



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

OBTENCIÓN DE NANOCOMPÓSITOS DE HIDROGELES DE
POLIACRILAMIDA/NANOTUBOS DE CARBONO,
CON POSIBLES APLICACIONES BIOMÉDICAS

MARIELIS JOSÉ COVA ROJAS

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN QUÍMICA

CUMANÁ, 2025



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

OBTENCIÓN DE NANOCOMPÓSITOS DE HIDROGELES DE
POLIACRILAMIDA/NANOTUBOS DE CARBONO,
CON POSIBLES APLICACIONES BIOMÉDICAS
(Modalidad: Tesis de Grado)

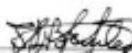
MARIELIS JOSÉ COVA ROJAS

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN QUÍMICA

CUMANÁ, 2025

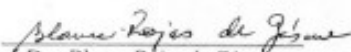
OBTENCIÓN DE NANOCOMPÓSITOS DE HIDROGELES DE
POLIACRILAMIDA/NANOTUBOS DE CARBONO, CON POSIBLES
APLICACIONES BIOMÉDICAS

APROBADO POR:


Dr. José Luis Benítez
Asesor


Ldo. Fernando Mago
Co-Asesor




Dra. Blanca Rojas de Gásche
Jurado Principal


M.C. José Bucarito
Jurado Principal

ÍNDICE

ÍNDICE	iii
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	x
RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	1
Funcionalización De MWCNT	3
Funcionalización de MWCNT asistido por ultrasonido	6
Aplicaciones	6
Hidrogeles	7
Mecanismo De Polimerización De La AAm	10
Nanocompuestos Poliméricos.....	12
METODOLOGÍA	13
Funcionalización De MWCNT Con Ácido Sulfúrico	13
Determinación Del Porcentaje De Grupos Ácidos En Los MWCNT-f.....	13
Caracterización De Los MWCNT Y MWCNT-f Mediante FTIR	14
Síntesis De Hidrogeles De PAAM Y PAAM-MWCNT-F Mediante Polimerización Radicalaria	14
Obtención De Hidrogeles Cargados Con Plata	17
Determinación De La Cantidad De Plata Absorbida Por Los Hidrogeles	17
Caracterización De Los Hidrogeles Mediante FTIR-ATR	18
Determinación Gravimétrica Del Índice De Hinchamiento	18
Cinética De Hinchamiento	19
Mecanismo De Difusión Del Agua	19
Estudio Morfológico De Los Hidrogeles Mediante Microscopía Óptica (MO)	20
Actividad Antimicrobiana	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21

Espectroscopia FTIR De MWCNT y MWCNT-f-----	21
Cuantificación De Los Grupos Ácidos En Mwcnt-F Por Titulación Ácido-Base-----	23
Espectroscopia FTIR-ATR De Hidrogeles-----	24
Hinchamiento De Hidrogeles -----	28
Cinética De Hinchamiento -----	32
Mecanismo De Difusión Del Agua -----	35
Absorción De Especies Metálicas -----	39
Análisis Morfológico De Los Hidrogeles -----	40
Prueba Antibacteriana-----	43
CONCLUSIONES -----	47
RECOMENDACIONES -----	49
BIBLIOGRAFÍA -----	50
APÉNDICES -----	56

DEDICATORIA

Quiero agradecer, primeramente, a Dios por darme la fortaleza y ser mi apoyo en todo momento de dificultad, quien me ha otorgado la capacidad y las oportunidades para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Al profesor Oscar Gonzales, por incluirme en este proyecto de investigación, quien, a pesar de presentar limitaciones visuales y de salud, se mantuvo durante todo mi proceso al pendiente. Cuya rigurosidad académica y exigencia me impulsaron a dar lo mejor de mí.

A mi amigo y profesor Alfredo Rojas, por guiarme día y noche sin importar las circunstancias, cuyas sabidurías fueron fundamentales en mi formación como profesional, por su gran apoyo y comprensión, gracias.

A mis padres, por ser mi motor e inspiración en este proceso académico y por no dejarme sola, así mismo; darme los ánimos suficientes para no rendirme y lograr el éxito de culminar la carrera.

A mis hermanos, mi constante fuente de inspiración. Verlos graduarse uno a uno ha sido un orgullo inmenso y su apoyo me ha impulsado a formar parte de este logro familiar.

A todos mis familiares y amigos que de un modo u otro han aportado su granito de arena para que yo pudiera avanzar.

Me siento bendecida y feliz por tener tantas personas maravillosas a mi lado. Por todo eso y por más, gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Química de la Universidad de Oriente y al Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas “Doctora SusanTai (IIBCA-UDO) por facilitarme sus instalaciones y brindarme todas las herramientas necesarias para la culminación de este trabajo.

A la Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre “Clodosbaldo Russián” (UPTOS) los cuales contaron con los equipos y materiales necesarios para lograr los objetivos planteados.

A mis tutores, Lcdo. Fernando Mago y al Dr. José Luis Benítez (UDO), les estoy sinceramente agradecida por su compromiso con mi formación profesional y personal. Su dedicación, paciencia y sabiduría fueron fundamentales para mi crecimiento como investigador. Su aliento y motivación fueron un faro en los momentos de duda y dificultad.

A la Dra. Iliana Jiménez (UPTOS), agradezco profundamente su apoyo y guía durante todo el proceso. Además, por permitirme utilizar su laboratorio de investigación en Catálisis para realizar las pruebas cruciales, demostrando una gran disposición incluso ante las dificultades.

Y a la Dra. Rossiannys Rodríguez (UPTOS) por disponer de su tiempo, conocimiento y brindarme un espacio en el laboratorio de Microbiología.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Formulación de los hidrogeles -----	15
Tabla 2. Contenido de grupos ácidos presentes en los MWCNT-f-----	23
Tabla 3. Concentración relativa de grupos carboxílicos determinados vía titulación ácido-base (Sánchez <i>et al.</i> , 2013) -----	24
Tabla 4. Bandas de absorción características del hidrogel de PAAm-----	26
Tabla 5. Bandas de absorción características de carbonilo en el espectro IR -----	28
Tabla 6. Parámetros cinéticos e índices hinchamiento en agua desionizada para las diferentes formulaciones de hidrogeles -----	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Lámina de grafeno donde están los vectores a_1 y a_2 , y el eje T alrededor del cual se enrolla la lámina, y el vector circunferencia C_n a 90° del eje T, correspondiente a una estructura de zigzag (Cabello <i>et al.</i> , 2012) -----	2
Figura 2. Tipos de NTC: A) pared simple, B) pared múltiple (Castillo <i>et al.</i> , 2011)-----	2
Figura 3. Fases en el proceso oxidativo mediante tratamiento ácido: A) Nanotubo con la estructura íntegra, B) Oxidación inicial en las puntas y, C) Oxidación final, donde predominan los grupos carboxílicos en las partes centrales y extremos (Gutiérrez, 2016) -----	6
Figura 4. Visualización del cambio de volumen en un hidrogel durante su hidratación (Zerpa, 2017)-----	8
Figura 5. Representación esquemática del hidrogel de PAAm (De Souza <i>et al.</i> , 2014)	10
Figura 6. Reacción de ácidos carboxílicos con amidas (Kennepohl y Farmer, 2022)---	10
Figura 7. Mecanismo radicalico en la formación del hidrogel de PAAm (Mago, 2022)	11
Figura 8. A) Aglomerados de MWCNT (poca dispersión) y B) MWCNT-f después del tratamiento con ultrasonido (mayor dispersión) -----	13
Figura 9. Estructuras químicas de los compuestos utilizados en la síntesis de los hidrogeles estudiados. (A) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, (B) NNMB, (C) AAm y (D) MWCNT ----	15
Figura 10. Reacción de polimerización que genera el hidrogel de PAAm (Bucarito <i>et al.</i> , 2014)-----	16
Figura 11. Hidrogeles obtenidos de PAAm y PAAm-MWCNT-f en sus diferentes proporciones-----	16
Figura 12. Esquema representativo para la generación de hidrogeles nanocompuestos cargado con iones plata-----	17
Figura 13. Espectros FTIR de (A) MWCNT y (B) MWCNT-f.-----	22
Figura 14. Espectros FTIR de (1) MWCNT y (2) MWCNT-f. (Girei <i>et al.</i> , 2012). ----	23
Figura 15. Espectro FTIR-ATR del hidrogel de PAAm -----	25
Figura 16. Espectros FTIR-ATR del hidrogel de PAAm y nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f en sus diferentes proporciones -----	27
Figura 18. Isotermas de absorción del hidrogel de PAAm y los nanocompuestos (AAm-X) sumergidos en agua desionizada. X: MWCNT-----	29
Figura 19. Isotermas de absorción del hidrogel de PAAm y los nanocompuestos (AAm-X) a los primeros instantes de hinchamiento en agua desionizada. -----	29
Figura 20. Índices de hinchamiento en agua desionizada obtenidos para hidrogeles de	

PAAm y los nanocompuestos hidratados hasta su equilibrio.-----	30
Figura 21. Comparación de las isotermas de absorción del hidrogel de PAAm y los nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag-----	31
Figura 22. Comparación del índice de hinchamiento en agua desionizada obtenidos para los nanocompuestos hidratados hasta su equilibrio. -----	32
Figura 23. Regresión lineal de las isotermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden para hidrogeles de PAAm y los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f sumergidos en agua desionizada. -----	33
Figura 24. Regresión lineal de las isotermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden para los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag sumergidos en agua desionizada -----	34
Figura 25. Región lineal para las curvas de $\ln F$ vs $\ln t$ mediante los datos de hinchamiento en agua desionizada de hidrogeles de PAAm, PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag-----	36
Figura 26. Representación idealizada de la interacción de los iones plata con los grupos funcionales carboxílicos. Partiendo de la propuesta de Devaux <i>et al.</i> , 2015 -----	39
Figura 27. Imágenes obtenidas mediante MO para hidrogeles hinchados en equilibrio: (A) PAAm; (B) PAAm-MWCNT-f 99,95/0,05; (C) PAAm-MWCNT-f 99,85/0,15 y (D) PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25 -----	41
Figura 28. Obtención de nanocompuestos poliméricos: A) PAAm y B) PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25 -----	42
Figura 29. Comparación para hidrogeles en equilibrio de (A) PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25 y (B) PAAm-MWCNT-f/Ag 99,75/0,25 -----	42
Figura 30. Actividad antimicrobiana de hidrogeles de PAAm y nanocompuesto (PAAm-MWCNT-f) frente a bacterias patógenas en ausencia de solución de plata (AgNO_3), después de 120 h de incubación -----	45
Figura 31. Actividad antimicrobiana de hidrogeles de PAAm y nanocompuestos (PAAm-MWCNT-f) frente a bacterias patógenas en presencia de solución de AgNO_3 , después de 120 h de incubación -----	46

LISTA DE ABREVIATURAS

AAM: Acrilamida	MWCNT-f: Nanotubos de carbono de pared múltiple funcionalizados
ATR: Reflectancia total atenuada	NTC: Nanotubos de carbono
CNT= Nanotubos de carbono	NP: Nanopartículas
DS: Desviación estándar	m_0 : Masa de hidrogel seco o xerogel
FTIR: Infrarrojos por transformada de Fourier	SWCNT: Nanotubos de carbono de pared sencilla
PAAM: Poliacrilamida	% H : Porcentaje o índice de hinchamiento
PAAM-MWCNT-f: Hidrogel de poliacrilamida y nanotubos de carbono de pared múltiple funcionalizados	% W o W : Porcentaje o contenido de agua en un tiempo t
PAAM-MWCNT-f/Ag: Hidrogel de poliacrilamida y nanotubos de carbono de pared múltiple funcionalizados dopado con plata	% W_∞ o W_∞ : Porcentaje o contenido total de agua en el equilibrio
MWCNT: Nanotubos de carbono de pared múltiple (por sus siglas en inglés)	
MWCNT-f/Ag: Nanotubos de carbono de pared múltiple dopados con plata	

RESUMEN

Los nanotubos de carbono (NTC) son materiales fascinantes con una amplia gama de aplicaciones potenciales, desde la electrónica hasta la medicina. Su estructura única les confiere propiedades excepcionales, como una alta resistencia mecánica y conductividad eléctrica. Sin embargo, también presentan desafíos, como su tendencia aglomerarse y su baja solubilidad en agua. En este sentido, la funcionalización de los NTC permite modificar su estructura, incorporando grupos funcionales que mejoran su dispersión en sistemas acuosos, lo que facilita su integración en matrices poliméricas. En este trabajo, se evaluó la incorporación de NTC funcionalizados (MWCNT-f) y nanopartículas de plata (Ag) en hidrogeles de poliacrilamida (PAAm). La caracterización mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) confirmó la presencia de grupos funcionales carboxílicos e hidróxidos en la superficie de los MWCNT-f, lo que indica una exitosa funcionalización. Además, la titulación ácido-base permitió cuantificar el contenido de grupos ácidos en los MWCNT-f. La incorporación de iones Ag^+ y MWCNT-f en la matriz de PAAm condujo a una disminución del grado de hinchamiento del hidrogel, atribuible a la interacción entre los iones Ag^+ y los grupos funcionales presentes en el polímero y los NTC. Por otro lado, se observó un aumento en la capacidad de retención de agua en los hidrogeles nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f en comparación con el hidrogel de PAAm, lo que sugiere una mayor interacción entre los grupos funcionales de la PAAm y los grupos funcionales carboxílicos y/o hidróxidos ($-\text{COOH}$ y/o $-\text{OH}$) en los MWCNT-f. Los resultados de las pruebas antimicrobianas indican que los sistemas conformados por hidrogeles nanocompuestos cargados con plata, exhiben una actividad antibacteriana, característica no observada en los materiales nanocompuestos, lo que sugiere que dicha actividad se debe a la liberación de los iones Ag^+ .

INTRODUCCIÓN

La nanociencia y la nanotecnología representan un área de investigación en expansión que abarca estructuras, dispositivos y sistemas con propiedades y funciones novedosas gracias a la disposición de sus átomos en la escala de 1 a 100 nm. Su tamaño a escala nanométrica confiere propiedades excepcionales que los hacen ideales para una amplia gama de aplicaciones. Los nanomateriales contribuyen a casi todos los campos de la ciencia, incluyendo la física, la ciencia de los materiales, la medicina, la química, la biología, la informática y la ingeniería (Bayda *et al.*, 2019). Por otra parte, el carbono ha demostrado ser un elemento versátil, capaz de adoptar asombrosas formas alotrópicas como los fulerenos, los nanotubos de carbono, el grafeno, entre otros (Kuila *et al.*, 2012). El carbono, en sus diferentes formas puede comportarse como un buen conductor metálico en forma de grafito, o bien diferente grado de semiconductividad como en los NTC (nanotubos de carbono).

