ajuste al modelo sigmoidal de Boltzmann

La tabla 2 presenta los parámetros obtenidos del ajuste de los perfiles experimentales a la ecuación (2). Los coeficientes de regresión ajustados fueron superiores al 96 % en todos los casos, confirmando la validez del modelo para describir el comportamiento del agotamiento del carbón en el lecho.

Tabla 2- Parámetros del modelo sigmoidal de Boltzmann y calidad del ajuste.

Ronera	θ_1	θ_2	W (%)	$(h/Ht)_o$ (%)	Adj. R^2
0	0,702 ± 0,020	0,191 ± 0,02	8,33 ± 1,27	42,01 ± 1,41	0,995
1	0,619 ± 0,02	0,177 ± 0,02	6,50 ± 1,91	50,59 ± 0,02	0,984
2	0,576 ± 0,03	0,139 ± 0,05	10,13 ± 3,74	61,91 ± 4,09	0,968
3	0,681 ± 0,05	0,121 ± 0,04	21,83 ± 5,23	47,32 ± 3,08	0,994

El parámetro W (anchura de la ZTM) mostró diferencias significativas entre las roneras. Las Roneras 0 y 1 presentaron ZTM estrechas (6,5-8,3 %), indicando un frente de adsorción bien definido, mientras que la Ronera 3 exhibió la ZTM más ancha (21,8 %), sugiriendo condiciones operacionales menos favorables para la discriminación entre capas agotadas y recuperables.

Análisis diferencial y determinación del frente de adsorción

La figura 2 presenta las curvas diferenciales de los perfiles de agotamiento (DPA), que representan la derivada $d\theta/d(h/H_t)$. El mínimo de cada curva indica la posición del frente de adsorción, que coincide con el parámetro $(h/H_t)_0$ del modelo de Boltzmann.

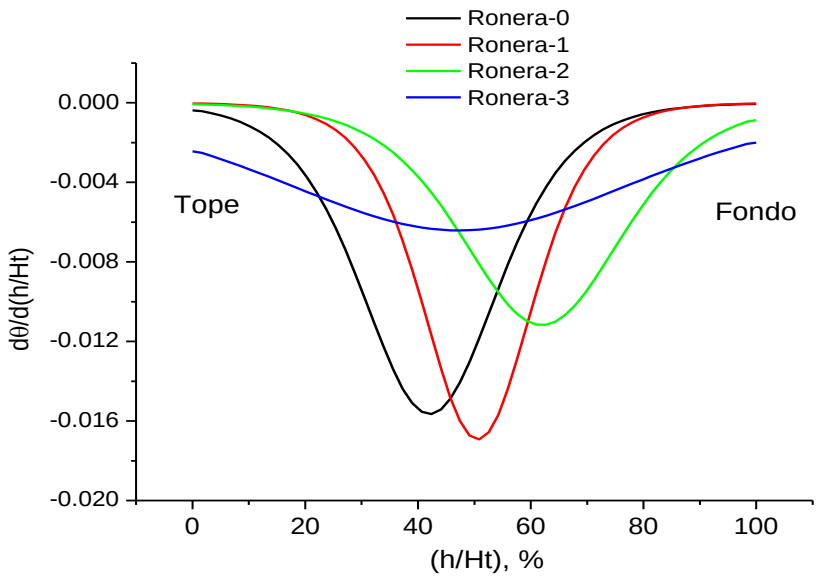


Fig. 2- Curvas diferenciales de los perfiles de agotamiento para las cuatro roneras

Se observa que la Ronera 1 presenta el cambio más abrupto en el nivel de agotamiento (mínimo más agudo), seguida por la Ronera 0. Las Roneras 2 y 3 muestran mínimos más anchos y menos profundos, lo que confirma una ZTM más extendida y un frente de adsorción menos definido.

Indicadores de eficiencia y recuperación

La tabla 3 resume los indicadores de eficiencia calculados para cada ronera.

Tabla 3- Parámetros de uso y recuperación de los adsorbedores.

Ronera	LUB (%)	e_h (%)	φ	LUB_x (%)	e_n (%)
0	58,0	42,0	0,81	47,1	89,1
1	49,4	50,6	0,84	41,4	92,0
2	38,1	61,9	0,68	25,8	87,7
3	52,7	47,3	0,50	26,4	73,7

La eficiencia de uso del lecho (e_b) varía entre 42 % y 62 %, lo que significa que, sin recuperación, entre un 38 % y un 58 % del carbón en el adsorbedor se desecharía a pesar de poseer capacidad adsorbente remanente.

