

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Síntesis hidrotermal y activación química de carbono
nanoestructurado derivado de *Musa paradisiaca* para la
remoción de bisfenol-A en agua**

María José Chávez Duque

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

INGENIERA QUÍMICA

Quito, 09 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN

DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Síntesis hidrotermal y activación química de carbono nanoestructurado
derivado de *Musa paradisiaca* para la remoción de bisfenol-A en agua**

María José Chávez Duque

Nombre del profesor, Título académico Andrea Carolina Landázuri Flores, PhD

Quito, 09 de diciembre de 2024

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: María José Chávez Duque

Código: 00321643

Cédula de identidad: 1750384685

Lugar y fecha: Quito, 09 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around these publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

Este estudio investiga la conversión de cáscaras de plátano verde (*Musa paradisiaca*), un residuo agrícola abundante en Ecuador, en carbono nanoestructurado tratado hidrotermalmente (también llamados hydrochar) activados para la remoción de bisfenol A (BPA) en agua. Los materiales se sintetizaron mediante carbonización hidrotermal seguida de activación química con ácido cítrico y bicarbonato de sodio. Se evaluó la capacidad de adsorción de BPA mediante estudios cinéticos e isotérmicos, que revelaron una mejora significativa en la eficiencia de remoción tras la activación química. La caracterización fisicoquímica demostró modificaciones superficiales que favorecen la adsorción del contaminante. Los resultados demuestran que estos hydrochars activados constituyen una alternativa sostenible y económicamente viable para el tratamiento de aguas contaminadas con BPA, aprovechando residuos agrícolas locales. Este trabajo contribuye al desarrollo de tecnologías verdes para la remediación ambiental y la valorización de residuos orgánicos y fomentar una Ingeniería Circular.

Palabras clave: Cáscara de plátano verde, hydrochar, bisfenol A, cinética de adsorción, ácido cítrico, bicarbonato de sodio.

ABSTRACT

This study investigates the conversion of green plantain peels (*Musa paradisiaca*), an abundant agricultural waste in Ecuador, into hydrothermally treated nanostructured carbon (also called hydrochar) activated for bisphenol A (BPA) removal from water. The materials were synthesized through hydrothermal carbonization followed by chemical activation with citric acid and sodium bicarbonate. BPA adsorption capacity was evaluated through kinetic and isothermal studies, which revealed significant improvement in removal efficiency after chemical activation. Physicochemical characterization demonstrated surface modifications that enhance contaminant adsorption. The results show that these activated hydrochars constitute a sustainable and economically viable alternative for treating BPA-contaminated water, utilizing local agricultural waste. This work contributes to the development of green technologies for environmental remediation and organic waste valorization, promoting Circular Engineering.

Key words: Green banana peel, hydrochar, activated carbon, bisphenol A, adsorption kinetics, citric acid, sodium bicarbonate.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. METODOLOGÍA	15
2.1 Descripción y tratamiento previo de residuos de biomasa lignocelulósica	15
2.2 Carbonización hidrotermal y activación.....	15
2.3 Análisis de remoción de Bisfenol A (BPA)	16
2.3.1 Experimentos Batch.....	16
2.3.2 Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC).....	16
2.4 Estudio cinético e isothermas de adsorción.....	17
2.5 Caracterización físicoquímica	19
2.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	19
2.5.2 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	19
2.5.3 Análisis Brunauer-Emmet-Teller (BET)	19
2.5.4 Caracterización eléctrica.....	20
2.5.5 Análisis proximales	20
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	21
3.1 Remoción de contaminante	21
3.2 Cinética de adsorción.....	23
3.3 Isothermas de adsorción	25
3.4 SEM.....	27

	8
3.5 FTIR	28
3.6 BET.....	30
3.7 Caracterización eléctrica.....	31
3.8 Análisis proximales	32
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
6. ANEXOS	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros cinéticos para modelos de pseudo-primer y segundo orden.....	25
Tabla 2. Parámetros de isothermas de adsorción.....	27
Tabla 3. Porcentaje de humedad, cenizas, proteínas, grasas y azúcares.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Remoción de BPA con soluciones de 5 ppm cuantificada mediante HPLC.....	21
Figura 2. Modelos cinéticos de adsorción para material nativo (a), hydrochar no tratado (b), hydrochar carbonizado con ácido cítrico(c), hydrochar impregnado $C_6H_8O_7$ (d) y hydrochar impregnado $NaHCO_3$ (e).....	24
Figura 3. Isotermas de adsorción para material nativo (a) e hydrochar impregnado bicarbonato de sodio (b).....	26
Figura 4. Ejemplos de morfología de material nativo (a) e hydrochar no tratado (b) (magnificación 1200x y 500x)	27
Figura 5. Espectros FTIR de material nativo, hydrochar no tratado e hydrochars modificados.....	29
Figura 6. Permitividad relativa (a) y conductividad (b) de material nativo, hydrochar no tratdo e hydrochars modificados.....	31

1. INTRODUCCIÓN

El bisfenol A (BPA) es un compuesto orgánico industrial utilizado principalmente en la producción de resinas epoxi y policarbonato, materiales presentes en productos de consumo diario como botellas de plástico, revestimientos internos de latas de alimentos y empaques de productos electrónicos [1]. Debido a su amplio uso, el BPA se ha convertido en una preocupación global dado su impacto en la salud humana y el medio ambiente. El BPA puede migrar de los productos de plástico hacia los alimentos y bebidas, especialmente cuando estos productos están expuestos a altas temperaturas o a líquidos ácidos. Una vez liberado al medio ambiente, el BPA puede persistir durante largos períodos y contaminar el suelo, el aire y las fuentes de agua.

Se ha encontrado BPA en aguas superficiales en múltiples países de Europa, América, Asia y África [9]. Según la EFSA, Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, el IDT (Ingesta Diaria Tolerable) del BPA es de 0,2 ng/kg de peso corporal/día [10]. Esto puede servir para determinar si los niveles de exposición al BPA representan un posible riesgo para la salud pública de la población. La capacidad del BPA para imitar a la hormona estrógeno y alterar el sistema endocrino es una de las principales razones por las cuales se le considera un disruptor endocrino [2]. Además, se ha asociado al BPA con tipos de cáncer al hígado, piel y gastrointestinal [11].

En Ecuador, las cáscaras de plátano verde (*Musa paradisiaca*) es un subproducto abundante de la industria bananera, que representa una importante fuente de ingresos para el país. Sin embargo, una gran parte de esta producción se desecha o se utiliza de manera ineficiente, lo que genera problemas de gestión de residuos y pérdidas económicas [3]. El

plátano verde se caracteriza por su alto contenido de fibra, almidón, celulosa y hemicelulosa, lo que lo convierte en una materia prima prometedora para la producción de biochar o hydrochar [12]. También está conformado por abundantes minerales, compuestos fenólicos y antioxidantes [13]. El hydrochar es un material carbonoso nanoestructurado obtenido mediante la carbonización hidrotérmica de biomasa, este es un proceso que ocurre a altas temperaturas y presiones en presencia de agua [4]. El hydrochar presenta una estructura porosa y una alta capacidad de adsorción, lo que lo convierte en un material atractivo para la remoción de contaminantes en el agua.

La investigación sobre hydrochars ha tenido un notable crecimiento en los últimos años, demostrando su potencial para mitigar algunos problemas ambientales. Distintos estudios han explorado la conversión de diversas biomásas, como cáscaras de frutas, en hydrochars para la remoción de contaminantes orgánicos, fármacos o metales pesados [15]. En ensayos realizados con hydrochars de cáscaras de plátano como materia prima procesados a 150-300 °C por 1 h, se observó porcentajes de adsorción del 99% de cadmio Cd^{2+} , en comparación a un 75% de adsorción con la cáscara sin carbonizar [14]. Si bien existen investigaciones sobre la producción de hydrochars a partir de cáscaras de banano, la utilización de cáscaras de plátano verde como precursor para la obtención de hydrochars y su aplicación en la remoción de contaminantes aún es un área poco explorada. Esto representa una oportunidad para valorizar un subproducto abundante de la industria bananera.