Los NTC, son estructuras que se asemejan a una molécula cilíndrica con átomos de carbono de disposición hexagonal con hibridación sp^2 . Su estructura interna es hueca y su superficie está compuesta por una o varias capas de láminas de grafeno (Rathinavel *et al.*, 2021), estos materiales presentan una amplia gama de propiedades electrónicas, desde conductoras hasta semiconductoras, dependiendo de su estructura. La orientación de los enlaces de carbono en la lámina de grafeno y diámetro del nanotubo influyen directamente en sus propiedades electrónicas. Los extremos de los NTC suelen estar cerrados por estructuras pentagonales, similar a la mitad de un fullereno. En la figura 1, se muestra una lámina de grafeno y los vectores que forman los NTC (Cabello *et al.*, 2012).

Los NTC se subdividen en dos clases principales: nanotubos de pared simple (SWCNT) y nanotubos de pared múltiple (MWCNT). Los SWCNT consisten en una sola lámina de grafeno que se enrolla en cilindros con un diámetro de 1 nm y una longitud de hasta varios milímetros. Los nanotubos de pared múltiple (MWCNT) consisten en una matriz de dichos cilindros formados concéntricamente y separados por

aproximadamente 0,35 nm (Manzetti y Andersen, 2012). La diferencia entre ambos es la cantidad de tubos concéntricos en su estructura, como se ilustra en la figura 2 (Castillo *et al.*, 2011).

Existe un gran interés en perfeccionar la síntesis de NTC debido a sus propiedades excepcionales, cruciales para la nanotecnología y la electrónica, debido a que presentan una alta resistencia mecánica (módulo de Young), excelente absorción óptica y conductividad térmica, así como la posibilidad de superconductividad y propiedades semiconductoras, abriendo camino a aplicaciones avanzadas en este sector (Syduzzaman *et al.*, 2024).

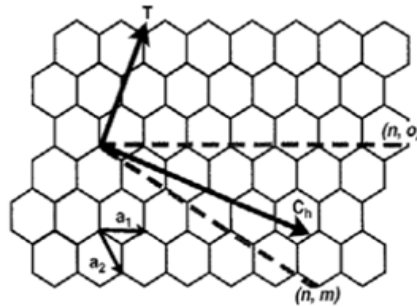


Figura 1. Lámina de grafeno donde están los vectores a_1 y a_2 , y el eje T alrededor del cual se enrolla la lámina, y el vector circunferencia C_n a 90° del eje T, correspondiente a una estructura de zigzag (Cabello *et al.*, 2012)

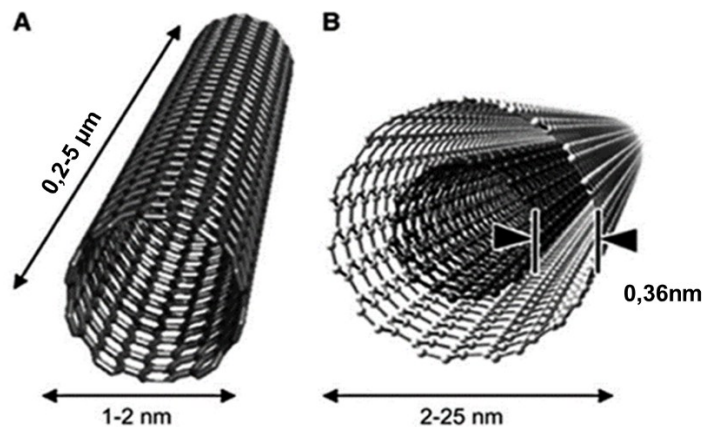


Figura 2. Tipos de NTC: A) pared simple, B) pared múltiple (Castillo *et al.*, 2011)

Esta amplia gama de propiedades, se debe principalmente a su estructura única, presentando un gran margen de conductividades que viene dado por relaciones fundamentalmente geométricas, es decir, en función de su diámetro, torsión y el número de capas de su composición. En su forma metálica, los NTC exhiben una conductividad eléctrica sobresaliente, superando significativamente al cobre, lo que los hace ideales para componentes electrónicos de alto rendimiento. Además, su alta conductividad térmica, superior incluso a la del diamante, es crucial para la gestión térmica en entornos extremos. La resistencia mecánica de los NTC, unas 20 veces mayor que la del acero, los posiciona como candidatos ideales para reforzar materiales compuestos, dando la ligereza y la resistencia primordial. Los MWCNT ofrecen propiedades mecánicas aún más robustas que los de pared simple, lo que los hace especialmente atractivos para una amplia gama de aplicaciones (Syduzzaman *et al.*, 2024).

Funcionalización De MWCNT

Uno de los desafíos principales en el manejo de estas nanopartículas radica en su tendencia a la aglomeración, como bien señalan Ferreira *et al.* (2019). Las fuerzas de van der Waals inducen la formación de agregados, dificultando su dispersión uniforme. Esta aglomeración no solo limita la realización de las mejoras potenciales en las propiedades de los materiales compuestos, sino que también restringe su reactividad química, inherente a las fuertes uniones covalentes carbono-carbono y a la estructura tubular de los nanotubos. En consecuencia, la modificación química emerge como una estrategia crucial para superar estas limitaciones, facilitando tanto la dispersión como la interacción de los nanotubos con la matriz circundante (Ponnamma *et al.*, 2014).

La funcionalización es un proceso químico que permite la incorporación de grupos funcionales reactivos en la estructura de los NTC. Esta modificación, que puede realizarse tanto en los extremos como en las paredes de los tubos, es fundamental para modular sus propiedades. Los NTC, poseen extraordinarias propiedades estructurales, mecánicas y electrónicas, sin embargo, su funcionalización les hace adquirir propiedades

específicas adicionales (Azpeitia *et al.*, 2015).

Existen dos enfoques principales: la funcionalización covalente y la no covalente. La funcionalización covalente implica la formación de enlaces químicos entre los NTC y grupos funcionales específicos. Este proceso altera significativamente la estructura electrónica de los NTC, ya que la hibridación sp^2 del carbono se modifica a sp^3 , lo que conlleva a una disminución de la conjugación π en la capa del grafeno. Uno de los métodos más comunes para lograr esta funcionalización es la oxidación con ácidos fuertes como el H_2SO_4 , que introduce grupos carboxílicos en las paredes de los NTC (Hooijdonk *et al.*, 2013).

Por otro lado, las funcionalizaciones no covalentes se basan en interacciones físicas más débiles, como fuerzas de van der Waals o interacciones $\pi - \pi$, entre los NTC y moléculas adsorbidas. Este enfoque permite preservar la estructura electrónica intrínseca de los NTC y ofrece una mayor versatilidad en términos de los tipos de moléculas que pueden ser adsorbidas. Surfactantes, compuestos aromáticos y polímeros como poliacrilamida, poliestireno, entre otros, son ejemplos comunes de moléculas utilizadas para funcionalizar los NTC de forma no covalente (Ruangpornvisuti, 2010).

Un primer aspecto que la funcionalización modifica es la capacidad de dispersión. La funcionalización permite que los MWCNT se dispersen de manera más homogénea en una amplia variedad de solventes y matrices, tanto polares como no polares. Esta mejora en la dispersión se debe a la introducción de grupos funcionales que interactúan con el medio, reduciendo las fuerzas de atracción entre los NTC y favoreciendo su distribución uniforme. La capacidad de dispersar los MWCNT de manera efectiva tiene implicaciones significativas en sus aplicaciones. Por ejemplo, en el campo de la biomedicina, una excelente dispersión es esencial para desarrollar sistemas de liberación de fármacos basados en NTC, así como para crear sensores y dispositivos bioelectrónicos altamente sensibles (Liu *et al.*, 2022).

La modificación de la superficie de los NTC mediante oxidación no solo incrementa su hidrofilicidad, sino que también introduce una mayor cantidad de grupos

funcionales oxigenados. Estos grupos potencian la capacidad de intercambio iónico del material, lo que resulta en una mejora significativa en la remoción de iones metálicos. Asimismo, el tratamiento con ácidos fuertes puede alterar los grupos funcionales preexistentes y generar nuevos grupos, especialmente grupos ácidos como los carboxílicos, que se enlazan a la superficie del NTC (Liu *et al.*, 2021). En la figura 3, se pueden observar las fases del proceso oxidativo (Gutiérrez, 2016).

Entre los grupos funcionales que se introducen en los MWCNT mediante modificación química, encontramos grupos amino, epóxidos, ácidos carboxílicos y aldehídos, los cuales permiten reaccionar con otros compuestos (Cabello *et al.*, 2012). La funcionalización de los NTC con grupos carboxílicos (RCO_2H) es fundamental debido a su versatilidad en la síntesis de diversos compuestos orgánicos. De igual manera, los aldehídos (CHO) juegan un papel crucial en la modificación de la superficie de los NTC, permitiendo la introducción de funcionalidades específicas. Los grupos amino (NH_2) también son de gran interés por su alta reactividad, abriendo la puerta a la formación de amidas ($\text{RCONR}'\text{R}''$), compuestos con aplicaciones significativas en la industria farmacéutica. La capacidad de las amidas para ser modificadas químicamente permite la creación de fármacos con propiedades personalizadas, lo que resalta la importancia de estos grupos funcionales en la nanotecnología y la medicina (Smith y March, 2020).

La funcionalización de NTC puede realizarse mediante diversas técnicas, como microondas, ultrasonido, plasma, electroquímica, entre otras (González, 2010).

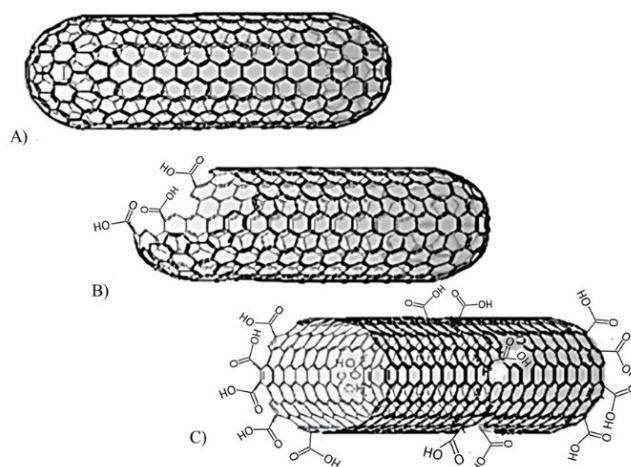


Figura 3. Fases en el proceso oxidativo mediante tratamiento ácido: A) Nanotubo con la estructura íntegra, B) Oxidación inicial en las puntas y, C) Oxidación final, donde predominan los grupos carboxílicos en las partes centrales y extremos (Gutiérrez, 2016)

Funcionalización de MWCNT asistido por ultrasonido

El uso del ultrasonido en la síntesis química ha sido ampliamente usado como fuente energética no convencional, empleándolo en investigaciones relacionadas con la activación de metales, síntesis de compuestos organometálicos y de coordinación, así como en catálisis y en electroquímica (Suslick, 2020). En la funcionalización de NTC, la radiación ultrasónica juega un papel crucial al promover la dispersión homogénea de los NTC y generar radicales libres, facilitando la interacción entre los NTC con los reactivos ácidos y acelerando las reacciones. Actualmente existen diversos reportes de modificación de NTC-f mediante la técnica de ultrasonido para aplicaciones específicas como: pilas de combustible y soportes de catalizadores, ya que, los NTC funcionalizados con ultrasonido son más eficientes en la producción o consumo de energía que los materiales tradicionales. Esto se debe a que los NTC pueden almacenar más energía en un espacio más reducido, gracias a su alta densidad de potencia (Mason, 2016).

Aplicaciones

Desde el descubrimiento de las estructuras fibrilares de carbono y los NTC por

Sumio Iijima en 1991, estas nanoestructuras han sido ampliamente estudiadas por sus diversas aplicaciones. Los NTC se emplean en el desarrollo de materiales de refuerzo, la remoción de metales pesados, el almacenamiento de energía y dispositivos electrónicos. Además, han demostrado un gran potencial en aplicaciones biomédicas, incluyendo la ingeniería de tejidos, la administración de fármacos y como agentes de contraste en imagenología. Su versatilidad también se extiende a la catálisis y la electroquímica (Ajayan *et al.*, 2020; Novoselov *et al.*, 2016). Asimismo, se exploran sus aplicaciones como biosensores para el desarrollo de materiales quirúrgicos inteligentes. En química, los NTC se utilizan en procesos de adsorción y absorción, catálisis y electrosíntesis, aprovechando sus propiedades únicas (Eatemadi *et al.*, 2022).

En la última década, los nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) y de pared múltiple (MWCNT) han atraído una atención considerable en el campo de la biomedicina. Las interacciones de los NTC con proteínas y otros biomacromoléculas son fundamentales para diseñar materiales compuestos como hidrogeles de poliacrilamida (Meredith *et al.*, 2013). Además, los NTC han demostrado ser herramientas prometedoras en diagnósticos y terapias avanzadas. Sus propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas únicas permiten su uso en biosensores y sistemas de liberación de fármacos dirigidos (Paliwal *et al.*, 2020).

Hidrogeles

Los hidrogeles son redes tridimensionales de cadenas poliméricas interconectadas que, al entrar en contacto con un líquido, son capaces de absorber grandes cantidades de agua debido a su naturaleza hidrofílica. Esta absorción provoca un aumento significativo en su volumen, confiriéndoles una estructura blanda y elástica. A pesar de este aumento, los hidrogeles mantienen su integridad estructural, alcanzando un equilibrio físico-químico, entre las fuerzas cohesivas ejercidas por las cadenas poliméricas y la tendencia del agua a difundirse en la red entrecruzada (Wensheng y Ram, 2012). Las fuerzas de cohesión que permiten la reticulación del polímero no solo tienen carácter covalente; también intervienen otras fuerzas como las interacciones

electrostáticas, hidrófobas, dipolo-dipolo o los enlaces de hidrógeno (Bustamante *et al.*, 2021).

En estado seco se conoce como xerogel, un material sólido y duro, pero cuando entra en contacto con un medio acuoso, el agua se difunde hacia su interior y se hincha hasta alcanzar el equilibrio físico-químico (Ramírez *et al.*, 2016). La figura 4 muestra una visualización del cambio de volumen en un hidrogel al ponerse en contacto con agua.