La introducción del coeficiente fraccional de recuperación (φ) permite cuantificar qué fracción de la LUB puede ser efectivamente reaprovechada. Las roneras con ZTM estrecha (0 y 1) alcanzan valores de φ entre 0,81 y 0,84, mientras que la Ronera 3, con la ZTM más ancha, solo puede recuperar la mitad de su LUB (φ= 0,50).

La figura 3 compara gráficamente la eficiencia neta de manejo (e_n) para cada ronera.

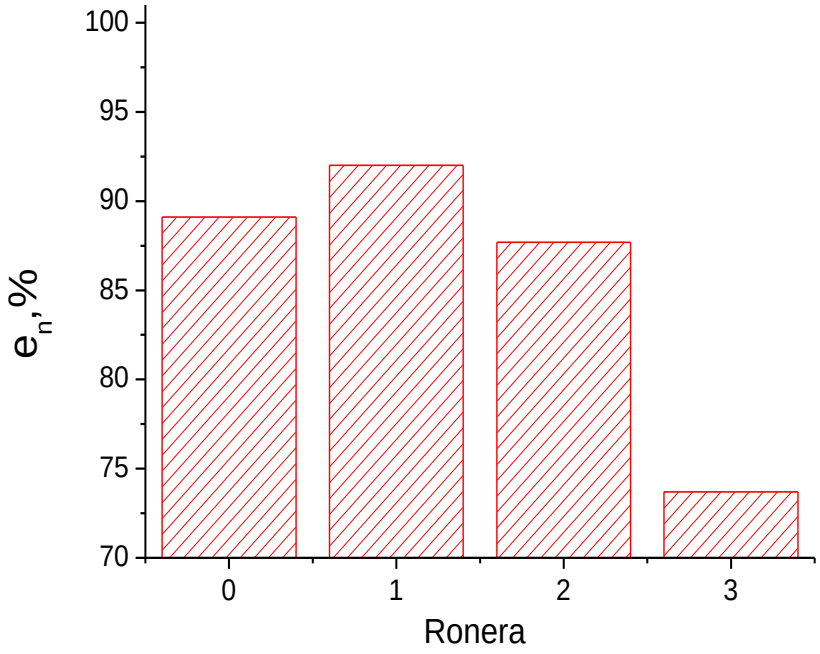


Fig. 3- Comparación de la eficiencia neta de manejo (e_n) para las cuatro roneras

Al aplicar la estrategia de recuperación de las capas menos agotadas, la eficiencia neta se incrementa sustancialmente, alcanzando valores entre 73,7 % y 92,0 %. La Ronera 1 presenta el manejo más eficiente (92,0 %), seguida por las Roneras 0 (89,1 %) y 2 (87,7 %). La Ronera 3 muestra la menor eficiencia neta (73,7 %).

Implicaciones tecnológicas y económicas

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del método S-NH_3 combinado con el modelo matemático propuesto permite:

1. cuantificar objetivamente el grado de agotamiento del carbón en cada capa del adsorbedor;
2. identificar la posición del frente de adsorción y la anchura de la ZTM; y
3. calcular la fracción recuperable del lecho (entre 25,8 % y 47,1 % según la ronera).

Desde el punto de vista económico, la implementación de esta metodología permitiría reducir las importaciones de carbón virgen en aproximadamente 4-6 toneladas anuales por fábrica, con un ahorro estimado de 28 000-42 000 USD/año por planta (considerando 7 000 USD/tonelada). Adicionalmente, se reduce el volumen de residuo sólido dispuesto en vertederos.

Para la Ronera 3, que presenta la menor eficiencia neta (73,7 %), se recomienda estrechar la ZTM mediante:

- disminución del flujo de aguardiente, lo que reduce la velocidad de propagación de la onda de adsorción;
- aumento del diámetro del lecho, que incrementa el tiempo de residencia; o
- incorporación de adsorbedores en paralelo, que distribuye el caudal total.

Estas acciones, fundamentadas en la teoría de adsorción en lecho fijo, [9, 10, 11] permitirían aumentar el coeficiente fraccional de recuperación (φ) y la eficiencia neta.

Conclusiones

1. Se aplicó exitosamente el método de espectrofotometría amoniacal (S-NH_3) para determinar los perfiles de agotamiento del carbón activado granular en adsorbedores declarados como "agotados" en cuatro roneras cubanas, demostrando su utilidad como herramienta analítica cuantitativa.