La activación es un proceso que se utiliza para mejorar las propiedades de adsorción de los hydrochars, aumentando su área superficial, volumen de poros y número de grupos funcionales [5]. Los métodos de activación más comunes incluyen la activación física,

química y biológica. La activación química, que implica el tratamiento del hydrochar con agentes químicos como ácidos o bases, es uno de los métodos más efectivos para mejorar su capacidad de adsorción. Entre los activadores más comunes que se utilizan se tiene al ácido sulfúrico H_2SO_4 , cloruro de zinc ZnCl_2 , ácido fosfórico H_3PO_4 , hidróxido de potasio KOH e hidróxido de sodio NaOH [17]. Sin embargo, la mayoría de estas sustancias son altamente contaminantes para el ambiente. Existen otros activadores más ecológicos como el ácido cítrico $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, un ácido orgánico débil, reacciona con los grupos funcionales presentes en la superficie del hydrochar e introduce grupos carboxílicos que aumentan la densidad de sitios activos para la adsorción [6]. Por otro lado, el bicarbonato de sodio NaHCO_3 , una sal básica, puede generar un ambiente alcalino durante el proceso de activación, lo que favorece la formación de poros y la remoción de cenizas, mejorando así la capacidad de adsorción del material [7].

En los estudios de adsorción de hydrochars, los modelos cinéticos e isothermas son herramientas fundamentales para comprender y cuantificar la eficiencia de estos materiales en la remoción de contaminantes. Estos modelos matemáticos permiten describir y predecir el comportamiento del proceso de adsorción ya que proporcionan información sobre la velocidad a la que ocurre la adsorción y la cantidad máxima de contaminante que puede ser adsorbida por el hydrochar [16]. Por una parte, los modelos cinéticos se enfocan en la velocidad a la que se produce la adsorción, es decir, cómo cambia la cantidad de contaminante adsorbido en el tiempo. Estos modelos evalúan la eficiencia del proceso de adsorción y determinan el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. Los modelos más comunes incluyen el modelo de pseudo-primer orden y el modelo de pseudo-segundo orden, cada uno con diferentes supuestos sobre los mecanismos de adsorción. Mientras que, las

isotermas de adsorción describen cómo se distribuye el contaminante en la superficie del adsorbente, en función de la concentración del contaminante en la fase líquida. Estos modelos, como la isoterma de Langmuir y la de Freundlich, ayudan a comprender la capacidad de adsorción del hydrochar y la naturaleza de las interacciones entre el adsorbente y el contaminante [5].

El uso de plátano verde como precursor de hydrochars ofrece una alternativa de bajo costo y accesible para la remoción de contaminantes del agua, dado que el plátano verde es un subproducto abundante y económico. Desde el punto de vista ambiental, la producción de hydrochars a partir de este subproducto contribuye a la valorización de residuos orgánicos y ayuda a reducir la contaminación del agua por BPA. En términos académicos, aunque existe un creciente interés en el uso de hydrochars para eliminar contaminantes, aún hay una falta de estudios sobre la efectividad de hydrochars de plátano verde activados con ácido cítrico y bicarbonato de sodio específicamente para la eliminación de BPA, lo que subraya la necesidad de investigar esta área.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la eficacia de hydrochars activados con ácido cítrico y bicarbonato de potasio para la remoción de BPA del agua. Para esto, se busca determinar la cinética de adsorción de BPA en estos hydrochars activados, así como las isotermas de adsorción para entender su capacidad de remoción del contaminante. Finalmente, se caracterizará fisicoquímicamente tanto el material nativo como los hydrochars derivados del proceso de carbonización hidrotermal para sugerir el mejor material adsorbente.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción y tratamiento previo de residuos de biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica seleccionada para este estudio fue la cáscara de plátano verde, obtenida de distribuidores locales con su producto proveniente de Quevedo y Santo Domingo. Para la producción de hydrochar, se pelaron los plátanos verdes y únicamente se utilizó la cáscara. Estas cáscaras fueron sometidas a un proceso de secado a 60 °C en un horno Precision Scientific 51221131 y posteriormente trituradas en un molino Goldenwall high-speed multifunction grinder HC-300. Finalmente, el material fue tamizado para garantizar la obtención de diferentes tamaños de partículas.

2.2 Carbonización hidrotermal y activación

Para el proceso de carbonización se aplicó una relación 1:25 entre g biomasa/ mL agua destilada, se pesan 15 g de biomasa y se coloca en un reactor de alta presión modelo TGYF-C-500ML con 375 mL de agua. La carbonización se realizó con una agitación de 1000 rpm, a una temperatura de 200 °C durante 1 h [18]. La activación del hydrochar se llevó a cabo mediante un proceso de dos pasos, se empleó soluciones acuosas 1 M de ácido cítrico $C_6H_8O_7$ y bicarbonato de sodio $NaHCO_3$ con impregnación durante 1 h, 150 rpm y una relación de 1:50 g de hydrochar/mL de solución activadora [28]. Una vez finalizado el proceso en el reactor e impregnación, los hydrochars se filtraron al vacío para separar del licor y quedarse con la parte sólida. Posteriormente se lavaron con 1 L de agua destilada y los sólidos se secaron a 105 °C en un horno Precision Scientific 51221131 para eliminar rastros de humedad.

2.3 Análisis de remoción de Bisfenol A (BPA)

2.3.1 Experimentos Batch.

Para conocer el mecanismo de adsorción de los hydrochars se emplearon soluciones de Bisfenol A con una pureza mínima del 99% para preparar una serie de soluciones iniciales con concentraciones desde 2 hasta 6 ppm. Utilizando un sistema de jarras, se colocaron 0.5 gramos de cada biomasa en 500 mL de cada una de estas soluciones. Posteriormente, las muestras se sometieron a agitación a 100 rpm durante un periodo de 1 h. Con el fin de determinar la cinética y establecer las isotermas de adsorción, se tomaron muestras a intervalos de 10 minutos, iniciando desde el tiempo cero, para cuantificar las concentraciones residuales de Bisfenol A.

2.3.2 Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC).

El análisis HPLC es una técnica que separa y cuantifica sustancias específicas en una muestra [20]. Los análisis de BPA fueron realizados en el sistema HPLC Dionex UltiMate 3000 de la marca Thermo Fisher Scientific, con una columna Zorbax SB-Aq C18, 5 μ m, 150 x 4.6 mm, de Agilent y un detector de arreglo de diodos DAD-3000. Mediante este análisis se obtiene el área del compuesto y se emplea una curva de calibración con concentraciones 7 ppm, 5 ppm, 3 ppm, 1 ppm, 0,5 ppm y 0,1 ppm.

La separación se realizó utilizando una fase móvil compuesta de agua y acetonitrilo en una proporción de 50:50 (v/v), respectivamente [21] [22]. Los solventes de la fase móvil, soluciones para la curva de calibración y alícuotas de los experimentos fueron filtradas a través de una membrana de nylon 0,22 μ m antes de colocarlos los reservorios al equipo. El análisis se realizó a una temperatura de 25 °C en condiciones isocráticas, durante un tiempo

de 10 minutos, y flujo de 1 mL/min. La detección se realizó a 226, 276 y 280 nm, ancho de banda de 1 nm y razón de recolección de datos de 5 Hz. Se escogió, finalmente, la longitud de onda de 226 nm para la cuantificación de BPA. Se inyectó 20 μ L de muestra, previamente filtrada (0,45 μ m), lavando la aguja de inyección antes y después de cada análisis.

Para el porcentaje de remoción del contaminante se utiliza la ecuación 1.

$$\text{Porcentaje de remoción} = \frac{C}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde C_0 es la concentración inicial en ppm y C es la concentración final.

2.4 Estudio cinético e isotermas de adsorción

La cinética de adsorción estudia la velocidad a la que las moléculas de un fluido (gas o líquido) se adhieren a la superficie de un sólido [23]. El orden de la reacción de adsorción puede ser pseudo-primer o pseudo-segundo, según las características del proceso. Para el modelo de pseudo-primer orden se tiene que:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

Donde q_t es la capacidad de adsorción en el tiempo (mg/g biomasa), q_e es la capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g biomasa), k_1 es la constante de velocidad (1/min) y t es el tiempo (min). Para el modelo de pseudo-segundo orden se tiene:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \quad (3)$$

Donde k_2 es la constante de velocidad para segundo orden (g biomasa/ mg min).

Para entender cómo los contaminantes se adhieren a las superficies, se emplean modelos isotérmicos. Entre los más comunes están la isoterma de Langmuir, Freundlich y Dubinin-Radushkevich [24]. La isoterma de Langmuir describe la adsorción homogénea en monocapa del soluto sobre la superficie del adsorbente, donde las moléculas se unen a los sitios activos mediante quimisorción [25]. La ecuación de la isoterma se escribe:

$$q_e = \frac{q_m b_o C_e}{1 + b_o C_e} \quad (4)$$

Donde q_m es la capacidad máxima de adsorción del adsorbente (mg/g biomasa), b_o es la energía de adsorción (L/mg) y C_e es la concentración de equilibrio de la solución (mg/L). La isoterma de Freundlich permite modelar empíricamente la adsorción multicapa del soluto en superficies heterogéneas, considerando una distribución energética exponencial de los sitios de adsorción [26]. Se describe como:

$$q_e = k_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Donde k_f es la constante de capacidad de adsorción ($L^n / mg^{(1-n)} g$ biomasa) y n es la constante de intensidad de adsorción [27]. Para obtener la cinética, se preparó una solución de 500 mL de BPA con una concentración de 5 ppm. A lo largo de una hora, se tomaron alícuotas cada 10 minutos para analizar la concentración del compuesto. Por otro lado, para estudiar las isotermas de adsorción, se prepararon 500 mL de soluciones de BPA con concentraciones de 2, 3, 4, 5 y 6 ppm, en este caso, se tomaron alícuotas únicamente al inicio y al final de los experimentos. Los ajustes de los modelos cinéticos y de isotermas se realizaron utilizando el programa MATLAB, específicamente con la herramienta cftool, que permite ajustar los datos experimentales a modelos matemáticos adecuados.