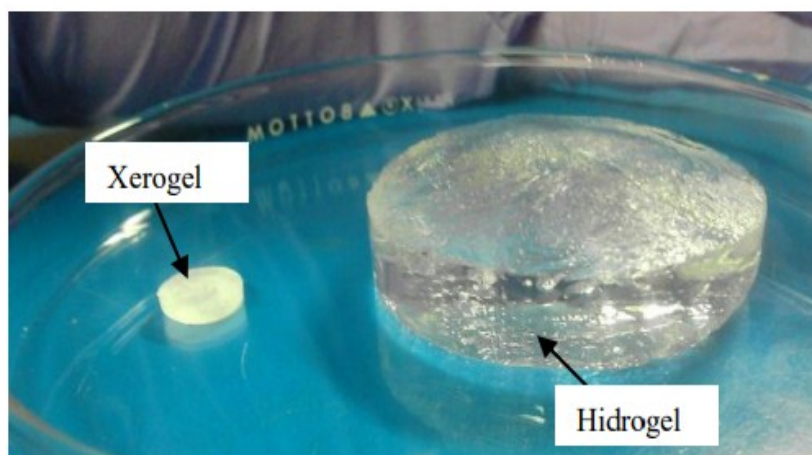


Figura 4. Visualización del cambio de volumen en un hidrogel durante su hidratación (Zerpa, 2017)

Los hidrogeles son materiales con propiedades únicas que los hacen sumamente útiles en diversas aplicaciones. Debido a sus propiedades distintivas, como biodegradabilidad, biocompatibilidad, hidrofiliidad, superabsorción, viscoelasticidad, suavidad y esponjosidad, los hidrogeles desempeñan un papel fundamental en aplicaciones biomédicas. Además, responden a diversos estímulos, como la temperatura, el campo eléctrico, el campo magnético, las moléculas biológicas y la fuerza iónica (Bashir *et al.*, 2020). Estas propiedades los convierten en materiales biocompatibles, ya que presentan un paralelismo estructural con los tejidos vivos debido a su alto contenido de agua, consistencia blanda y gomosa, así como su baja tensión interfacial con el agua o los fluidos biológicos. Por lo tanto, estos materiales se asemejan, en gran medida, a un

tejido biológico. Esta semejanza los hace ideales para interactuar con el cuerpo humano de forma segura y efectiva (Chai *et al.*, 2017; Ho *et al.*, 2022). El hinchamiento es una propiedad esencial de los hidrogeles y tiene un impacto significativo en el resto de sus propiedades. Además, el comportamiento de hinchamiento puede proporcionar información valiosa sobre la respuesta del hidrogel a cambios en el entorno circundante, lo que lo convierte en un factor importante en el diseño e ingeniería de nuevos materiales (Priya *et al.*, 2024).

La acrilamida (AAm) sigue siendo un monómero fundamental en la síntesis de hidrogeles, gracias a su estructura molecular que facilita la creación de materiales con propiedades específicas. Los hidrogeles de poliacrilamida (PAAm), representado en la figura 5, mantienen su relevancia debido a su notable capacidad de absorción de agua y la posibilidad de modificar sus características para diversas aplicaciones (Mago, 2022).

Análisis experimentales *in vitro* llevados a cabo por Smith y Johnson (2023) han evidenciado que los geles de PAAm exhiben una adecuada compatibilidad biológica, lo cual los hace aptos para usos en el ámbito biomédico. Asimismo, estos polímeros presentan estabilidad y resistencia ante la descomposición enzimática y microbiana, asegurando así la perdurabilidad de los hidrogeles.

A pesar de sus ventajas, el hidrogel de PAAm presenta algunas limitaciones, los enlaces amida de la PAAm pueden hidrolizarse en condiciones extremas de *pH* o temperatura, lo que puede afectar la estabilidad del gel a largo plazo. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado diversas estrategias, como la incorporación de partículas o la formación de redes poliméricas más densas a través de un mayor grado de entrecruzamiento, esto hace que la estructura del gel sea más rígida y resistente a la deformación. Estas modificaciones no solo aumentan la hidrofilia del polímero, sino que también mejora su estabilidad mecánica y térmica, ampliando así sus aplicaciones potenciales (Rojas de Gascue *et al.*, 2010; De Souza *et al.*, 2014).

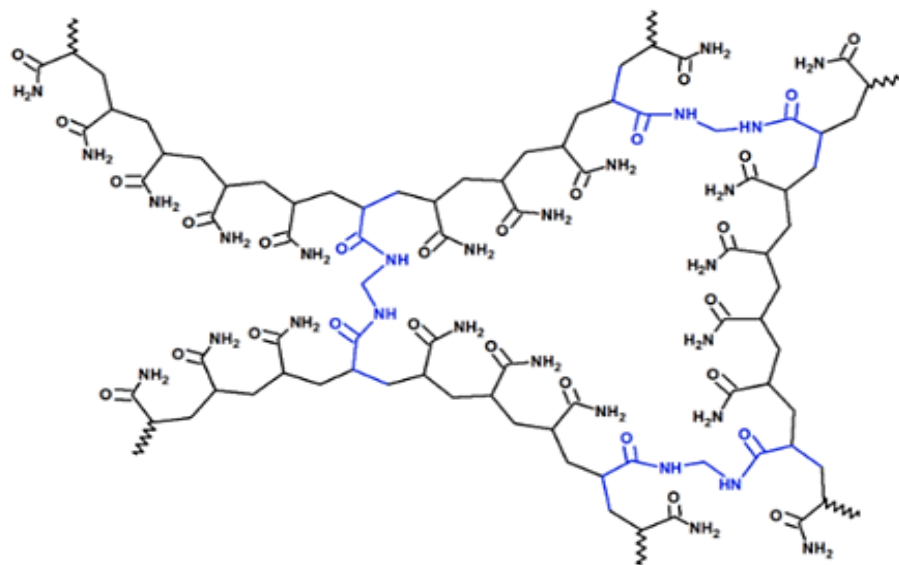


Figura 5. Representación esquemática del hidrogel de PAAm (De Souza *et al.*, 2014)

Cabe destacar que, la PAAm contiene grupos amida, que pueden reaccionar con los grupos carboxilos de los NTC-f mediante una reacción de condensación (Andrade *et al.*, 2012). Esta reacción forma un enlace amida y libera una molécula de agua, como se muestra en la figura 6.

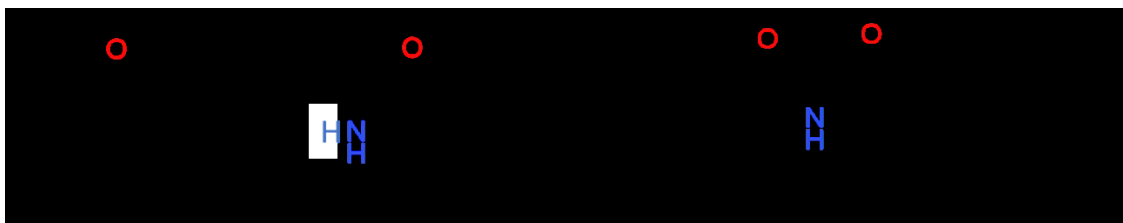


Figura 6. Reacción de ácidos carboxílicos con amidas (Kennepohl y Farmer, 2022)

Mecanismo De Polimerización De La AAm

La polimerización de la AAm implica la adición de radicales libres al doble enlace del monómero, un proceso que se desarrolla a través de tres etapas principales: iniciación, propagación y terminación (García *et al.*, 2022).

- a) **Iniciación:** esta etapa inicial comprende la formación del centro activo del radical libre, generalmente en dos pasos. Primero, se generan radicales libres a partir de un iniciador, seguido de la adición de uno de estos radicales a una molécula de monómero. Los radicales pueden producirse mediante descomposición térmica o fotoquímica.
- b) **Propagación:** en esta fase, las moléculas de monómero se añaden secuencialmente al monómero radical formado en la iniciación, resultando en el crecimiento de la cadena polimérica.
- c) **Terminación:** esta etapa finaliza el crecimiento de la cadena del polímero. Los mecanismos más comunes de terminación incluyen la reacción bimolecular de cadenas poliméricas en crecimiento. La combinación implica el acoplamiento de dos cadenas para formar una única molécula de polímero.

En la figura 7 se representa el mecanismo de formación del hidrogel de PAAm

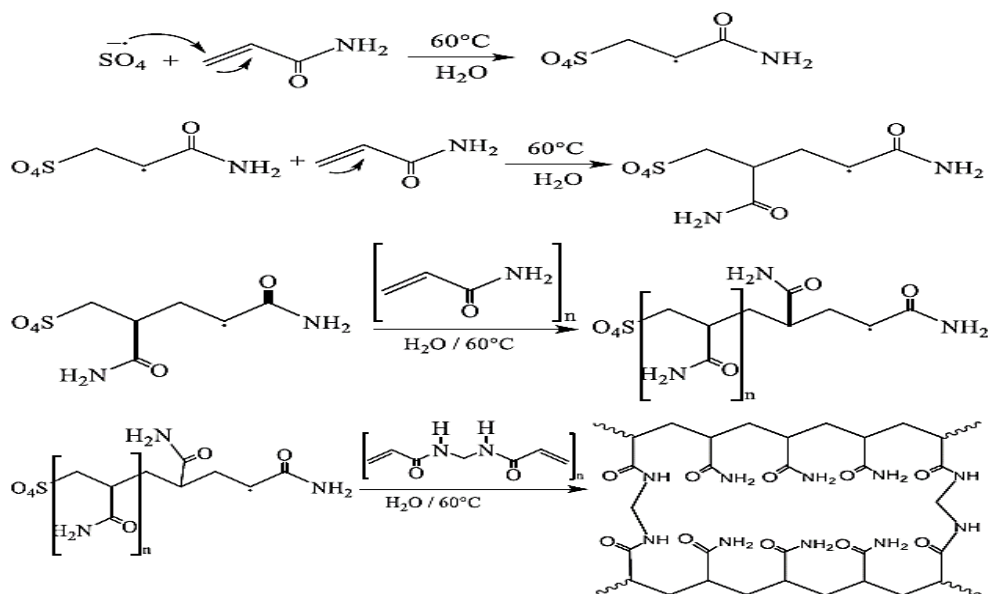


Figura 7. Mecanismo radicalico en la formación del hidrogel de PAAm (Mago, 2022)

En este proceso de polimerización radicalaria, el persulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) se disocia en agua generando radicales sulfatos (SO_4^-), que son muy reactivos y pueden atacar a las moléculas de AAm o *N,N'*-metilenbisacrilamida (NNMBA), formando nuevos radicales con un grupo vinilo ($\text{CH}_2=\text{CH}^-$). Estos radicales pueden reaccionar con otras moléculas de monómero, formando cadenas lineales o ramificadas de PAAm, que se entrecruzan entre sí mediante los grupos vinilo de la NNMBA. La polimerización continúa hasta que se agotan los monómeros o los radicales, o hasta que se produce una terminación por recombinación o desproporción de los radicales (Menor, 2019).

Nanocompuestos Poliméricos

Los diferentes polímeros comerciales como: poliacrilato, poliestireno, polipirrol y poliácridamida, se están empleando como matrices poliméricas para la obtención de nanomateriales al mezclarlos con MWCNT y MWCNT-funcionalizados, esto para mejorar sus propiedades y así tener distintas aplicaciones en el área eléctrica como aislantes; en medicina como biosensores y sensores; en biotecnología para la liberación de algunos fármacos, en química como catalizadores, por mencionar algunos ejemplos (Cabello *et al.*, 2012).

Los nanocompuestos poliméricos, materiales que combinan NTC con polímeros, han generado un interés significativo debido a su alta resistencia mecánica, conductividad eléctrica y térmica, junto con su facilidad de procesamiento. Sin embargo, la dispersión y la adhesión de los NTC en la matriz polimérica representan un desafío crucial. Para superar esta limitación, se han explorado diversas estrategias, incluyendo la modificación de la superficie de los NTC mediante la introducción de grupos funcionales (Cabello *et al.*, 2012).

Bellingeri *et al.* (2018), investigaron las propiedades de un material compuesto innovador a base de NTC e hidrogeles para ser utilizados en aplicaciones biomédicas. Los materiales mostraron una fuerte respuesta al *pH* y actividad antimicrobiana. Así como también, algunos de los hidrogeles preparados se han probado con éxito como soporte para el crecimiento celular (Rotaru *et al.*, 2017).

La funcionalización de NTC con nanopartículas metálicas induce propiedades bactericidas. Aunque los NTC por sí solos carecen de actividad antibacteriana, la adición de nanopartículas metálicas como plata o cobre les confiere la capacidad de inhibir el crecimiento bacteriano. Estudios han demostrado que la combinación de NTC con nanopartículas metálicas puede inactivar eficazmente bacterias como *Escherichia coli*. Se cree que el mecanismo de acción involucra la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) por parte de las nanopartículas metálicas, las cuales dañan la membrana celular bacteriana. Por otro lado, los hidrogeles, por su estructura porosa y capacidad de retener agua, pueden actuar como reservorios de agentes antimicrobianos, incluyendo nanopartículas metálicas. Al incorporar NTC y nanopartículas metálicas en hidrogeles, se puede obtener materiales con propiedades antimicrobianas mejoradas y una liberación controlada de los agentes activos (Andrade *et al.*, 2012).

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar nanocompuestos a partir del hidrogel de PAAm y MWCNT-f, para ello, se llevó a cabo la funcionalización de los MWCNT y dopaje del nanocompuesto mediante absorción/adsorción de plata, con el fin de evaluar su interacción con la matriz del hidrogel de PAAm. Mediante la modificación superficial de MWCNT con H_2SO_4 , empleando como fuente de activación la agitación magnética y energía ultrasónica, con el fin de disminuir la aglomeración de los MWCNT e incrementar su dispersión en el gel de PAAm.

La incorporación de iones Ag^+ buscó conferir al material la capacidad de inhibir el crecimiento bacteriano, potenciando así las propiedades inherentes del hidrogel de poliacrilamida. El nanocompuesto resultante se plantea como una alternativa prometedora para aplicaciones en el área biomédica. Para caracterizar los hidrogeles obtenidos, se emplearon diversas técnicas, entre las que destacan la espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), gravimetría y microscopía óptica (MO).

METODOLOGÍA

Funcionalización De MWCNT Con Ácido Sulfúrico

Se colocaron 0,05 g de MWCNT marca Aldrich (pureza mayor al 90 %, diámetro externo de 10 nm a 15 nm), en un balón de fondo redondo con 25 ml de H_2SO_4 al 97 %, se dejó bajo reflujo durante 4 h a 60 °C con agitación magnética. Al finalizar, se llevó a un equipo de ultrasonido (marca Branson, modelo 3200), durante 4 h a una temperatura de 50 °C, se filtró y se lavó el material obtenido con agua destilada hasta lograr un $\text{pH} \approx 7$. Por último, se secaron los MWCNT funcionalizados (MWCNT-f) en una estufa a 60 °C por 48 h (Gómez, 2018). En la figura 8, se muestra la dispersión de los MWCNT antes y después del proceso de funcionalización.