2. Los perfiles experimentales se ajustaron al modelo sigmoidal de Boltzmann de cuatro parámetros con coeficientes de regresión superiores al 96 %, permitiendo extraer parámetros característicos (θ_1, θ_2, $(h/H_t)_0$, W) que describen el comportamiento de la adsorción en el lecho.

3. Se definieron nuevos indicadores de eficiencia: el coeficiente fraccional de recuperación (φ) y la eficiencia neta de manejo (e_n), que permiten comparar objetivamente el desempeño entre diferentes plantas.

4. La estrategia de recuperación de las capas menos agotadas del fondo del adsorbedor permite incrementar la eficiencia de explotación del carbón desde 40-60 % hasta valores >70 %, alcanzando 92 % en la Ronera 1.

5. La metodología propuesta constituye una herramienta generalizable para el manejo eficiente del carbón activado en la industria ronera cubana, con impactos positivos en el orden económico (reducción de importaciones) y ambiental (disminución de residuos sólidos).

Referencias bibliográficas

1. HERNÁNDEZ O. *Science and Technologies of Distillates Beverages*. 1ra Edition. La Habana: Instituto de Investigaciones para la Industria Alimentaria; 2007. ISBN 978-959-1234-56-7.

2. DEL TORO-DEL TORO, Noemí, *et al*. Pérdida de volumen durante el añejamiento natural del ron en un sistema paletizado: un enfoque estadístico. *Tecnología Química*, 2024, 44(1), p.45-62. [Consultado 3 febrero 2026]. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224618520240001000 45&script=sci_arttext&tlng=en

3. ZALDIVAR MONTES DE OCA, Yasmin, *et al*. Methodology for selecting technical equipment in the production process of rum elixir. *Ingeniería,* 2024, 34(2), p. 54-61. [Consultado 21 enero 2026]. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215265220240002000 54&script=sci_arttext&tlng=en

4. CRESPO SARIOL H. Regeneration and management of the activated carbon used for the production of high quality Cuban rums: development of new methods to determining activated carbon characteristics [tesis de doctorado]. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía; 2018

5. CRESPO SARIOL, Harold, et al. A colorimetric method for the determination of the exhaustion level of granular activated carbons used in rum production. *Beverages*, 2016, 2(3), p. 24. [Consultado 13 febrero 2026]. https://www.mdpi.com/2306-5710/2/3/24

6. CRESPO SARIOL, Harold, *et al*. Characterization of the exhaustion profile of activated carbon in industrial rum “filters” based on TGA, TD-GC/MS, colorimetry and NMR relaxometry. *Materials Today Communications*, 2017, 11, p. 1-10. ISSN: 690-568-33. [Consultado 15 enero 2026]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492817300065

7. WORCH E. *Adsorption Technology in Water Treatment*. 3rd ed. Berlín: Walter de Gruyter; 2012. ISBN: 978-3-11-024022-1.

8. AL-ASADI, Safaa Talib, et al. A comprehensive review of methylene blue dye adsorption on activated carbon from edible fruit seeds: A case study on kinetics and adsorption models. *Carbon Trends*, 2025, 20, p. 100507. ISSN 2667-0569. [Consultado 3 febrero 2026]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667056925000574

9. KOCHER, Gurvinder Singh, et al. *Microbiology and health benefits of rum, brandy, and whisky*. En Microbiology and Health Benefits of Traditional Alcoholic Beverages. Academic Press, 2025. p. 91-108. ISBN: 978-0-443-18978-9. [Consultado 26 febrero 2026]. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443133220000071

10. CRITTENDEN, Barry; THOMAS, W. John. *Adsorption technology and design.* Elsevier, 1998, ISBN: 0750619597. [Consultado 8 abril 2026]. https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=ipDjl2tyXfkC&oi=fnd&pg=PP1&dq=THOMAS+WJAdsorption+Technology+and+Design,+&ots=RAeDwLxaJD&sig=MGNN-5HNkyEBqxiFnEpniWa4htk

11. SHI, Ling, *et al*. Adsorption characteristics of SO2 onto novel activated carbon fixed bed: kinetics, isotherms, thermodynamics and washing regeneration. *Environmental Technology*, 2024, 45(24), p. 5182-5203. [Consultado 23 febrero 2026]. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2023.2283810

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Amanda M. Maturell Portuondo: investigación, redacción – borrador original, metodología.

Freddy Fong Casas: supervisión, validación.

Harold Crespo Sariol: conceptualización, supervisión, validación.

Yudith González Díaz: análisis formal, revisión y edición.