2.5 Caracterización físicoquímica

2.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Se analizó la morfología de las muestras del material nativo y carbonizado sin activaciones. Las muestras fueron observadas con un microscopio electrónico de barrido SEM-JEOL JSM-IT300.

2.5.2 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

Se utilizó un espectrómetro Cari 630 FTIR de Agilent Technologies, el cual permite obtener los espectros de absorción en el rango infrarrojo. Las muestras se analizaron en el rango de 4000 a 600 cm^{-1} . Los datos obtenidos fueron procesados y analizados utilizando el software Agilent MicroLabsoftware, lo que permitió identificar los grupos funcionales presentes en los materiales y evaluar las modificaciones estructurales luego del tratamiento hidrotermal.

2.5.3 Análisis Brunauer-Emmet-Teller (BET).

Para determinar el área superficial específica del hydrochar se utilizó un analizador de adsorción de gases Physisorption Analyzer Nova 600. Las muestras fueron desgasificadas al vacío, calentando el equipo a 120 °C a 10 °C/min y luego mantenerlas durante 1440 min. Las curvas de adsorción y desorción se registraron a una temperatura de 77.5 K. Además, se estableció el volumen específico y diámetro promedio de poro.

2.5.4 Caracterización eléctrica.

La caracterización eléctrica de los materiales se realizó mediante la preparación de pellets utilizando una prensa hidráulica Vertical Hydraulic Pellet Press de MTI Corporation, aplicando una presión de 30-40 MPa. Una vez formados los pellets, se sometieron a barridos de frecuencia utilizando un Semiconductor Device Parameter Analyzer. Este equipo permite determinar las propiedades eléctricas como la permitividad relativa (ϵ_r) de los materiales aplicando una señal eléctrica de frecuencia variable y registrando la respuesta del material, para obtener información sobre su conductividad (σ).

2.5.5 Análisis proximales.

Para los análisis proximales de cenizas, humedad, proteínas, grasas y azúcares, se siguieron los procedimientos señalados a continuación. Para el análisis de humedad, se pesaron crisoles vacíos, luego se añadieron 5 gramos de biomasa y se registró el peso. Las muestras se secaron en horno a 105 °C durante 24 horas. Para el análisis de cenizas, las muestras secas se colocaron en una mufla a 550 °C durante 8 horas, obteniendo la cantidad de cenizas por diferencia. En el análisis de proteínas, se utilizó el método Kjeldahl, donde se digirieron las muestras con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno, se destiló el vapor y se tituló con ácido clorhídrico, 0.2 N. Las grasas se extrajeron mediante el método Soxhlet con hexano durante 60 minutos a 130 °C, seguido de un lavado y recuperación del solvente. Finalmente, los carbohidratos se calcularon restando los porcentajes de grasas, proteínas y cenizas de la biomasa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Remoción de contaminante

La relación C/C_0 (concentración final/concentración inicial 5 ppm) para los distintos materiales presenta variaciones que revelan las diferencias en la capacidad de adsorción de BPA. Cuanto más pequeño sea el valor de C/C_0 significa que más BPA ha sido adsorbido por el material [29]. Para encontrar las concentraciones se utiliza la ecuación 7 obtenida de una curva de calibración de HPLC que transforma el área del pico en concentración de BPA.

$$[BPA] = \frac{(A-0,005)}{0,7304} \quad (6)$$

Donde $[BPA]$ es la concentración del contaminante (ppm), A es el área del pico en el cromatograma (mAU*min), el coeficiente de determinación para esta ecuación es $R^2 = 0,9994$.

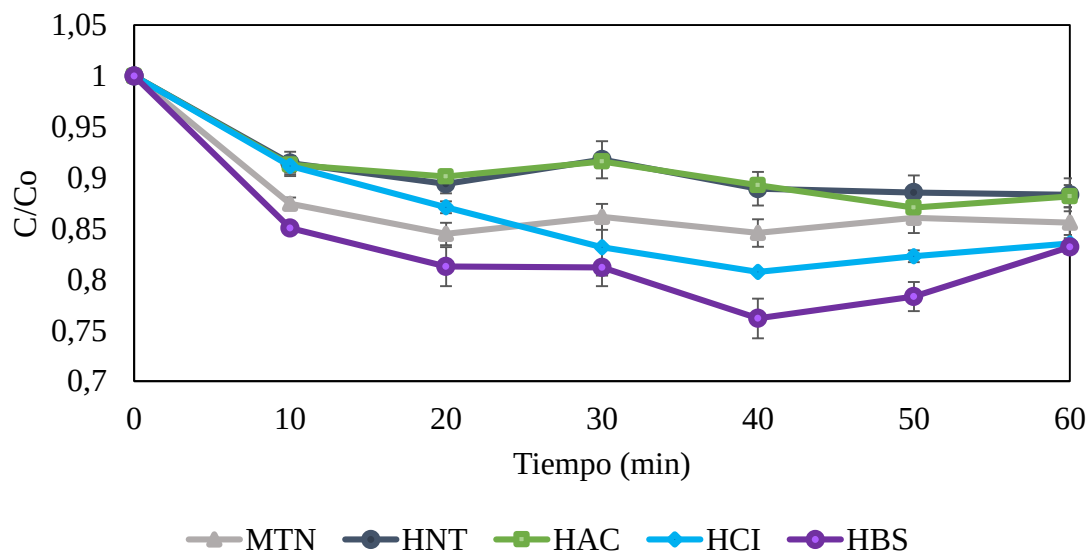


Figura 1. Remoción de BPA con soluciones de 5 ppm cuantificada mediante HPLC.

En la Figura 1, se comparan las propiedades de adsorción entre el material nativo (MTN), hydrochar no tratado (HNT), hydrochar activado con ácido cítrico dentro del reactor (HAC), hydrochar activado con ácido cítrico mediante impregnación (HCI) e hydrochar activado con bicarbonato de sodio impregnado (HBS). El material nativo muestra una relación C/Co mayor en comparación a los materiales activados, lo que indica que tiene una capacidad de adsorción limitada para el BPA. Este comportamiento es esperado, ya que la biomasa nativa generalmente presenta una estructura con porosidad y superficies limitadas para la adsorción de contaminantes como el BPA. En cambio, el material carbonizado sin ninguna activación adicional no presenta una mejora significativa en su capacidad de adsorción, sugiriendo que la simple carbonización del material no es suficiente para mejorar de manera considerable las propiedades de adsorción. Esto es consistente con estudios previos que indican que la carbonización de biomasa sin tratamiento adicional a menudo da lugar a materiales con porosidad insuficiente y superficies activas limitadas [30].

Por otro lado, los hydrochars modificados con soluciones ácidas y básicas impregnadas (HCI, y HBS) presentan una capacidad de adsorción significativamente mejorada, evidenciada por los menores valores de C/Co . Estos materiales muestran una mayor eficacia en la eliminación de BPA de la solución, lo que sugiere que la impregnación o activación con soluciones ácidas o básicas mejora sustancialmente la estructura superficial y la porosidad del material [cita].

La activación en un solo paso con ácido cítrico dentro del reactor no muestra una mejora significativa respecto al hydrochar no tratado, en comparación a la activación mediante impregnación. Este comportamiento sugiere que el método de impregnación puede ser más

eficiente en términos de la distribución de los reactivos y la creación de sitios activos en la superficie del material [31]. Es posible que el proceso de impregnación permita una mayor penetración de los reactivos en la estructura del hydrochar, favoreciendo la creación de micro y mesoporos adicionales que aumentan la superficie activa disponible para la adsorción [32].

El hydrochar activado con bicarbonato de sodio, presenta el valor más bajo de C/Co (0,76) al tiempo de 40 min, lo que indica una excelente capacidad de adsorción de BPA. Este material puede tener una mayor cantidad de grupos básicos en su superficie, los cuales podrían interactuar más eficazmente con el BPA, favoreciendo su adsorción. Los materiales que se activan con bases, como el bicarbonato de sodio, generalmente tienen un comportamiento de adsorción más robusto debido a la generación de sitios activos con mayor afinidad por contaminantes orgánicos como el BPA [33].