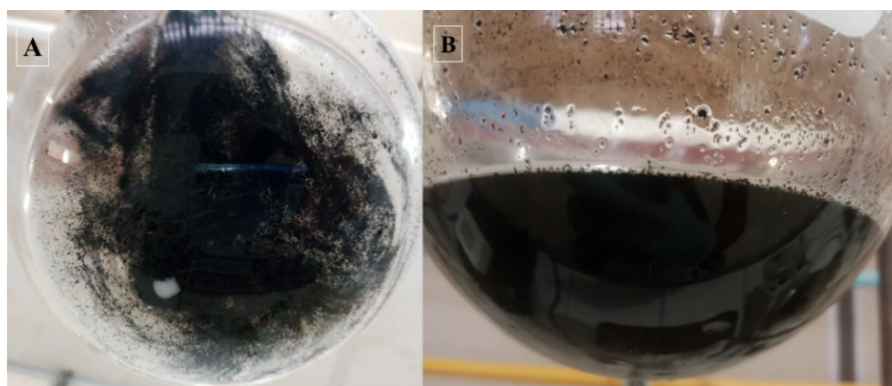


Figura 8. A) Aglomerados de MWCNT (poca dispersión) y B) MWCNT-f después del tratamiento con ultrasonido (mayor dispersión)

Determinación Del Porcentaje De Grupos Ácidos En Los MWCNT-f

El contenido de grupos ácidos presentes en la superficie de los MWCNT-f se determinó mediante el procedimiento descrito por Boehm (1996), incorporando elementos del método propuesto por Sáenz *et al.* (2016). Para ello, se colocaron 15 ml de una solución de 0,1 mol l^{-1} de NaOH en NaCl 0,1 mol l^{-1} en un matraz con 10 mg de MWCNT-f; el matraz se cerró herméticamente y se colocó en agitación magnética a temperatura ambiente por 24 h. Culminado el tiempo, la muestra se filtró y el líquido

obtenido se tituló con HCl 0,1 mol l⁻¹ en solución de NaCl, utilizando un medidor de pH modelo UB-5 ULTRABASIC benchtop MV.

El contenido de grupos ácidos (-COOH e -OH) en los MWCNT-f se calculó mediante la ecuación 1:

$$\text{Contenido de grupos ácidos (mmol g}^{-1}\text{)} = \frac{(C_{NaOH} \times V_{NaOH} - C_{HCl} \times V_{HCl})}{m_{MWCNT-f}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde, C_{NaOH} es la concentración de la base (mol l⁻¹), C_{HCl} es la concentración del ácido (mol l⁻¹), V_{NaOH} es el volumen de la base (ml), V_{HCl} es el volumen del ácido (ml), $m_{MWCNT-f}$ es la masa del nanotubo de carbono funcionalizado (g).

Caracterización De Los MWCNT Y MWCNT-f Mediante FTIR

Se mezcló cierta cantidad de MWCNT sin funcionalizar o MWCNT-f con 0,045 g de KBr, la cual se comprimió hasta formar una pastilla, que fue colocada en un portamuestra para su respectivo análisis en el espectrofotómetro infrarrojo FTIR Bruker, modelo Alpha II, para así obtener los espectros IR en los cuáles se observaron las bandas correspondientes a los grupos funcionales presentes en el material de estudio. Las muestras fueron analizadas en el rango de número de onda de 600 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹, acumulando 24 barridos, con una resolución de 2 cm⁻¹ (Gómez, 2018).

Síntesis De Hidrogeles De PAAM Y PAAM-MWCNT-F Mediante Polimerización Radicalaria

La figura 9 muestra las estructuras de los compuestos utilizados en la síntesis de los hidrogeles.

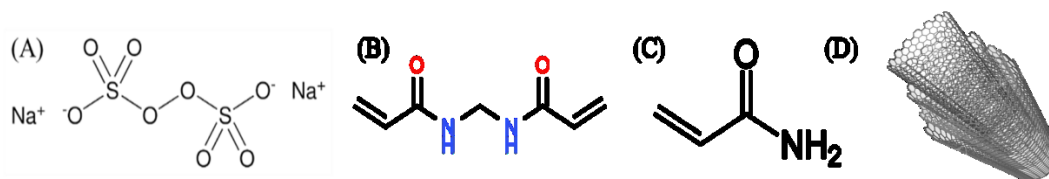


Figura 9. Estructuras químicas de los compuestos utilizados en la síntesis de los hidrogeles estudiados. (A) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, (B) NNMB, (C) AAm y (D) MWCNT

Se prepararon hidrogeles de PAAm y PAAm-MWCNT-f con distintas cantidades de MWCNT-f en la mezcla de reacción. En la tabla 1 se presentan las proporciones de alimentación AAm/MWCNT-f para la síntesis de los hidrogeles.

Tabla 1. Formulación de los hidrogeles

Hidrogeles	Proporciones de alimentación (%m/m)
AAm	100
	99,75/0,25
AAm/MWCNT-f	99,85/0,15
	99,95/0,05

Los hidrogeles fueron sinterizados mediante polimerización vía radical libre. Para la síntesis del hidrogel de PAAm se emplearon 2,00 g de AAm y 0,02 g del agente entrecruzante (NNMB), disueltos con 10 ml de agua destilada, durante 10 min la mezcla se agitó para homogeneizar, a continuación, se añadió 0,01 g del iniciador, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, se agitó por unos minutos. Luego, se trasvasó la mezcla a un tubo de ensayo y se colocó en un baño de aceite y ultrasonido a 60 °C, durante 3 h para permitir la polimerización y formación del hidrogel. La figura 10 muestra el esquema de reacción para el hidrogel de PAAm y la figura 11 muestra los diferentes tipos de hidrogeles

obtenidos.

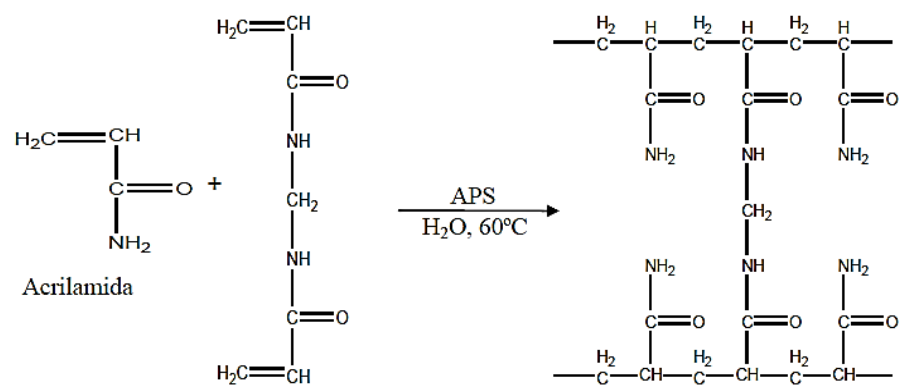


Figura 10. Reacción de polimerización que genera el hidrogel de PAAm (Bucarito *et al.*, 2014)

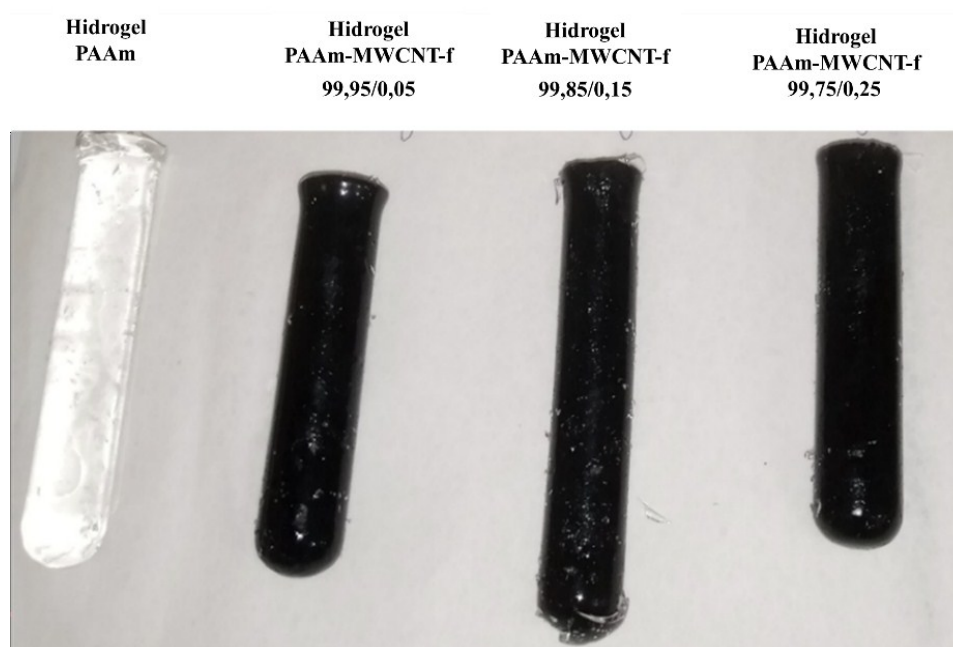


Figura 11. Hidrogeles obtenidos de PAAm y PAAm-MWCNT-f en sus diferentes proporciones

Terminada la reacción, los hidrogeles obtenidos (figura 11) se cortaron en forma de pequeñas pastillas cilíndricas que se sumergieron en agua destilada, realizando lavados cada 48 h, hasta ajustar el $pH \approx 7$. Para finalizar, los comprimidos se dejaron secar a temperatura ambiente hasta obtener xerogeles (Ramírez *et al.*, 2013).

Para la síntesis de los nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f, se siguió el mismo procedimiento mencionado, incorporando las cantidades correspondientes de MWCNT-f (Tabla 1) en la mezcla principal de AAm y agente entrecruzante.

Obtención De Hidrogeles Cargados Con Plata

Los hidrogeles de PAAm y PAAm-MWCNT-f cargados con plata, utilizados en la determinación gravimétrica del índice de hinchamiento, fueron obtenidos de acuerdo a la metodología utilizada por Mohan *et al.*, 2010. Para ello, discos secos de los hidrogeles se dejaron hinchar durante 5 días en 30 ml de solución acuosa de AgNO_3 $0,1 \text{ mol l}^{-1}$ (figuras 12). Luego, se eliminó el exceso de solución AgNO_3 de la superficie de los hidrogeles con papel de filtro. Por último, se dejaron secar hasta estado xerogel nuevamente.

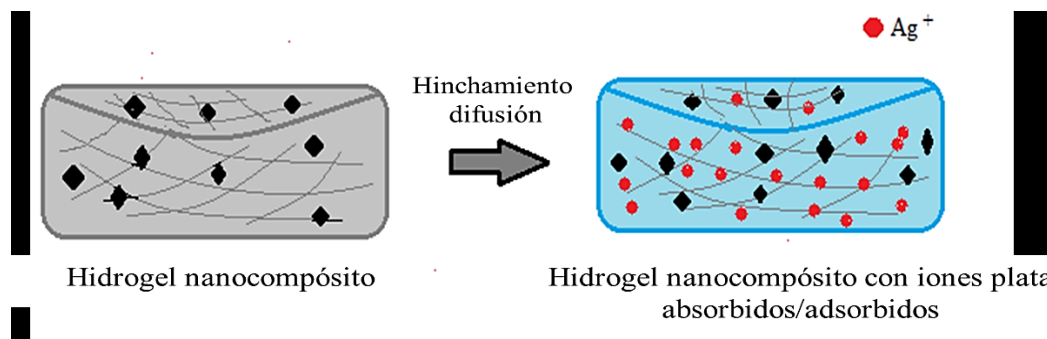
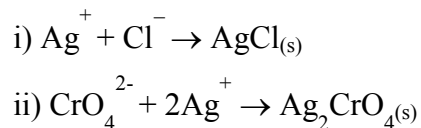


Figura 12. Esquema representativo para la generación de hidrogeles nanocompuestos cargado con iones plata

Determinación De La Cantidad De Plata Absorbida Por Los Hidrogeles

Siguiendo exactamente la metodología descrita por Mohan *et al.*, 2010 en el apartado anterior y realizando algunas modificaciones del trabajo realizado por Benítez (2019). Cumplido este tiempo (5 días), se extrajo el hidrogel y se pesó. Se midió el volumen de la solución restante, se le añadió unas gotas del indicador cromato de potasio (K_2CrO_4) para luego titular con NaCl $0,1 \text{ mol l}^{-1}$, hasta la formación de un precipitado amarillo, correspondiente al Ag_2CrO_4 . Las reacciones que se verifican en

esta titulación son:



El porcentaje de Ag absorbida se calculó mediante la ecuación 2:

$$\%Ag = \frac{(C_{Ag} \times V_{Ag} - C_{Cl} \times V_{Cl}) \times M_{Ag}}{10 \times m_{\text{xerogel}}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

donde, C_{Ag} es la concentración inicial de AgNO_3 (mol l^{-1}), C_{Cl} es la concentración de NaCl (mol l^{-1}), V_{Ag} es el volumen inicial de la solución de AgNO_3 (ml), V_{Cl} es el volumen gastado del NaCl (ml), M_{Ag} es la masa molar de Ag (g mol^{-1}) y m_{xerogel} es la masa del xerogel (g).

Caracterización De Los Hidrogeles Mediante FTIR-ATR

Cada hidrogel seco obtenido se analizó directamente en un espectrofotómetro FTIR Bruker, modelo Alpha II, con accesorio de muestra universal ATR (Reflectancia Total Atenuada). Todos los espectros fueron obtenidos después de 24 barridos con una resolución de 2 cm^{-1} .

Determinación Gravimétrica Del Índice De Hinchamiento

Se pesaron 0,1000 g del xerogel, luego, se introdujo la pastilla en un vaso de precipitado con 50 ml de agua destilada; a intervalos constantes de tiempo se extrajo la pastilla, secándola cuidadosamente su superficie con papel de filtro, se pesó y se volvió a colocar en el agua destilada. El procedimiento se repite sucesivamente, hasta que el hidrogel alcance el equilibrio (Ramírez *et al.*, 2013).

Mediante las ecuaciones 3 y 4 se pueden determinar, el grado o índice de hinchamiento ($\%H$) y el porcentaje de agua ($\%W$) absorbido por el hidrogel, respectivamente:

$$\%H = \left(\frac{m_t - m_o}{m_o} \right) \times 100 \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$\%W = \left(\frac{m_t - m_o}{m_t} \right) \times 100 \quad [\text{Ec. 4}]$$

donde m_0 y m_t son las masas del hidrogel seco (xerogel) e hidrogel hinchado en el tiempo t , respectivamente.

Cinética De Hinchamiento

El estudio de la cinética de hinchamiento de los hidrogeles se llevó a cabo utilizando la ecuación de segundo orden de Schott, 1992 (ecuación 5). Esta ecuación describe con precisión la capacidad de absorción de los hidrogeles a largos periodos de tiempo y elevados porcentajes de hidratación:

$$\frac{t}{\%W} = \frac{t}{\%W_{\infty}} + \frac{1}{K_h \%W_{\infty}^2} \quad [\text{Ec. 5}]$$

donde, k_h es la constante de velocidad de hinchamiento. $\%W$ y $\%W_{\infty}$ son los porcentajes de agua absorbido por el hidrogel en un tiempo t y en equilibrio, respectivamente. La representación gráfica del cociente $t/\%W$ en función del tiempo, genera una recta cuya ordenada en el origen es $1/k_h \%W_{\infty}^2$ y la pendiente $1/\%W_{\infty}$.