3.2 Cinética de adsorción

Los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden, Figura 2, se aplicaron para describir la velocidad y el mecanismo de adsorción de los diferentes materiales. Los materiales MTN, HCI y HBS se ajustaron al modelo de pseudo primer orden, lo cual indica que la velocidad de adsorción de BPA en estos materiales depende principalmente de la concentración de BPA en la solución. Esto sugiere que el proceso de adsorción en estos materiales es más rápido al inicio y se estabiliza cuando la mayor parte de los sitios activos de adsorción se ocupan [34]. Los ajustes adecuados a los modelos son evidenciados por los valores de R^2 en la Tabla 1. Es posible que, en estos casos, los sitios activos generados por la activación química se llenen rápidamente al principio de la adsorción, lo que lleva a un comportamiento de primer orden.

Por otro lado, el hydrochar no tratado (HNT) y el activado con ácido cítrico dentro del reactor (HAC) siguen un modelo de pseudo segundo orden, lo que implica que la velocidad de adsorción está relacionada con la cantidad de sitios activos disponibles en la superficie del adsorbente. En este caso, el proceso de adsorción es más complejo y ocurre a un ritmo más lento, lo que puede sugerir que la adsorción no solo depende de la concentración de BPA, sino también de la interacción química entre el BPA y los grupos funcionales generados en los materiales [35].

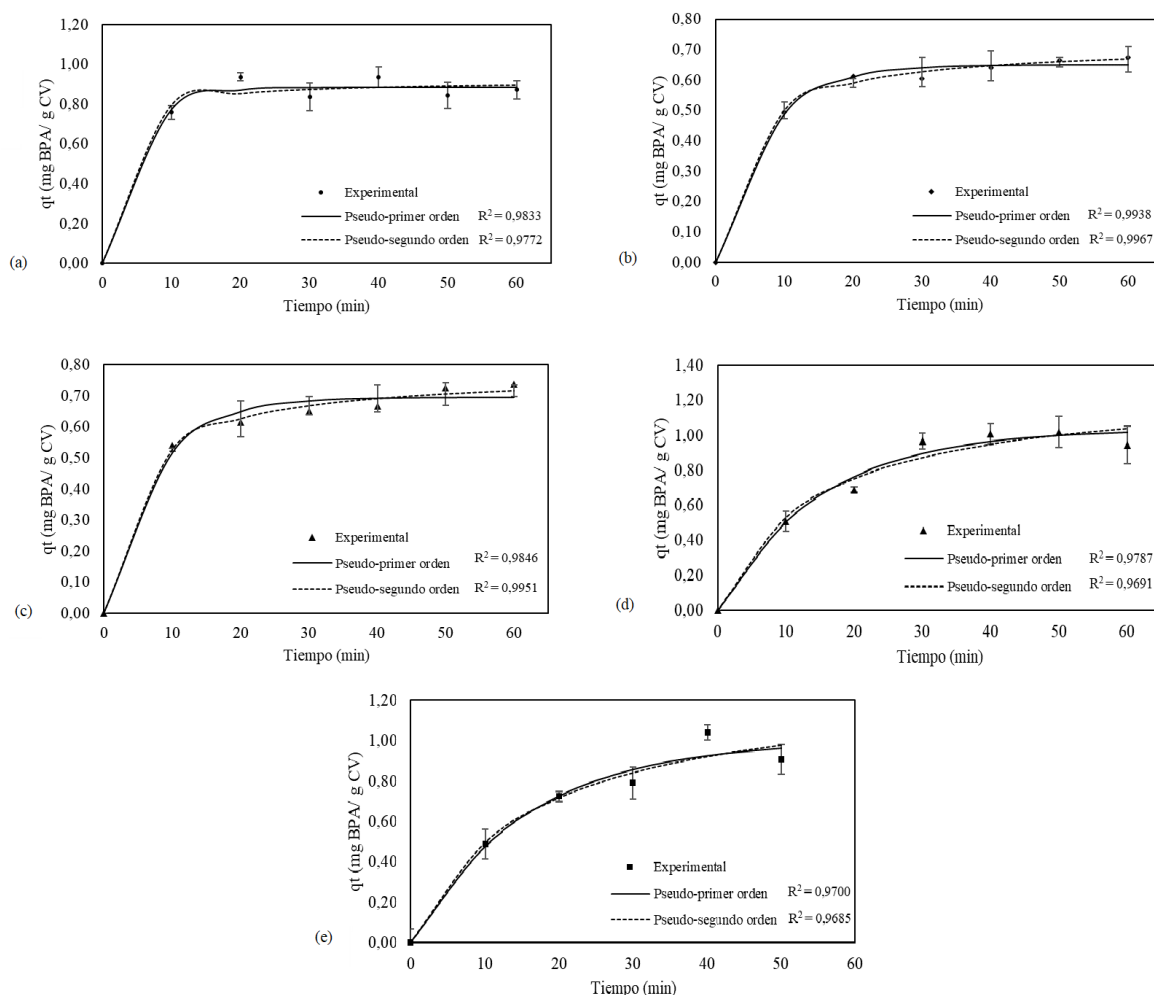


Figura 2. Modelos cinéticos de adsorción para material nativo (a), hydrochar no tratado (b), hydrochar carbonizado con ácido cítrico(c), hydrochar impregnado C6H8O7 (d) y hydrochar impregnado NaHCO3 (e).

Tabla 1. Parámetros cinéticos para modelos de pseudo-primer y segundo orden.

Parámetros cinéticos	Material nativo MTN	Hydrochar no tratado HNT	Hydrochar C₆H₈O₇ HAC	Hydrochar impregnado C₆H₈O₇ HCl	Hydrochar impregnado NaHCO₃ HBS
Pseudo-primer orden					
q_e	0,8856	0,6510	0,6957	1,0350	1,0040
k_1	0,2067	0,1391	0,1353	0,0669	0,0642
R^2	0,9833	0,9938	0,9846	0,9787	0,9700
Pseudo-segundo orden					
q_e	0,9176	0,7168	0,7722	1,2850	1,2960
k_2	0,6992	0,3224	0,2772	0,0548	0,0477
R^2	0,9772	0,9967	0,9951	0,9691	0,9685

3.3 Isotermas de adsorción

En cuanto a las isotermas de adsorción, Figura 3, se observó que el material nativo (MTN) se ajustó mejor a la isoterma de Langmuir, lo que indica una adsorción monomolecular en sitios activos homogéneos del material. Esto quiere decir que, para el material nativo, la adsorción alcanza una capacidad máxima, con una ocupación de sitios limitada que se alcanza rápidamente a medida que aumenta la concentración de BPA. Los parámetros de las isotermas se observan en la Tabla 2.

Por otro lado, el hydrochar impregnado bicarbonato de sodio (HBS) mostró un mejor ajuste a la isoterma de Freundlich, lo que muestra una adsorción multimolecular en sitios activos heterogéneos, con una capacidad de adsorción que no se ve tan rápidamente limitada. Este comportamiento se debe a que la este hydrochar (HBS) modificado tiene una mayor capacidad para adsorber BPA a concentraciones más bajas [36]. Cabe señalar que se excluyó

el último punto de la isoterma de Biomasa 3 debido a que el valor de q_e (cantidad de BPA adsorbido por unidad de adsorbente) fue inferior en comparación con el punto anterior. Esto podría indicar que, a altas concentraciones de BPA, la capacidad de adsorción del material se ve afectada, posiblemente por la saturación o la presencia de restricciones en los sitios activos disponibles.

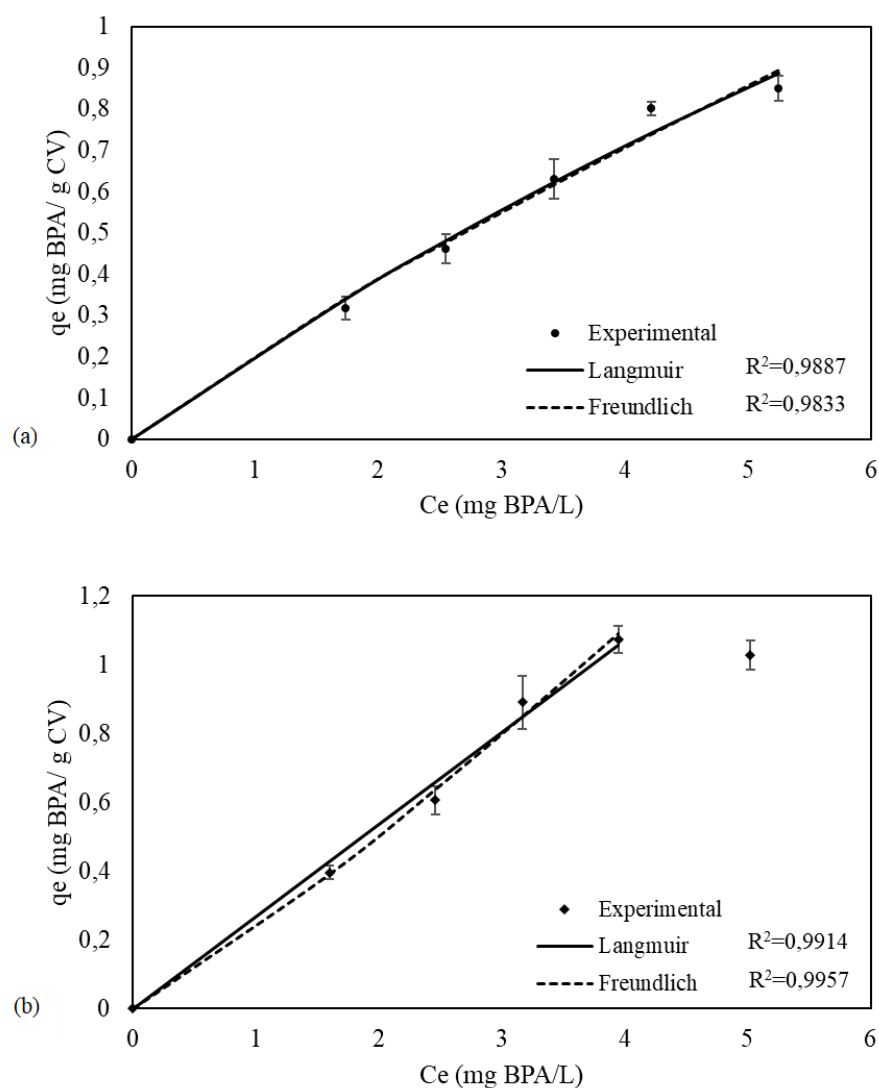


Figura 3. Isothermas de adsorción para material nativo (a) e hydrochar impregnado bicarbonato de sodio (b).

Tabla 2. Parámetros de isotermas de adsorción.

Isotermas	Material nativo MTN	Hydrochar impregnado NaHCO ₃ HBS
Isoterma de Langmuir		
q_m	4,354	386,0000
b_o	0,0487	0,0006964
R^2	0,9887	0,9914
Isoterma de Freundlich		
K_f	0,2109	0,2295
n	1,148	0,8818
R^2	0,9833	0,9957

3.4 SEM

Mediante la microscopía, se puede analizar la superficie de materiales, tanto en su forma original como modificada.

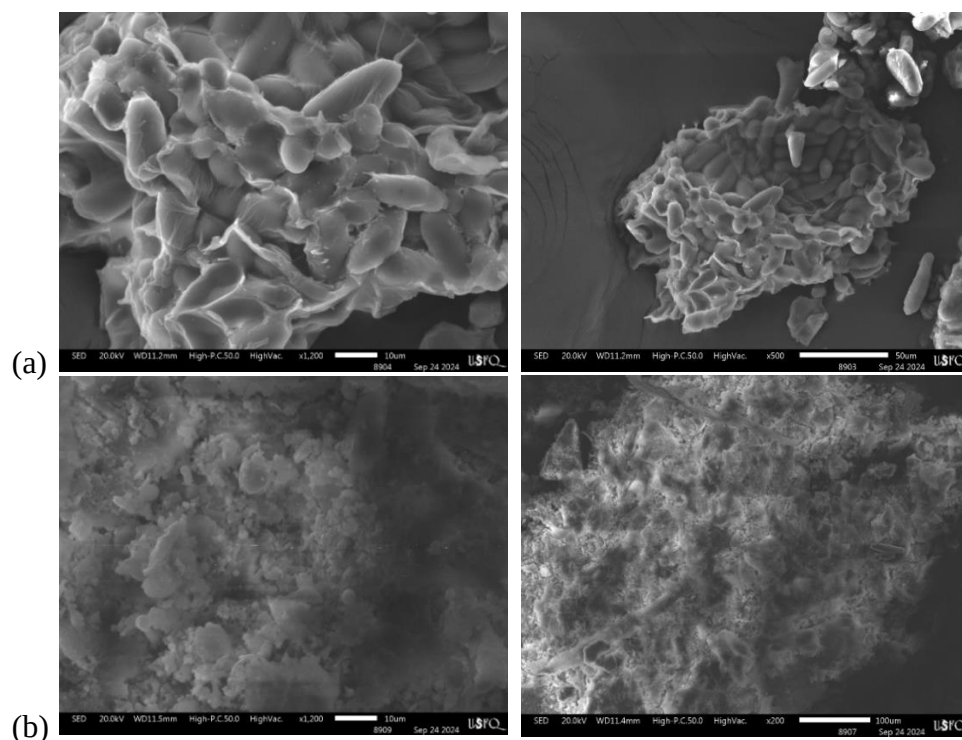


Figura 4. Ejemplos de morfología de material nativo (a) e hydrochar no tratado (b) (magnificación 1200x, 500x y 200x).

En la Figura 4, el material nativo (MTN) tiene una estructura muy poco porosa, con una superficie aparentemente recubierta por una especie de "manto" que podría estar formando una capa densa. A pesar de que el hydrochar no tratado (HNT) presenta una mayor porosidad y una superficie más irregular en comparación con el material nativo, los resultados experimentales muestran que el material nativo tuvo un mejor desempeño en términos de adsorción de BPA. Este hallazgo puede parecer inesperado, dado que la mayor porosidad del hydrochar sugiere una mayor área superficial disponible para la adsorción. Sin embargo, la morfología del material nativo, a pesar de ser menos porosa, podría estar favoreciendo una mayor afinidad o interacción específica con las moléculas de BPA, lo que resulta en una mejor capacidad de adsorción.

Se puede inferir que la estructura de los materiales adsorbentes no es el único factor que influye en la adsorción. Otros aspectos, como la química superficial, la distribución de los sitios activos y la naturaleza de las interacciones moleculares entre el adsorbente y el contaminante, también juegan un papel fundamental en la eficiencia del proceso de adsorción [37].

3.5 FTIR

Este análisis permite identificar grupos funcionales presentes en los materiales, como hidroxilos, carboxilos y carbonilos, y cómo estos varían a través de los procesos de modificación del hydrochar. En la Figura 5, se muestran los espectros para todas las biomásas.

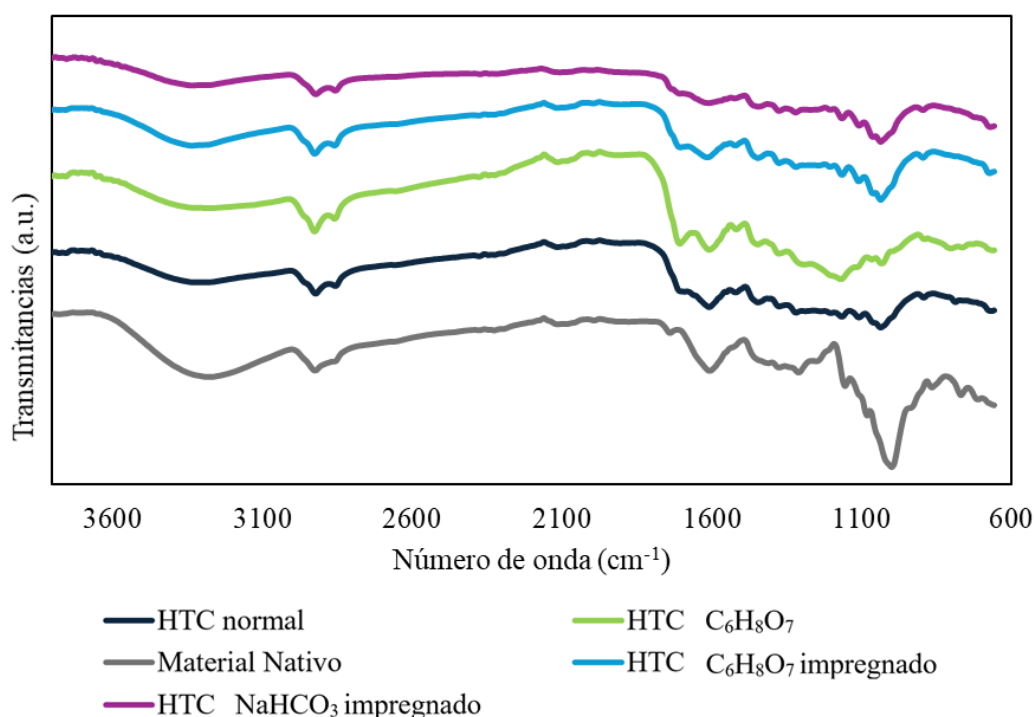


Figura 5. Espectros FTIR de material nativo, hydrochar no tratado e hydrochars modificados.