Mecanismo De Difusión Del Agua

De acuerdo a la segunda ley de Fick, la ecuación de la ley de potencia (ecuación 6) se puede usar para determinar la naturaleza de la difusión del agua hacia el interior de hidrogeles (González *et al.*, 2012).

$$F = \frac{m_w}{m_{\infty}} = k_d t^n \quad [\text{Ec. 6}]$$

En donde F se expresa como una fracción relacionada con la cantidad de agua acumulada por el hidrogel en un tiempo t , m_w indica la cantidad de agua que se difunde en el hidrogel en el tiempo t , m_∞ la cantidad correspondiente, después de un tiempo infinito, k_d es la constante de difusión, relacionada con el sistema de red y el medio de hinchamiento y n es el exponente difusional, que rige el modo de transporte del agua. La ecuación 6, se aplica a las etapas iniciales del hinchamiento y el gráfico de $\ln F$ vs. $\ln t$ produce una línea recta hasta casi un aumento del 60 % en la masa del hidrogel.

Estudio Morfológico De Los Hidrogeles Mediante Microscopía Óptica (MO)

Para la obtención de las micrografías se siguió el procedimiento descrito por Daudon *et al.* (2016), para ello, primeramente, se procedió a hidratar los hidrogeles por 24 h para obtener mejor visualización en el equipo utilizado, luego se cortaron cuidadosamente pequeños fragmentos y se observaron sin procedimiento adicional en el Microscopio óptico (MO) digital AIGO EV 5610 con aumentos 4X, 10X y 40X de magnitud. Su morfología fue descrita a partir del aspecto de la superficie, color y forma, donde se obtuvieron micrografías MO de las muestras de hidrogeles de PAAm y de los nanocompuestos.

Actividad Antimicrobiana

La evaluación de la actividad antibacteriana se llevó a cabo mediante la técnica de difusión en agar, utilizando las cepas de *Staphylococcus aureus* (LCBRA-230424), *Escherichia coli* (LCBRA-250424), *Pseudomonas aeruginosa* (LCBRA-240424) y *Klebsiella pneumoniae* (LCBRA-290424). Se evaluó la actividad antibacteriana de los hidrogeles de PAAm, PAAm-MWCNT-f, PAAm/Ag y PAAm-MWCNT-f/Ag. Los hidrogeles fueron cortados en secciones y depositados sobre la superficie del agar Müller-Hinton, previamente inoculado con las cepas bacterianas correspondientes de concentración conocida ($1,0 \times 10^8$ células/ml), preparada por comparación con el patrón de referencia Mc Farlan 0,5 en suero fisiológico. Como control, se utilizaron discos de papel impregnados con una solución de AgNO_3 de concentración conocida.

Seguidamente, la placa se incubó a 37 °C por un periodo de 5 días. El factor para determinar si el material presentó o no propiedades bactericidas fue la formación de halos de inhibición alrededor de las muestras, como resultado de la interrupción del crecimiento microbiano (Bauer *et al.*, 1966).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Espectroscopia FTIR De MWCNT y MWCNT-f

Se realizó un análisis por espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) para caracterizar los grupos funcionales presentes en los MWCNT antes y después del tratamiento con H_2SO_4 . La comparación de los espectros FTIR obtenidos, reveló la aparición de nuevas bandas, lo que indica una eficiente oxidación de la superficie de los MWCNT con la incorporación de grupos funcionales característicos del tratamiento con ácido.

La figura 13 muestra los espectros FTIR para MWCNT y MWCNT-f. El espectro IR para los MWCNT sin funcionalizar muestra un pico de absorción a 1580 cm^{-1} que puede atribuirse al estiramiento $\text{C}=\text{C}$ de la cadena principal poliaromática de los MWCNT, otra banda a 1334 cm^{-1} se atribuye a las flexiones del enlace C-H de anillo aromático. Mientras que a 1010 cm^{-1} se aprecia un pico característico de vibraciones de estiramiento del enlace C-O que puede surgir de la oxidación con el medio ambiente. La ausencia de bandas intensas en la región típica de carbonilos (1700 cm^{-1} a 1800 cm^{-1}) indica una baja densidad de grupos funcionales doblemente oxigenados en la superficie de los MWCNT sin funcionalizar. Esta característica limita su capacidad de interacción con matrices poliméricas y otros compuestos debido a su naturaleza hidrofóbica.

Por el contrario, en el espectro de MWCNT-f aparece una nueva banda de absorción ancha y de alta intensidad en la región de 3496 cm^{-1} que se asigna a los estiramientos de los enlaces O-H , lo que sugiere la presencia de grupos hidroxilos ($-\text{OH}$) y/o carboxilos ($-\text{COOH}$) en la superficie de los MWCNT-f, otra banda de baja intensidad característica de este tipo de funcionalización, se encuentra a 1720 cm^{-1} asignada al doble enlace C=O atribuida al grupo $-\text{COOH}$, indicando la formación de nuevos enlaces en la estructura de los MWCNT-f, en la región de 2899 cm^{-1} y 2819 cm^{-1} dos bandas de absorción son atribuibles a los estiramientos simétricos como asimétricos de los enlaces C-H de grupos CH y CH_2 , en la región de 1641 cm^{-1} se observa una banda

de poca intensidad, correspondiente al estiramiento de tensión del doble enlace $C=C$, además, se observa la banda de baja intensidad que se encuentra a 1331 cm^{-1} proveniente a las vibraciones de deformación en el plano de grupos CH y CH_2 . Esta observación es consistente con estudios previos reportados por Girei *et al.* (2012), donde describe las bandas de absorción por los grupos funcionales antes descritos (figura 14).

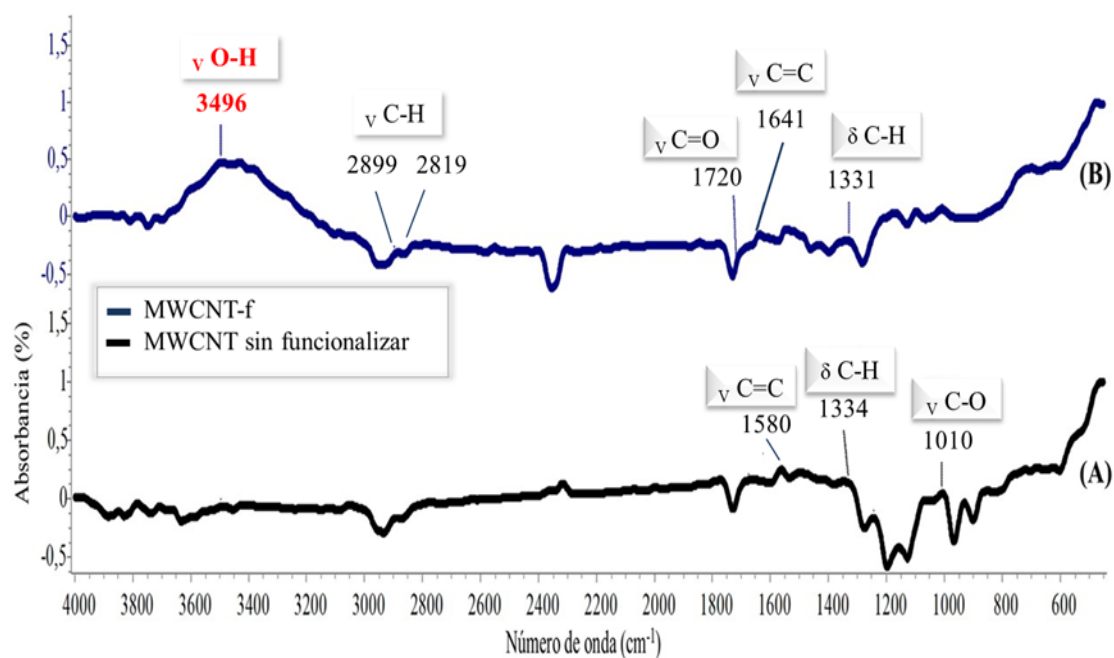


Figura 13. Espectros FTIR de (A) MWCNT y (B) MWCNT-f.

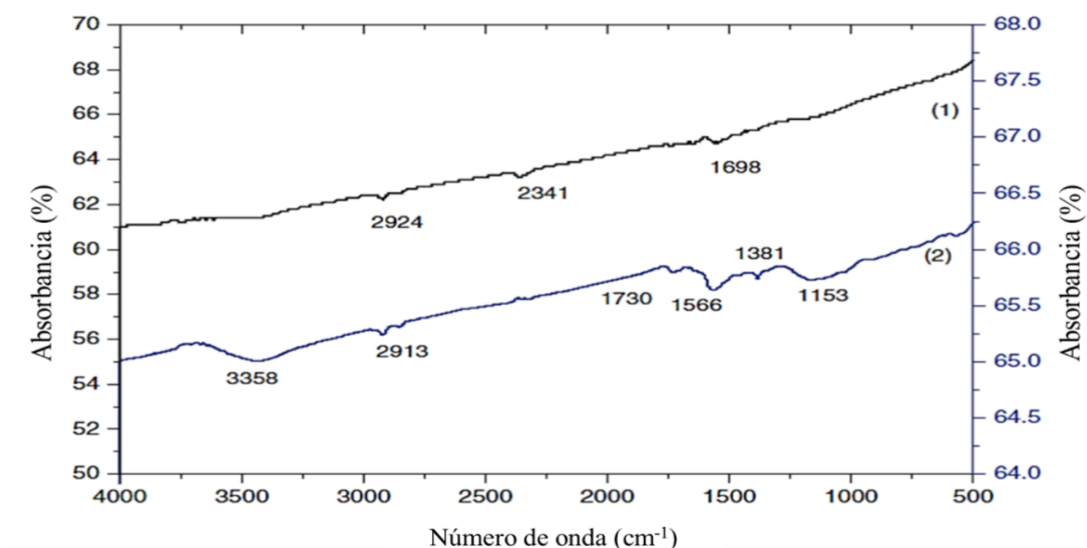


Figura 14. Espectros FTIR de (1) MWCNT y (2) MWCNT-f. (Girei *et al.*, 2012).

Cuantificación De Los Grupos Ácidos En Mwcnt-F Por Titulación Ácido-Base

Los resultados mostrados en la tabla 2, se obtuvieron mediante la observación de los gráficos obtenidos en la titulación potenciométrica.

Tabla 2. Contenido de grupos ácidos presentes en los MWCNT-f

NaOH (mol l ⁻¹)	HCl (mol l ⁻¹)	Muestra	Cont. H ⁺ (mmol g ⁻¹)	DS
0,0827	0,0820	MWCNT-f	38,8619	2,4542

Cont. H⁺: Contenido de grupos ácidos (mmol g⁻¹); DS: Desviación estándar

Numerosos estudios han demostrado que la cantidad de grupos carboxílicos (-COOH) introducidos en los MWCNT durante el proceso de funcionalización varía considerablemente y depende de las condiciones experimentales. Los hallazgos obtenidos revelan la presencia de grupos ácidos en los MWCNT tras el proceso de funcionalización, alcanzando un valor de 38,8619 mmol g⁻¹. Los valores de

concentración de grupos -COOH e -OH obtenidos en este estudio son superiores a los reportados por Sánchez *et al.* (2013) para MWCNT sometidos a distintos tratamientos de oxidación, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Concentración relativa de grupos carboxílicos determinados vía titulación ácido-base (Sánchez *et al.*, 2013)

Tratamiento	Químico tradicional (80 °C)	Químico vía microondas (130 °C)	Químico vía microondas (150 °C)	Químico vía microondas (130 °C)
Muestra	NTC-H ₂ O ₂	NTC-H ₂ O ₂	NTC-H ₂ O ₂	NTC-H ₂ O ₂ /H ₂ SO ₄
$C_{(-COOH)}$ (mmol g ⁻¹)	3,0	2,86	3,5	4,5

Esta diferencia podría atribuirse a variaciones en las condiciones experimentales, como la concentración de reactivo, tratamiento empleado o el tiempo de reacción. Lo que sugiere que el método de oxidación utilizado influye significativamente en la cantidad de grupos funcionales incorporados en los NTC.

Sin embargo, los resultados reportados por Gómez (2018), corroboran la eficacia del tratamiento con H₂SO₄ para incorporar significativamente grupos ácidos (-COOH y -OH) en la superficie de los MWCNT. Demostrando que la funcionalización mejora considerablemente las propiedades superficiales de los MWCNT, ampliando así su potencial para diversas aplicaciones.

Espectroscopia FTIR-ATR De Hidrogeles

Se realizaron análisis de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR-ATR) para identificar los grupos funcionales característicos presentes en los diferentes tipos de hidrogeles sintetizados PAAm y PAAm-MWCNT-f

(nanocompósitos). Además, se evaluaron las posibles interacciones entre los MWCNT-f y la matriz polimérica.

En la figura 15, se presenta el espectro FTIR del hidrogel de PAAm puro, a 3323 cm^{-1} y 3182 cm^{-1} se observan dos señales característica de la absorción de amida primaria N-H (estiramiento asimétrico y simétrico del enlace N-H), en la región entre 2921 cm^{-1} y 2856 cm^{-1} se observan dos bandas de mediana intensidad que indican la presencia del estiramiento del enlace C-H en grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) o metilo ($-\text{CH}_3$), a 1647 cm^{-1} una banda de poca intensidad es atribuida al estiramiento del doble enlace C=O proveniente del grupo funcional amida ($-\text{CONH}_2$), y una banda a 1607 cm^{-1} atribuida a los movimientos de flexión de tijera de los enlaces N-H, mientras que la banda en 1453 cm^{-1} corresponde a la torsión del enlace C-H en las cadenas y otra a 1424 cm^{-1} atribuida al estiramiento del enlace C-N del grupo amida, por último, a 1318 cm^{-1} se observa una banda de mediana intensidad indicativo de los estiramientos de los enlaces C-H de la cadena principal.

En la tabla 4, se resumen las principales bandas de absorción características del hidrogel PAAm, lo que permite confirmar la ocurrencia de la reacción de polimerización y la formación de la red polimérica. Estos hallazgos están en concordancia con estudios previos (Hernández, 2020), lo que confirma la estructura del hidrogel.