Las soluciones ácidas, como el ácido cítrico, pueden generar grupos funcionales en la superficie del material que interactúan favorablemente con los contaminantes, facilitando su adsorción. Esto puede estar relacionado con una mayor formación de grupos oxigenados en la superficie del hydrochar, los cuales son conocidos por mejorar la afinidad por contaminantes como el BPA. Las biomasas comparten similitudes estructurales, especialmente en cuanto a ciertos grupos funcionales, como los enlaces C-H, que son comunes en compuestos orgánicos. En el caso del hydrochar carbonizado con ácido cítrico, se observa que los picos en la región de los enlaces C-H (alrededor de $2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$) tienen una intensidad ligeramente mayor en comparación con el hydrochar sin modificar. Esto se debe a que el tratamiento con ácido cítrico puede promover la formación de grupos adicionales, como ésteres o compuestos oxigenados, que refuerzan la absorción en esta

región. Además, el hydrochar tratado con ácido cítrico muestra un pico relevante en la región de 1700 cm^{-1} , que corresponde al grupo funcional carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), generalmente asociado con la formación de ácidos carboxílicos, lactonas o ésteres debido a la reacción con el ácido cítrico. Por otro lado, el hydrochar impregnado con bicarbonato de sodio no muestra modificaciones significativas en el espectro en comparación con el hydrochar sin tratar, lo que sugiere que esta impregnación no provoca cambios sustanciales en la estructura química. En cambio, el hydrochar impregnado con ácido cítrico presenta una disminución en la intensidad de los picos, lo que podría deberse a que, después de la impregnación, ambos materiales fueron sometidos a un proceso de lavado, eliminando parte de los compuestos superficiales o adsorbidos, y reduciendo la cantidad de grupos funcionales disponibles en la superficie del material.

3.6 BET

El área superficial específica medida por el método BET es un parámetro clave que describe la capacidad de adsorción del hydrochar. Para los resultados de la caracterización se tiene un valor de área específica de $2,032\text{ m}^2/\text{g}$ el cual es relativamente bajo comparado con otros materiales adsorbentes como el carbón activado, que puede tener áreas superficiales mucho más altas, generalmente superiores a $1000\text{ m}^2/\text{g}$ [38]. Sin embargo, este valor indica que el hydrochar de cáscara de verde tiene una superficie accesible para adsorber moléculas, aunque su capacidad de adsorción podría ser limitada en comparación con materiales con áreas superficiales más grandes. Un volumen específico de poro de $0,0043\text{ cm}^3/\text{g}$, demuestra que este hydrochar tiene una capacidad moderada de almacenamiento de líquidos o gases en sus poros. El diámetro promedio de poro es $6,0790\text{ nm}$ es un valor que sugiere que los poros

del hydrochar están dentro del rango de poros mesoporosos (poros de 2 a 50 nm) [39]. Los hydrochars modificados mediante impregnación de soluciones ácidas y básicas mostraron un mayor porcentaje de adsorción; sin embargo, se necesita realizar un análisis BET para corroborar los cambios en el área superficial y comprender mejor las razones de su mejor desempeño como adsorbentes.

3.7 Caracterización eléctrica

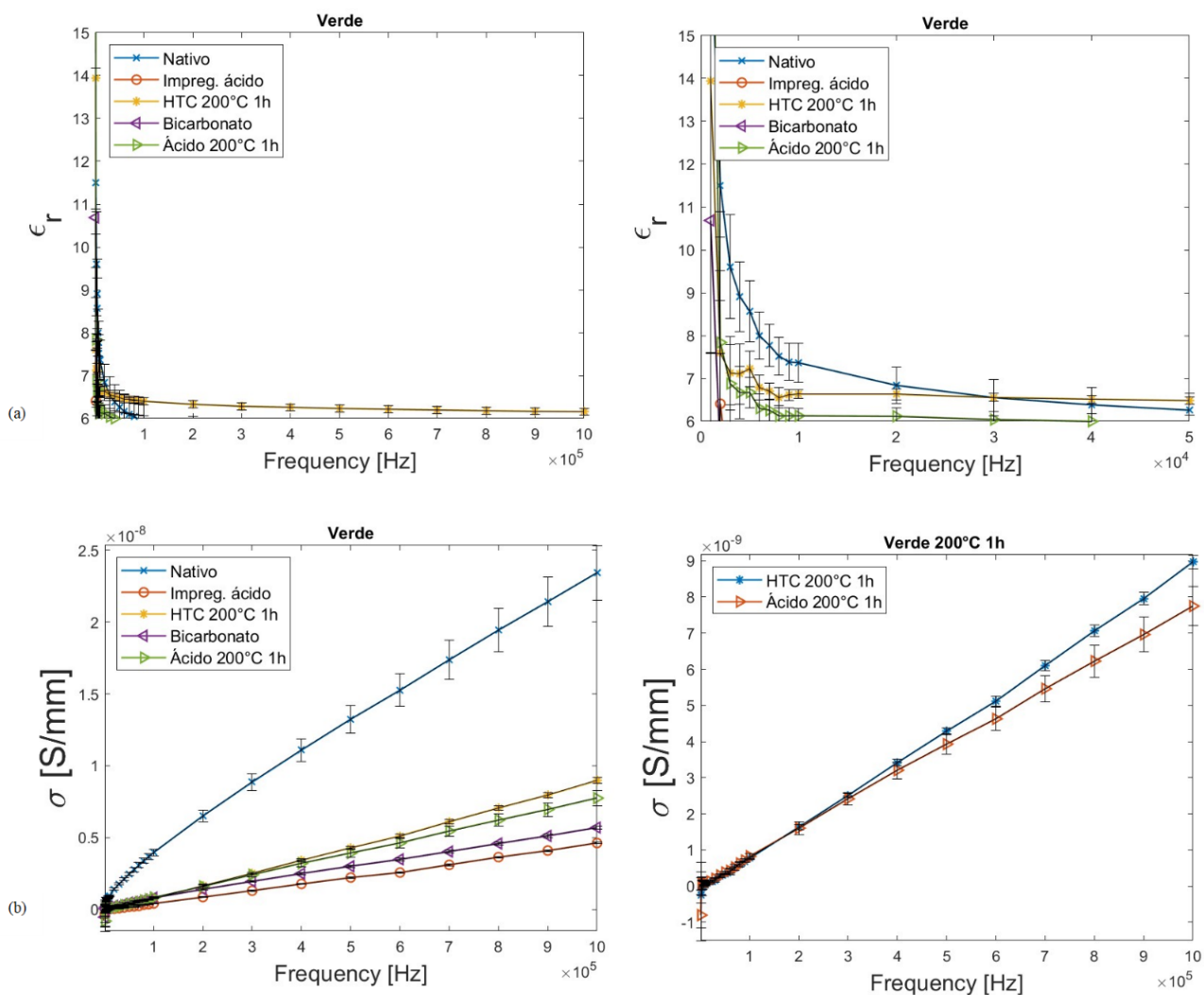


Figura 6. Permitividad relativa (a) y conductividad (b) de material nativo, hydrochar no tratado e hydrochars modificados.

En este caso, en la Figura 6, se observa que el material nativo presenta una mayor permitividad relativa en comparación con el hydrochar y sus derivados. En el caso de los materiales derivados de biomasa, como las cáscaras de verde y el hydrochar, la caracterización eléctrica es importante porque debido a su naturaleza orgánica y estructural, pueden ofrecer propiedades únicas para aplicaciones de almacenamiento de energía, materiales dieléctricos, y soluciones sostenibles en la industria de la energía [40]. Los materiales ricos en lignina y celulosa, como las cáscaras de verde, tienen una mayor permitividad relativa en comparación con otros materiales derivados de biomasa debido a la mayor cantidad de grupos funcionales polares presentes en su estructura química.

3.8 Análisis proximales

Los análisis de componentes como humedad, cenizas, proteínas, grasas y azúcares son fundamentales para comprender la composición y calidad de los materiales orgánicos, especialmente en el contexto de la biomasa. Además, permiten determinar la viabilidad de estos materiales para diversas aplicaciones. Los diferentes tratamientos aplicados al hydrochar modificaron significativamente sus propiedades físicas y químicas. En la Tabla 3, se observa que la activación con ácidos y bases ha demostrado ser efectiva para reducir el contenido de cenizas y, en algunos casos, modificar la humedad. El material nativo presenta un contenido de humedad relativamente alto (4,82%), lo cual es común en materiales biológicos, mientras que, en los hydrochars, el contenido de humedad disminuye significativamente, indicando un proceso de secado eficiente durante su producción. En cuanto a las cenizas, el material nativo contiene una cantidad considerable de cenizas (8,41%), lo que sugiere la presencia de minerales inorgánicos, pero se observa una reducción

drástica en el contenido de cenizas en todos los hydrochars, especialmente en los tratados con ácido cítrico, lo que indica que el proceso de producción y los tratamientos posteriores eliminan una parte significativa de las sustancias minerales. Respecto a las proteínas, el material nativo tiene un contenido moderado (7,38%), mientras que en algunos tipos de hydrochar, especialmente en los no tratados y los tratados con ácido cítrico, se aprecia un aumento en el contenido de proteínas, lo cual podría deberse a la concentración relativa de las proteínas durante el proceso de producción. En cuanto a las grasas, el material nativo presenta un contenido de 11,16%, pero en el hydrochar no tratado se observa una disminución en el contenido de grasas, lo cual es esperado debido a la degradación de estas moléculas durante la producción del hydrochar [41]. Finalmente, el material nativo contiene un alto porcentaje de azúcares (73,05%), sugiriendo que es una fuente rica en carbohidratos, comparado con el hydrochar no tratado se observa un aumento en el contenido de azúcares, lo que podría estar relacionado con la formación de nuevos compuestos durante el tratamiento [42].

Tabla 3. Porcentaje de humedad, cenizas, proteínas, grasas y azúcares.

Material	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteínas (%)	Grasas (%)	Azúcares (%)
Material nativo	4,8268	8,4093	7,3839	11,1586	68,2214
Hydrochar no tratado	3,6600	1,2480	12,5511	6,5035	76,0375
Hydrochar C ₆ H ₈ O ₇	2,9244	0,2299	6,5244	-	-
Hydrochar impregnado C ₆ H ₈ O ₇	3,4144	0,4023	12,2561	-	-
Hydrochar impregnado NaHCO ₃	3,7380	2,0891	11,6327	-	-

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos sugieren que la activación de hydrochar con soluciones ácidas o básicas mejora significativamente las propiedades de adsorción de BPA en comparación con el material nativo o el hydrochar no activado. Además, el método de activación con bicarbonato de sodio destaca como el más efectivo, lo que puede abrir nuevas oportunidades para el diseño de adsorbentes eficientes en la remoción de contaminantes en diversas aplicaciones ambientales. Aunque el hydrochar activado con bicarbonato de sodio muestra la mejor capacidad de adsorción, sigue existiendo un potencial para mejorar el rendimiento de adsorción mediante optimización de los parámetros de activación, como la concentración de reactivos, el tiempo de contacto y las condiciones de temperatura. La mejora de la eficiencia en la activación de estos materiales podría contribuir a una mayor capacidad de adsorción de BPA y otros contaminantes orgánicos, ampliando su aplicación en procesos de tratamiento de aguas o suelos contaminados. Los materiales con cinética de pseudo primer orden (MTN, HCI y HBS) son más adecuados para procesos de adsorción rápida, ideales para la remoción de BPA en corto tiempo. Estos materiales ocupan rápidamente los sitios activos al inicio del proceso. En cambio, los materiales con cinética de pseudo segundo orden (HNT y HAC) son mejores para aplicaciones que requieren una adsorción más prolongada, ya que presentan interacciones más fuertes y específicas con el BPA, lo que resulta en una mayor eficiencia de adsorción a lo largo del tiempo, aunque de manera más lenta. Aunque el hydrochar tiene una mayor porosidad y una superficie más irregular, el material nativo mostró una mejor capacidad de adsorción, lo que subraya la importancia de considerar no solo la morfología, sino también las características químicas y estructurales al evaluar los materiales adsorbentes. Se recomienda probar la modificación de los hydrochars con

soluciones más concentradas de ácido cítrico y bicarbonato de sodio, ya que esto podría mejorar sus propiedades y rendimiento en aplicaciones específicas. Además, sería importante determinar el porcentaje de grasas y azúcares en los hydrochars modificados para evaluar los cambios en su composición. Para optimizar su capacidad de adsorción, se sugiere realizar experimentos de adsorción de BPA utilizando soluciones con concentraciones mayores a 6 ppm, lo que permitirá determinar la adsorción máxima y obtener información clave sobre el comportamiento de los hydrochars en las isothermas de adsorción.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Doria Herrera, G. M., Peñuela-Meza, G., Valencia, G. C., Gomez, I. N., & Soltan, J. (2020). Determinación Espectrofotométrica Del Perfil Del Bisfenol A En El Proceso De Fotodegradación Con Oxígeno Molecular Singlete. *Ciencia En Desarrollo*, 11(2), 177-190. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.11240>
- [2] Pop, C.-E., Miu, B. A., Németh, D., Wolff, R., Mihăilescu, D. F., Avramescu, S. M., & Mernea, M. (2024). Bisphenol A analysis and quantification inconsistencies via HPLC-UV: A systematic review with technical notes. *Discover Applied Sciences*, 6(4), 171. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05617-z>
- [3] Ministerio de Comercio Exterior (2017) Informe Sector Bananero Ecuatoriano. <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/Informe-sector-bananero-esp%C3%B1ol-04dic17.pdf>
- [4] Rasam, S., Keshavarz Moraveji, M., Soria-Verdugo, A., & Salimi, A. (2021). Synthesis, characterization and absorbability of Crocus sativus petals hydrothermal carbonized hydrochar and activated hydrochar. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 159, 108236. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108236>
- [5] Xia, Y., Yang, T., Zhu, N., Li, D., Chen, Z., Lang, Q., Liu, Z., & Jiao, W. (2019). Enhanced adsorption of Pb(II) onto modified hydrochar: Modeling and mechanism analysis. *Bioresource Technology*, 288, 121593. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121593>
- [6] Deng, W., Kuang, X., Xu, Z., Li, D., Li, Y., & Zhang, Y. (2024). Adsorption of Cadmium and Lead Capacity and Environmental Stability of Magnesium-Modified High-Sulfur Hydrochar: Greenly Utilizing Chicken Feather. *Toxics*, 12(5), 356. <https://doi.org/10.3390/toxics12050356>

- [7] Zhang, X., Gao, B., Fang, J., Zou, W., Dong, L., Cao, C., Zhang, J., Li, Y., & Wang, H. (2019). Chemically activated hydrochar as an effective adsorbent for volatile organic compounds (VOCs). *Chemosphere*, 218, 680-686. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.144>
- [8] Pivonello, C., Muscogiuri, G., Nardone, A., Garifalos, F., Provisiero, D., Verde, N., Angelis, C., Conforti, A., Piscopo, M., Auriemma, R., Colao, A. & Pivonello, R. (2020) Bisphenol A: an emerging threat to female fertility. *Reprod Biol Endocrinol*, 18:22. <https://doi.org/10.1186%2Fs12958-019-0558-8>
- [9] Santos, C. R. dos, Arcanjo, G. S., Araújo, A. A. D., Santos, L. V. de S., & Amaral, M. C. S. (2024). Occurrence, environmental risks, and removal of bisphenol A and its analogues by membrane bioreactors. *Chemical Engineering Journal*, 494, 153278. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153278>
- [10] European Environment Agency. (2023). *People's exposure to bisphenol A*. <https://www.eea.europa.eu/publications/peoples-exposure-to-bisphenol-a#:~:text=The%20new%20EFSA%20TDI%20of,concern%20in%20the%20European%20population>
- [11] Dueñas-Moreno, J., Mora, A., Kumar, M., Meng, X.-Z., & Mahlknecht, J. (2023). Worldwide risk assessment of phthalates and bisphenol A in humans: The need for updating guidelines. *Environment International*, 181, 108294. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108294>
- [12] Falcomer, A. L., Riquette, R. F. R., De Lima, B. R., Ginani, V. C., & Zandonadi, R. P. (2019). Health Benefits of Green Banana Consumption: A Systematic Review. *Nutrients*, 11(6), 1222. <https://doi.org/10.3390/nu11061222>
- [13] Martín Lorenzo, M., Piedra-Buena Díaz, A., Díaz Romero, C., Rodríguez-Rodríguez, E. M., & Lobo, M. G. (2024). Physicochemical and Nutritional Characterization of Green Banana Flour

from Discarded Cavendish Bananas. *Sustainability*, 16(15), 6647.