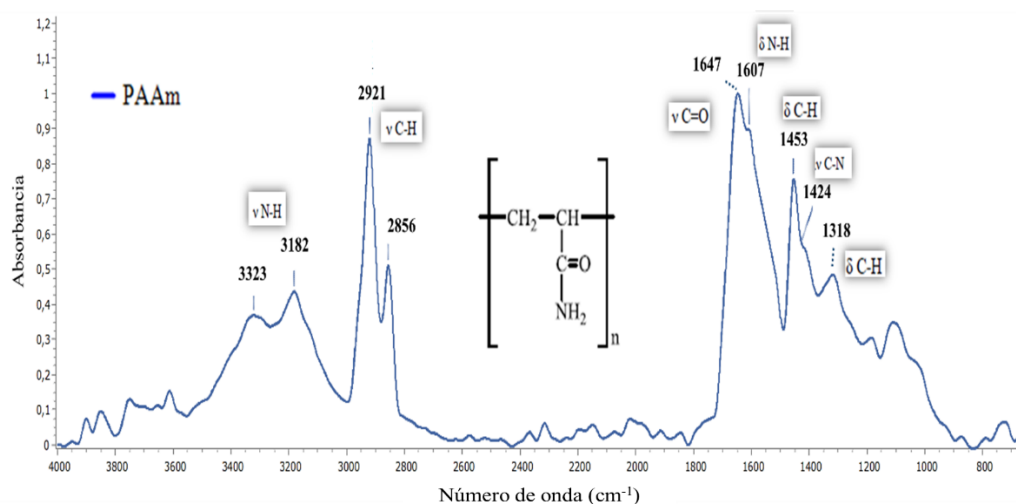
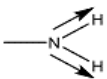
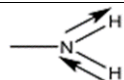
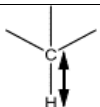
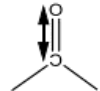
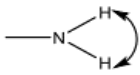
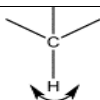
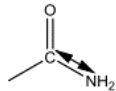
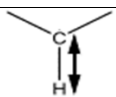


Figura 15. Espectro FTIR-ATR del hidrogel de PAAm

Tabla 4. Bandas de absorción características del hidrogel de PAAm

Grupo	Vibración y tipo de enlace	Número de onda (cm^{-1})
	Estiramiento N-H (simétrico)	3323
	Estiramiento N-H (asimétrico)	3182
	Estiramiento C-H (alifático)	2921
	Estiramiento C=O	1647
	Flexión de tijera N-H	1607
	Torsión C-H	1453
	Estiramiento C-N	1424
	Estiramiento C-H	1318

De acuerdo a lo observado en los espectros de los nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f en sus diferentes proporciones (figura 16), se corrobora la aparición de una banda a 1748 cm^{-1} atribuida al estiramiento del doble enlace C=O del grupo carboxilo (-COOH) de los MWCNT-f. Esta banda se observa medianamente desplazada en 28 cm^{-1} , en comparación a la que aparece a 1720 cm^{-1} en el espectro del MWCNT-f (figura 13 B). Además de este desplazamiento, se observa una disminución en las intensidades de las señales a 3323 cm^{-1} y 3182 cm^{-1} , características al grupo -NH₂ del hidrogel de PAAm. Lo que sugiere posibles interacciones entre los grupos funcionales de los MWCNT-f con los grupos -CONH₂ presentes en la matriz polimérica de la PAAm.

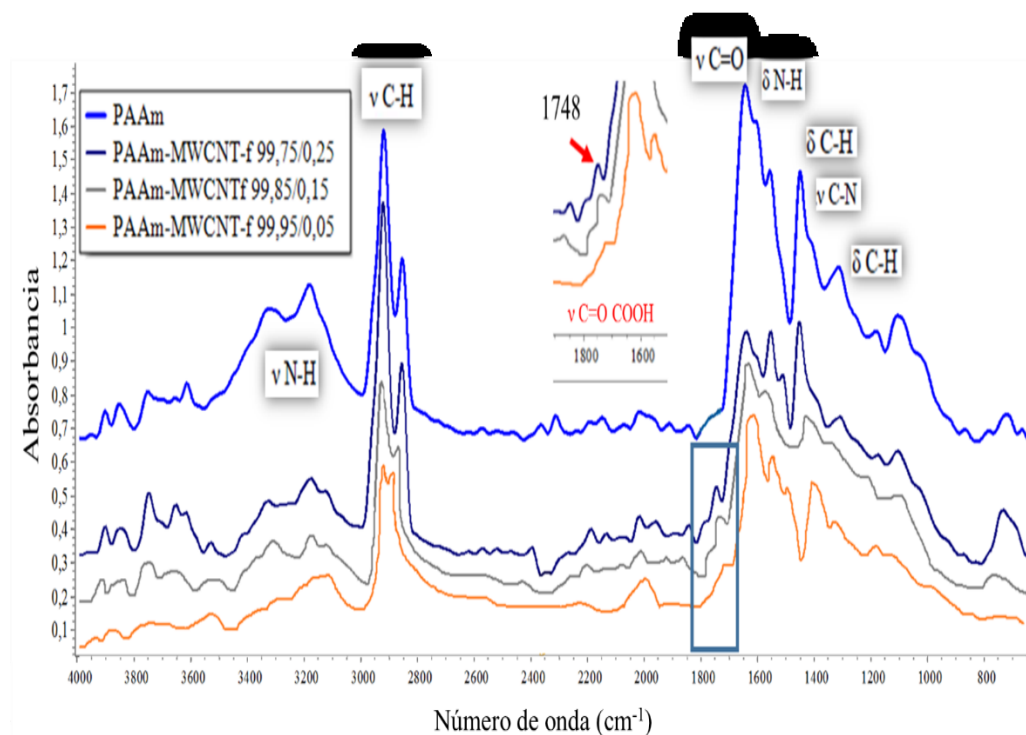


Figura 16. Espectros FTIR-ATR del hidrogel de PAAm y nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f en sus diferentes proporciones

En la figura 17, se aprecia los posibles mecanismos de interacción, con la formación de enlaces, entre los grupos funcionales -COOH de los MWCNT-f y los grupos (-CONH₂) presentes en la matriz polimérica de PAAm. Además, el análisis detallado del rango de absorción del grupo funcional C=O (tabla 5) confirma la presencia de las nuevas interacciones moleculares propuestas.

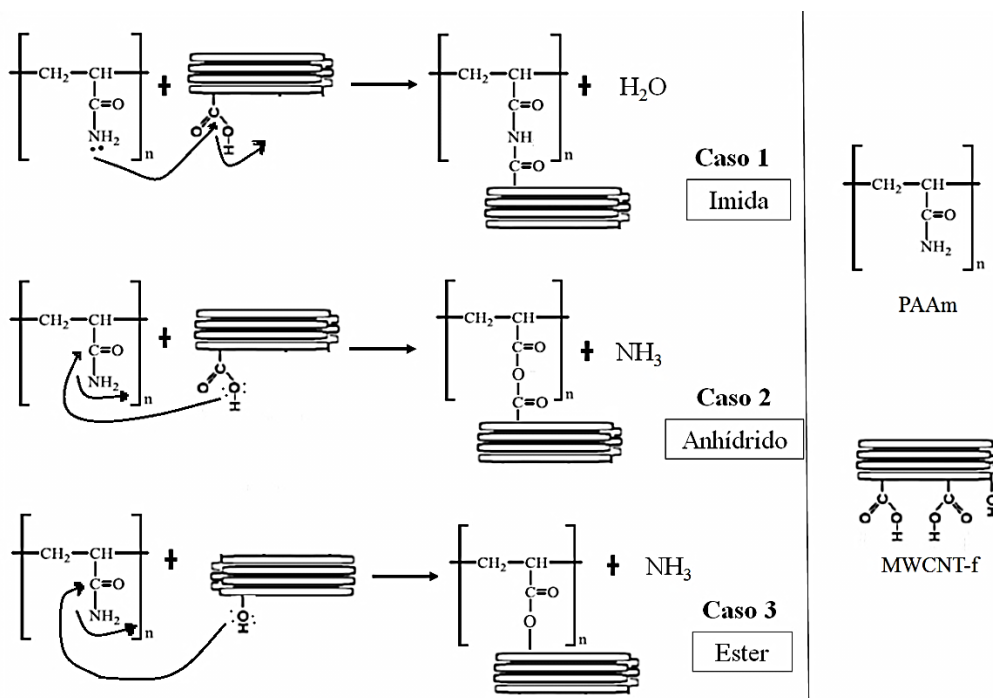


Figura 17. Posibles mecanismos de interacción de grupos funcionales -COOH en los MWCNT-f con los grupos funcionales en el hidrogel de PAAm

Tabla 5. Bandas de absorción características de carbonilo en el espectro IR

Grupo funcional	Vibración característica	Rango de absorción
		(cm^{-1})
Imida	C=O	1680-1780
Éster	C=O	1730-1750
Anhídrido	C=O	1740-1820

Hinchamiento De Hidrogeles

Para evaluar el comportamiento de hinchamiento de los diferentes hidrogeles, se monitoreó la cantidad de agua que los geles absorbieron con el paso del tiempo. De acuerdo a las isotermas de absorción de los hidrogeles (figura 18), se puede notar que el

porcentaje de hinchamiento en todos los hidrogeles compuestos, a excepción del hidrogel de PAAm-MWCNT-f/Ag, poseen no solo una mayor absorción de agua, si no también, tasas de hinchamiento más rápidas en comparación con el hidrogel de PAAm, (figura 19). Los MWCNT funcionalizados con el H_2SO_4 presentan mayor porcentaje de grupos $-COOH$ y $-OH$ formados en las paredes exteriores de los MWCNT. Estos grupos funcionales provocan una mayor absorción de agua en los hidrogeles de PAAm-MWCNT-f.

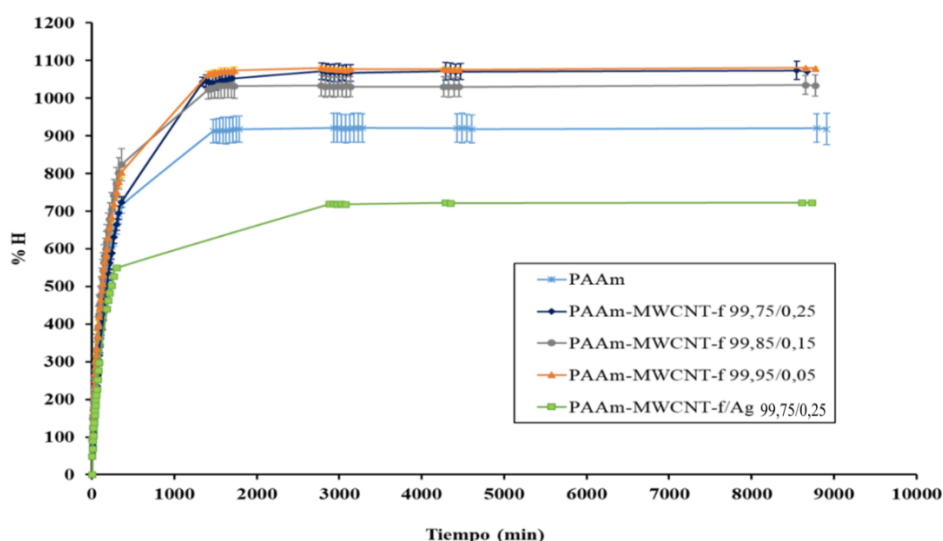


Figura 18. Isotermas de absorción del hidrogel de PAAm y los nanocompuestos (AAm-X) sumergidos en agua desionizada. X: MWCNT

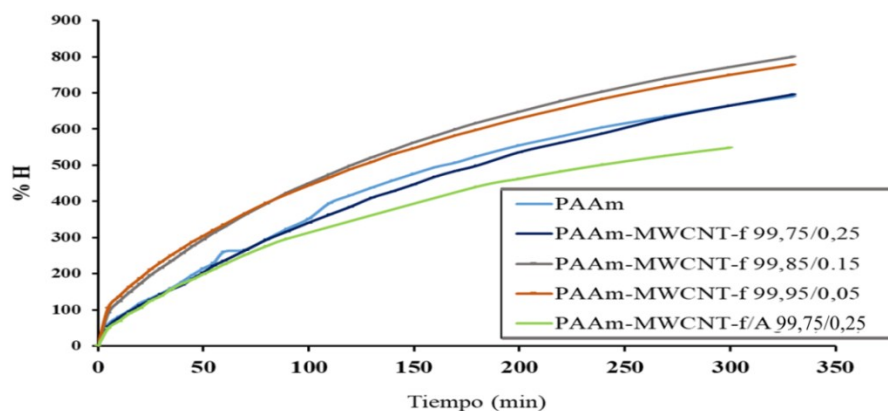


Figura 19. Isotermas de absorción del hidrogel de PAAm y los nanocompuestos (AAm-X) a los primeros instantes de hinchamiento en agua desionizada.

Liu *et al.* (2012) demostraron que cuando los MWCNT-COOH funcionalizados con ácidos carboxílicos se introdujeron en hidrogeles nanocompuestos de poli(acrilamida-co-metacrilato de sodio) dan lugar al aumento del hinchamiento. Se puede considerar que la adición de MWCNT-COOH como relleno puede restringir la formación de la reticulación entre las cadenas de polímeros. Como resultado, la densidad de reticulación disminuye, y el tamaño de los poros aumenta, lo que conduce a una mejora en la capacidad de hinchamiento. Por su parte, Li *et al.* (2016), atribuyeron que las relaciones máximas de hinchamiento de los nanocompuestos podrían depender en gran medida del contenido de MWCNT-f presentes en la matriz del hidrogel.

Investigación previa realizada por Cortés *et al* en el 2011, evidenciaron la capacidad de los NTC para actuar como agentes nucleantes, favoreciendo la formación de microcavidades en el hidrogel durante la polimerización. Estas microcavidades pueden almacenar más agua y mejorar el hinchamiento del polímero.

Cabe mencionar, que para este estudio la diferencia entre las variaciones de MWCNT-f utilizadas fueron muy pequeñas (0,25 %, 0,15 % y 0,05 %), por lo que, no se observa una variación estadística relevante entre el índice de hinchamiento, en equilibrio, de los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f mostrados en la figura 20.

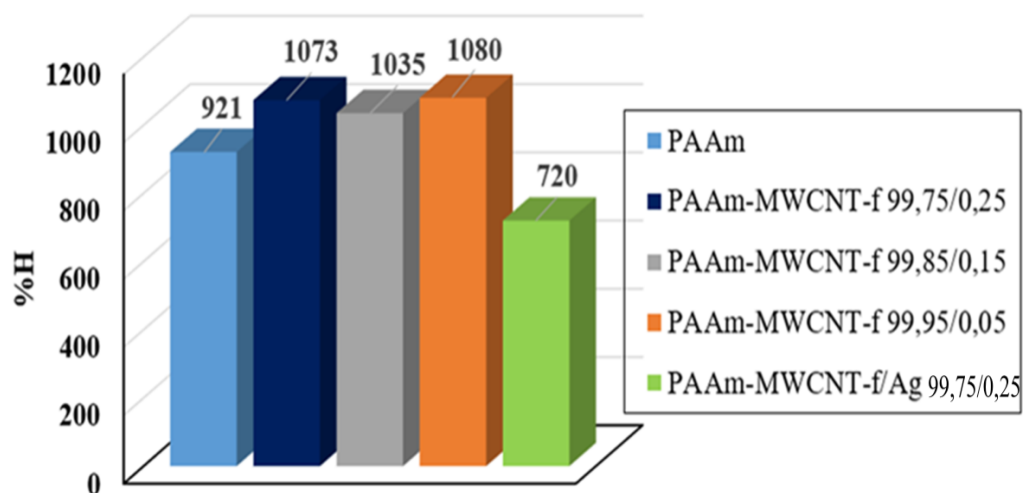


Figura 20. Índices de hinchamiento en agua desionizada obtenidos para hidrogeles de PAAm y los nanocompuestos hidratados hasta su equilibrio.

La incorporación de nanopartículas de plata en el nanocompuesto de PAAm-MWCNT-f/Ag (figura 21), resulta en una disminución significativa del grado de hinchamiento en comparación con el hidrogel puro. Este comportamiento sugiere una interferencia en la capacidad de absorción de agua debido a la presencia de plata, posiblemente por la alteración de la porosidad o la interacción de las nanopartículas con las cadenas poliméricas. Esta interacción hace que la estructura del hidrogel sea más rígida y menos flexible que la del hidrogel de PAAm, limitando su capacidad de absorber agua y expandirse. Por otro lado, el nanocompuesto PAAm-MWCNT-f/Ag muestra además, menor capacidad de absorción en comparación al nanocompuesto de PAAm-MWCNT-f, observándose un menor índice de hinchamiento, tal como se pueden apreciar en la figura 22. Resultados similares fueron reportados por Bal *et al.* 2015, lo que permite corroborar los resultados obtenidos en este estudio.

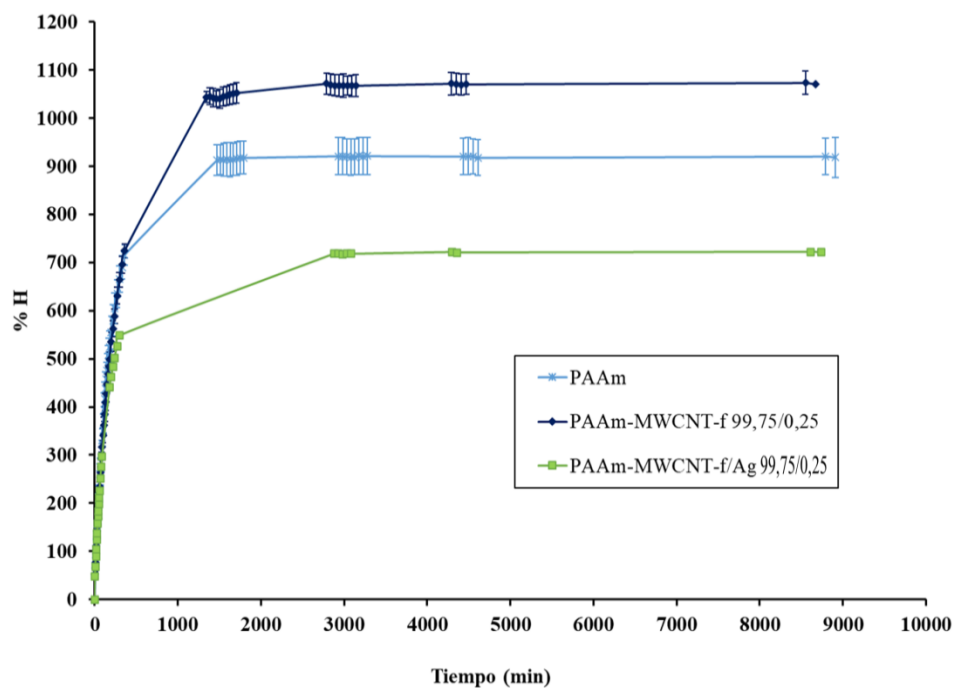


Figura 21. Comparación de las isoterms de absorción del hidrogel de PAAm y los nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag

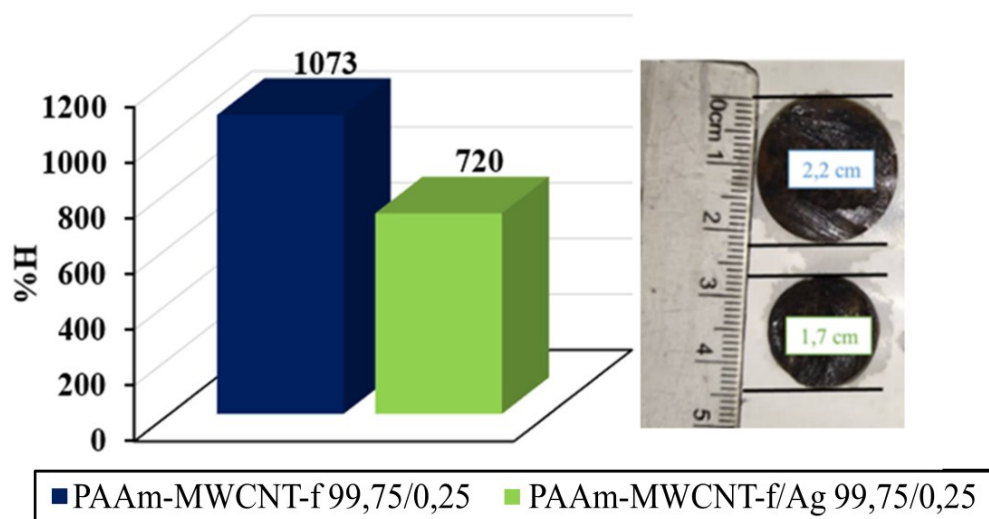


Figura 22. Comparación del índice de hinchamiento en agua desionizada obtenidos para los nanocompuestos hidratados hasta su equilibrio.

Cinética De Hinchamiento

Por medio de la ecuación 5, se obtuvo la regresión lineal de la isoterma de hinchamiento para el hidrogel de PAAm y los nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f en sus diferentes formulaciones (figura 23), donde a partir de ella, se obtienen los valores de la constante de rapidez de hinchamiento (k_h) y la cantidad de agua en el equilibrio (W_∞). Además, se establece una comparación de la regresión lineal entre las isotermas de los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag (figura 24). De acuerdo a lo observado, se puede deducir que las isotermas de hinchamiento de los hidrogeles siguen típicamente una cinética de pseudosegundo orden, propuesto por Schott en 1992.

La incorporación de MWCNT-f al hidrogel de PAAm generó un ligero aumento en su capacidad de absorción de agua, pasando de un valor de 90,09 % para el hidrogel de PAAm puro a un promedio de 91,74 % en los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f, tal como se muestra en la tabla 6, proveniente a la cantidad de grupos carboxílicos que se encuentran en los materiales evaluados, estos resultados son consistentes con los reportados por Ramírez *et al.* (2011), donde se corrobora que el $\%W_\infty$ para el hidrogel de PAAm fue menor que para hidrogeles compuestos. Sin embargo, esta mejora no fue

consistente al variar las concentraciones de NTC-f en el hidrogel de PAAm-MWCNT-f, mostrando valores similares de $\%W_{\infty}$ en todos los nanocompuestos (PAAm-MWCNT-f) estudiados. Esto sugiere que la presencia de NTC-f en los rangos evaluados, no influye de manera determinada en este parámetro, debido a que otros factores, como la distribución de los MWCNT-f en la matriz o las interacciones entre las nanopartículas y cadenas poliméricas podrían estar influyendo en este comportamiento.

Por el contrario, el valor obtenido en el $\%W_{\infty}$ para el hidrogel de PAAm-MWCNT-f/Ag fue de 89,29 %, observándose una diferencia en el valor hallado en comparación a los nanocompuestos (PAAm-MWCNT-f), lo que se atribuye a la presencia o ausencia de nanopartículas de plata en la matriz del hidrogel. La incorporación de estas nanopartículas reduce ligeramente la capacidad de absorción de agua del material.

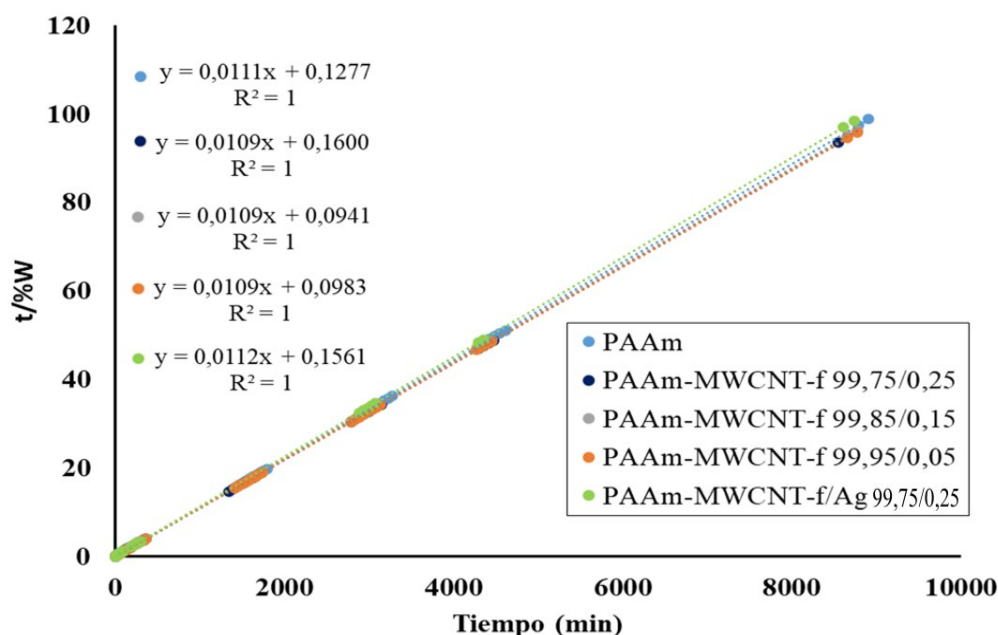


Figura 23. Regresión lineal de las isoterms de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden para hidrogeles de PAAm y los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f sumergidos en agua desionizada.

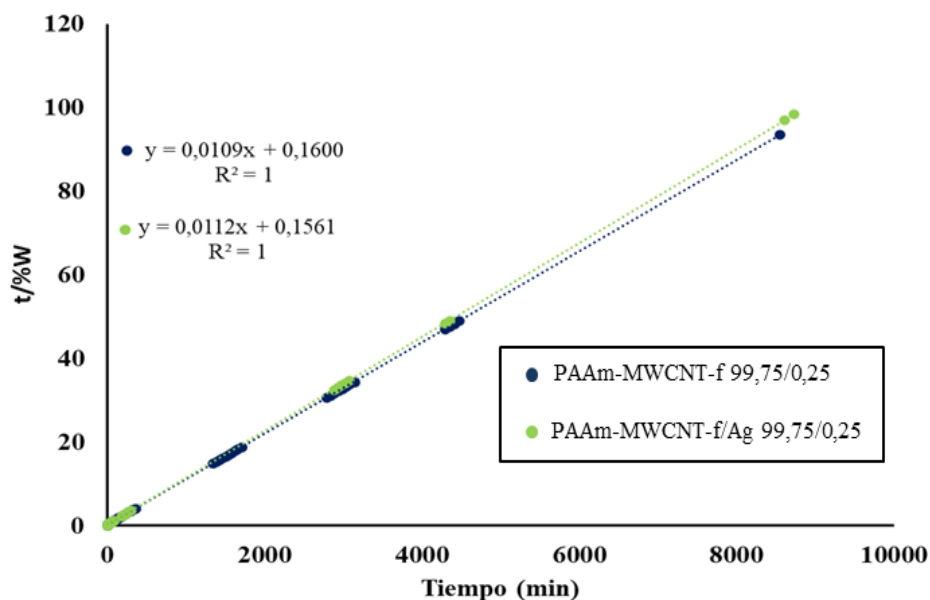


Figura 24. Regresión lineal de las isotermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden para los nanocompuestos PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag sumergidos en agua desionizada

Tabla 6. Parámetros cinéticos e índices hinchamiento en agua desionizada para las diferentes formulaciones de hidrogeles

Hidrogeles	$k_h \times 10^{-3} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$\%W_\infty$	$\%H \pm \text{DS}$
PAAm 100	0,97	90,09	921 ± 2
PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25	0,74	91,74	1073 ± 4
PAAm-MWCNT-f 99,85/0,15	1,26	91,74	1035 ± 4
PAAm-MWCNT-f 99,95/0,05	1,21	91,74	1080 ± 4
PAAm-MWCNT-f/Ag 99,75/0,25	0,80	89,29	720 ± 2

DS: Desviación estándar

Se puede destacar, en la tabla 6, que el valor de la constante de velocidad de hinchamiento (k_h) se incrementa ligeramente al incorporar un 0,05 % de MWCNT-f al

hidrogel de PAAm, luego este valor no cambia significativamente al elevar el contenido de MWCNT-f a 0,15 %. Sin embargo, cuando el contenido de MWCNT-f se lleva hasta 0,25 % se observa una reducción significativa en la k_h , pasando de $1,21 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ a $0,74 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Esto sugiere que la velocidad de absorción de agua tiende a decrecer al incrementar el contenido de MWCNT-f en la matriz del hidrogel de PAAm. Este comportamiento podría explicarse por la formación de aglomerados de MWCNT-f dentro de la matriz polimérica, lo que reduce la superficie de contacto efectiva entre los grupos carboxílicos y el agua. Estos aglomerados podrían actuar como barreras físicas, dificultando la difusión del agua hacia el interior del hidrogel y, por lo tanto, limitando la velocidad de hinchamiento.

Por otra parte, al comparar el hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,75/0,25) con el hidrogel de PAAm-MWNTC-f/Ag, se observó un valor ligeramente mayor de k_h para el nanocompósito con plata, probablemente indica que las interacciones entre los NTC-f provenientes a los aglomerados formados a lo largo de la matriz del hidrogel de PAAm, formó una red más rígida que obstaculizó el movimiento de las cadenas poliméricas del hidrogel PAAm-MWCNT-f, reduciendo la rapidez de hinchamiento. Estos resultados sugieren que no solo la presencia de iones Ag^+ en la estructura del hidrogel reduce la rapidez de absorción de agua, sino que, la concentración y distribución de los NTC-f es crucial para lograr un control preciso de las propiedades de absorción de los nanocompósitos.

Mecanismo De Difusión Del Agua

Las propiedades físicas del polímero, como la cantidad de entrecruzamiento, el tamaño de poros y la cristalinidad, influyen directamente en la facilidad con la que las moléculas de agua pueden atravesar su estructura. Una red polimérica más densa y con menor porosidad dificulta el movimiento de estas moléculas, ralentizando el proceso de difusión. Además, las interacciones entre los segmentos del polímero y las moléculas de agua pueden generar obstáculos adicionales, disminuyendo aún más la velocidad a la que el agua penetra en el material. De acuerdo con la segunda ley de Fick, la ecuación de

la ley de potencia (ecuación 6), es posible determinar la naturaleza de la difusión del agua hacia el interior de hidrogeles (Benítez, 2019). En la figura 25, se puede observar la región lineal para las curvas de $\ln F_C$ por medio de los datos de hinchamiento en agua desionizada de hidrogeles de PAAm y nanocompuestos.