<https://doi.org/10.3390/su16156647>

[14] Yusuf, I., Flagiello, F., Ward, N. I., Arellano-García, H., Avignone-Rossa, C., & Felipe-Sotelo, M. (2020) Valorisation of banana peels by hydrothermal carbonisation: Potential use of the hydrochar and liquid by-product for water purification and energy conversion. *Bioresource Technology Reports*, 12, 100582. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100582>

[15] Khanzada, A. K., Al-Hazmi, H. E., Kurniawan, T. A., Majtacz, J., Piechota, G., Kumar, G., Ezzati, P., Saeb, M. R., Rabiee, N., Karimi-Maleh, H., Lima, E. C., & Maćkonia, J. (2024). Hydrochar as a bio-based adsorbent for heavy metals removal: A review of production processes, adsorption mechanisms, kinetic models, regeneration and reusability. *Science of The Total Environment*, 945, 173972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173972>

[16] Fang, J., Gao, B., Mosa, A., & Zhan, L. (2017). Chemical activation of hickory and peanut hull hydrochars for removal of lead and methylene blue from aqueous solutions. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 29(1), 197-204. <https://doi.org/10.1080/09542299.2017.1403294>

[17] Alcañiz-Monge, J., Román-Martínez, M. D. C., & Lillo-Ródenas, M. Á. (2022). Chemical Activation of Lignocellulosic Precursors and Residues: What Else to Consider? *Molecules*, 27(5), 1630. <https://doi.org/10.3390/molecules27051630>

[18] Lecaro, M. & Pullas, Y. (2023). *Evaluación y caracterización fisicoquímica y eléctrica de hidrocarbones (hydrochars) producidos a partir de residuos lignocelulósicos para la remoción de contaminantes emergentes presentes en el agua* (Tesis de grado). Repositorio Universidad San Francisco de Quito

- [19] Landázuri, A. C., Villarreal, J. S., Andrade, J. C., Sornoza, I., & Lagos, A. S. (2019). Bulk balance filtration model (BBFM) for lead and iron physisorption through *Moringa oleifera* Lam. Seed husks. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103302. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103302>
- [20] Douglas A. Skoog, F. James Holler & Stanley R. Crouch (2018) Principles of Instrumental Analysis Sevent Edition. *CENGAGE Learning*. ISBN: 978-1-305-57721-3
- [21] Rodriguez, R., Castillo, E., & Sinuco, D. (2019). Validation of an HPLC Method for Determination of Bisphenol-A Migration from Baby Feeding Bottles. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2019, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2019/1989042>
- [22] Dong, X., Qi, X., Liu, N., Yang, Y., & Piao, Y. (2017). Direct Electrochemical Detection of Bisphenol A Using a Highly Conductive Graphite Nanoparticle Film Electrode. *Sensors*, 17(4), 836. <https://doi.org/10.3390/s17040836>
- [23] Xing, X., Alharbi, N. S., Ren, X., & Chen, C. (2022). A comprehensive review on emerging natural and tailored materials for chromium-contaminated water treatment and environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107325. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107325>
- [24] Carbonel, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3). <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>

- [25] Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by anactivated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.006>
- [26] Inyinbor, A. A., Adekola, F. A., & Olatunji, G. A. (2016). Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto *Raphia hookeri* fruit epicarp. *Water Resources and Industry*, 15, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.06.001>
- [27] Murphy, O. P., Vashishtha, M., Palanisamy, P., & Kumar, K. V. (2023). A Review on the Adsorption Isotherms and Design Calculations for the Optimization of Adsorbent Mass and Contact Time. *ACS Omega*, 8(20), 17407-17430. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08155>
- [28] Contreras, R. (2023). *Producción de hidrocarbón a partir de residuos lignocelulósicos para la remoción de contaminantes emergentes orgánicos presentes en aguas residuales* (Tesis de grado). Repositorio Universidad San Francisco de Quito
- [29] Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. A., & Pérez, E. H. (2019). *Bisphenol-A: A contaminant present in plastic containers*. ITTPA, 1(1), 35-41.
- [30] Soffian, M. S., Halim, F. Z. A., Aziz, F., A. Rahman, M., Amin, M. A. M., & Chee, D. N. A. (2022). Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment. *Environmental Advances*, 9, 100259. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100259>
- [31] Jaber, L., Backer, S. N., Laoui, T., Abumadi, F., Koujan, M. M. S., Khalil, K. A., Shanableh, A., & Atieh, M. A. (2024). Recent trends in surface impregnation techniques on activated carbon for efficient pollutant removal from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100562. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100562>

- [32] Mane, P. V., Rego, R. M., Yap, P. L., Losic, D., & Kurkuri, M. D. (2024). Unveiling cutting-edge advances in high surface area porous materials for the efficient removal of toxic metal ions from water. *Progress in Materials Science*, 146, 101314. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101314>
- [33] Petrovic, B., Gorbounov, M., & Soltani, S. M. (2021). Influence of surface modification on selective CO₂ adsorption: A technical review on mechanisms and methods. *Microporous and Mesoporous Materials*, 312, 110751. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110751>
- [34] Tenea, A.-G., Dinu, C., Rus, P. A., Ionescu, I. A., Gheorghe, S., Iancu, V. I., Vasile, G. G., Pascu, L. F., & Chiriac, F. L. (2024). Exploring adsorption dynamics of heavy metals onto varied commercial microplastic substrates: Isothermal models and kinetics analysis. *Heliyon*, 10(15), e35364. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35364>
- [35] Liu, G., Li, X., & Campos, L. (2017). Role of the functional groups in the adsorption of bisphenol A onto activated carbon: Thermal modification and mechanism. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, 66, jws2017047. <https://doi.org/10.2166/aqua.2017.047>
- [36] Fatih, G. (2024). Hydrochar and Value-Added Chemical Production Through Hydrothermal Carbonisation of Woody Biomass. *Journal of the Turkish Chemical Society Section B: Chemical Engineering*, 7. <https://doi.org/10.58692/jotcsb.1484204>
- [37] Raji, Z., Karim, A., Karam, A., & Khalloufi, S. (2023). Adsorption of Heavy Metals: Mechanisms, Kinetics, and Applications of Various Adsorbents in Wastewater Remediation—A Review. *Waste*, 1(3), 775-805. <https://doi.org/10.3390/waste1030046>

- [38] Alcañiz-Monge, J., Linares-Solano, A., & Rand, B. (2001). Water Adsorption on Activated Carbons: Study of Water Adsorption in Micro- and Mesopores. *Journal of Physical Chemistry B - J PHYS CHEM B*, 105. <https://doi.org/10.1021/jp010674b>
- [39] Kausar, S., Yousaf, M., Mir, S., Awwad, N. S., Alturaifi, H. A., & Riaz, F. (2024). Mesoporous Materials: Synthesis and electrochemical applications. *Electrochemistry Communications*, 169, 107836. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2024.107836>
- [40] Amienghemhen, O., Okonkwo, T., Onivefu, A., & Ifijen, I. (2024). Functional organic materials for energy storage and conversion: Recent developments and future perspectives. *Chemical Papers*, 78. <https://doi.org/10.1007/s11696-024-03618-9>
- [41] Petrovič, A., Predikaka, T. C., Škodič, L., Vohl, S., & Čuček, L. (2023). Hydrothermal co-carbonization of sewage sludge and whey: Enhancement of product properties and potential application in agriculture. *Fuel*, 350, 128807. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128807>
- [42] Ahmed, Z., El-Sharnouby, G., & El-Waseif, M. (2021). Use of Banana Peel As A By-Product to Increase The Nutritive Value of The Cake. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 12. <https://doi.org/10.21608/jfds.2021.167053>

6. ANEXOS

ANEXO A

Tabla 4. Remoción de BPA resumida con *Co* 5 ppm.

	Tiempo (min)	MTN	HNT	HAC	HCI	HBS
R E M O C I O N E S (%)	10	12,55	8,41	8,71	8,85	14,96
	20	15,52	10,42	9,90	21,28	18,73
	30	13,84	8,09	8,40	16,83	18,83
	40	15,43	10,86	10,73	19,26	23,83
	50	13,94	11,22	12,95	17,71	21,68
	60	14,41	11,52	11,82	16,46	16,81

ANEXO B

Tabla 5. Disminución de la concentración de BPA debido a la adsorción.

	Tiempo (min)	MTN	HNT	HAC	HCI	HBS
C/Co	0	1	1	1	1	1
	10	0,87	0,91	0,91	0,91	0,85
	20	0,84	0,89	0,90	0,87	0,81
	30	0,86	0,92	0,92	0,83	0,81
	40	0,85	0,89	0,89	0,81	0,76
	50	0,86	0,89	0,87	0,82	0,78
	60	0,86	0,88	0,88	0,84	0,83