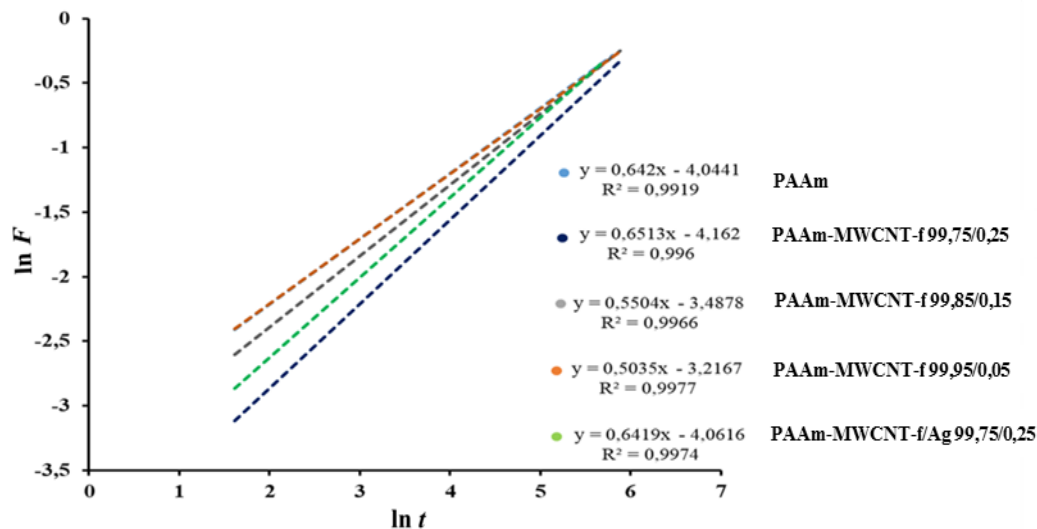


Figura 25. Región lineal para las curvas de $\ln F$ vs $\ln t$ mediante los datos de hinchamiento en agua desionizada de hidrogeles de PAAm, PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag

Los valores de la constante de difusión (k_d), presentados en la tabla 7 evidencian que el hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,95/0,05), presenta el valor más alto de k_d , indicando la mayor movilidad de agua dentro de la red del hidrogel en comparación al hidrogel PAAm-MWCNT-f (99,75/0,25), lo que indica que la mayor cantidad de NTC-f, influye significativamente en la movilidad de las moléculas de agua. Debido, al espacio ocupado por los NTC-f en la red del hidrogel, lo que dificulta el movimiento libre de las moléculas de agua, provenientes a la poca dispersión de los NTC-f dentro de la matriz. Además, es importante destacar que los grupos funcionales presentes en los MWCNT-f, son altamente hidrofílicos, es decir, tienen una fuerte afinidad por el agua. Esta interacción entre los grupos funcionales y las moléculas de agua compensa en parte el

efecto obstructivo de los nanotubos.

Por otra parte, en los hidrogeles nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f y PAAm-MWCNT-f/Ag, contienen la misma proporción de NTC-f (0,25 %), la velocidad de difusión del agua en ellos, en la etapa inicial del hinchamiento, no difiere notablemente. Esta pequeña variación se debe principalmente a dos factores: la dispersión de los NTC-f dentro de la matriz y la presencia de iones Ag^+ en el segundo hidrogel. Una menor dispersión de los NTC-f en el hidrogel PAAm-MWCNT-f dificulta el movimiento del agua a través de la matriz, lo que se traduce en una menor constante de difusión. Por otro lado, en el hidrogel PAAm-MWCNT-f/Ag, la interacción entre los iones Ag^+ y los grupos funcionales en los NTC-f forma una estructura más rígida, dificultando el paso del agua y disminuyendo así la constante de difusión en el nanocompuesto con plata.

Tabla 7. Parámetros de difusión de agua en el hidrogel de PAAm y nanocompuestos

Hidrogeles	n	k_d	R^2
PAAm 100	0,6420	0,0175	0,9919
PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25	0,6513	0,0156	0,9960
PAAm-MWCNT-f 99,85/0,15	0,5504	0,0306	0,9966
PAAm-MWCNT-f 99,95/0,05	0,5035	0,0401	0,9977
PAAm-MWCNT-f/Ag 99,75/0,25	0,6419	0,0172	0,9974

Los datos obtenidos en la tabla 7 para el exponente difusional (n), supera en todos los casos el valor de 0,5; lo que indica que el proceso de transporte de agua a través de los hidrogeles no sigue un patrón de difusión convencional (Fickiano), sino que presentan un carácter anómalo o no Fickiano. Es decir, a medida que el agua penetra en el hidrogel, las cadenas poliméricas se reajustan y reorganizan, lo que afecta la

movilidad en las moléculas de agua y da lugar a un comportamiento de difusión más complejo. Cuando la concentración de NTC-f es de 0,25 % en el nanocompósito de PAAm-MWCNT-f el valor del exponente difusional es de 0,6513, esto puede deberse a varios factores, como la heterogeneidad provocada por los NTC-f en la estructura del hidrogel, las interacciones entre los grupos funcionales en la matriz o los cambios en la estructura del hidrogel de PAAm durante el proceso de difusión, dificultando la movilidad de las cadenas. Sin embargo, cuando la concentración de NTC-f es disminuida a 0,15 % y 0,05 %, el valor del exponente de difusión disminuye a 0,5504 y 0,5035, respectivamente. Esto sugiere que la disminución del contenido de NTC-f provoca un incremento del comportamiento Fickiano, donde la relajación de las cadenas del polímero ocurre un poco más rápido en comparación a la difusión del agua.

Este hallazgo corrobora los resultados reportados por Benítez *et al.* (2011), quienes investigaron el proceso de hinchamiento en hidrogeles similares. Su estudio reveló que la difusión del agua y la relajación viscoelástica del polímero ocurren simultáneamente durante el hinchamiento. Esto implica que la penetración del agua no es un proceso puramente difusivo, sino que está íntimamente ligada a la dinámica de la red polimérica. Este comportamiento se manifiesta cuando el exponente de difusión se encuentra entre 0,5 y 1, lo que indica un mecanismo de difusión no Fickiano. En este rango, la relajación de la cadena polimérica controla la velocidad de hinchamiento, lo que sugiere que la estructura y flexibilidad de la red polimérica juegan un papel crucial en la absorción de agua.

Por otro lado, es posible que la presencia de iones Ag^+ esté generando efectos compensatorios en el hidrogel PAAm-MWCNT-f/Ag (0,25 %), aumentando la rigidez de la red polimérica, pero al mismo tiempo estar disminuyendo las interacciones entre las cadenas de la PAAm y el agua. Estos efectos opuestos podrían cancelarse entre sí, dando como resultado un valor del exponente de difusión similar al del hidrogel de PAAm puro.

Absorción De Especies Metálicas

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos a través de la titulación por precipitación, en la cual fue posible medir la cantidad de iones Ag^+ absorbidos por los hidrogeles en estudio.

Tabla 8. Evaluación de la capacidad de absorción de iones plata en hidrogeles

C_{AgNO_3}	C_{NaCl}	Hidrogeles	% Ag^+	DS
(mol l^{-1})	(mol l^{-1})		Absorbido	
0,1034	0,0999	PAAm	2,55	0,409
		PAAm-MWCNT-f (99,75/0,25)	3,84	0,616

C: Concentración experimental de AgNO_3 y NaCl ; DS: Desviación estándar; % Ag^+ : Cantidad de iones plata presentes en el hidrogel

Los resultados revelan que el hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,75/0,25) absorbió mayor porcentaje de plata en su interior (3,84 %) en comparación con el hidrogel de PAAm puro (2,55 %). Este incremento se atribuye a la formación de enlaces iónicos entre los iones de Ag^+ y los grupos funcionales carboxílicos (COO^-) presentes en los MWCNT-f, como se evidencia en la figura 26. Esta interacción fortalece la red del nanocompuesto, reduciendo su capacidad de hinchamiento y aumentando la capacidad del hidrogel de PAAm-MWCNT-f para absorber y retener los iones plata en comparación al hidrogel de PAAm (Ramírez *et al.*, 2013).

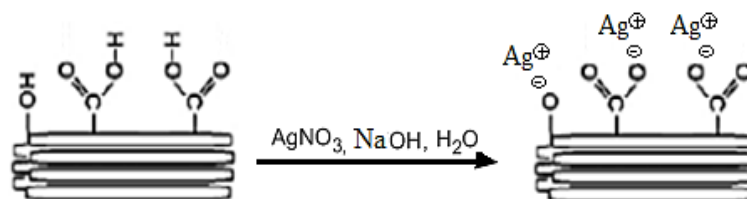


Figura 26. Representación idealizada de la interacción de los iones plata con los grupos funcionales carboxílicos. Partiendo de la propuesta de Devaux *et al.*, 2015

La capacidad de los hidrogeles para la absorción de iones metálicos está significativamente influenciada por sus características macromoleculares, incluyendo el grado de reticulación y el equilibrio hidrofílico/hidrofóbico, así como la estructura del ligando y las constantes de estabilidad del complejo polímero-metal. Además, la presencia de metales o nanopartículas metálicas puede alterar sustancialmente las propiedades del hidrogel, afectando su eficiencia de absorción. Factores como el *pH*, la concentración de iones metálicos y la morfología del hidrogel también juegan roles cruciales en este proceso. (Ahmadian *et al.*, 2023).

Análisis Morfológico De Los Hidrogeles

A través de este análisis, es posible observar la morfología de los hidrogeles, así, como la distribución de los MWCNT-f dentro de la matriz polimérica. La morfología de los hidrogeles hidratados pudo observarse mediante microscopia óptica (MO) con un aumento de 4X y 10X empleando luz transmitida.

La micrografía en la figura 27A revela un hidrogel de PAAm con una apariencia uniforme y vítrea, características típicas de redes poliméricas bien definidas. La ausencia de partículas o inclusiones visibles sugiere una distribución homogénea de la matriz polimérica. Al incorporar MWCNT-f en la matriz de PAAm (figuras 27B, 27C y 27D), se observa un cambio en la morfología del material. Los nanocompuestos presentan una coloración más oscura, atribuible a la presencia de los MWCNT-f dentro del polímero. Además, se observan zonas con mayor porosidad en este tipo de materiales, lo que sugiere interacciones entre los grupos funcionales presentes en los NTC-f con la matriz de la PAAm.

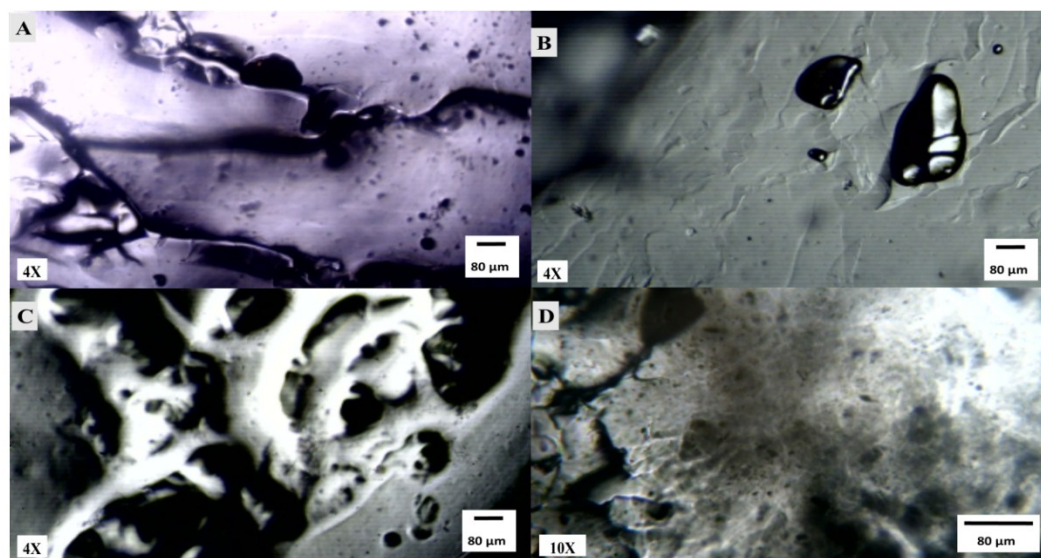


Figura 27. Imágenes obtenidas mediante MO para hidrogeles hinchados en equilibrio: (A) PAAm; (B) PAAm-MWCNT-f 99,95/0,05; (C) PAAm-MWCNT-f 99,85/0,15 y (D) PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25

La figura 28 revela la heterogeneidad en los nanocompuestos estudiados en comparación con el hidrogel de PAAm. Se observan zonas con aglomerados de MWCNT-f, lo que sugiere una distribución no uniforme de estos nanotubos en la matriz polimérica. Esta variabilidad morfológica, ausente en el hidrogel de PAAm, indica una influencia significativa de los MWCNT-f en la estructura del material. La heterogeneidad observada sugiere que la incorporación de los NTC-f introduce una complejidad adicional al material, lo cual podría tener implicaciones en sus propiedades finales. Estos resultados son consistentes con los reportados por Gonzaga (2022), quien también observó cambios en la microestructura de los hidrogeles de PAAm al incorporar NTC.

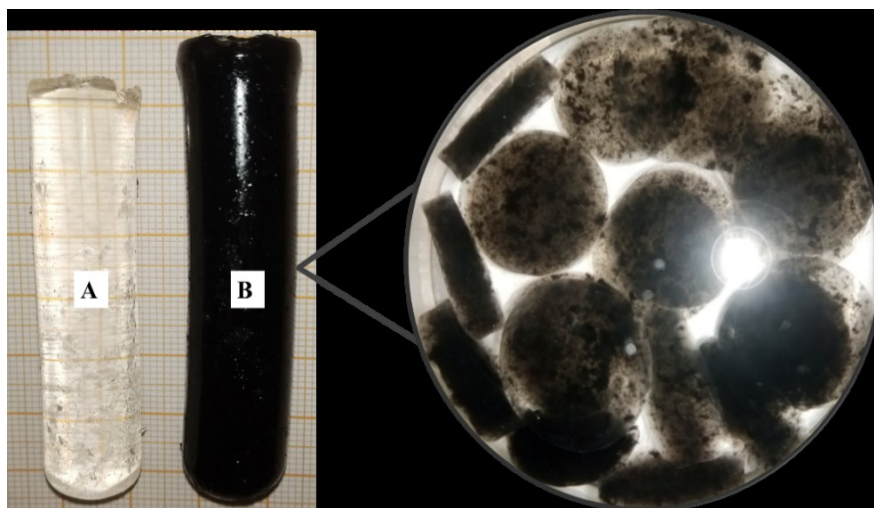


Figura 28. Obtención de nanocompuestos poliméricos: A) PAAm y B) PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25

Por su parte, el hidrogel de PAAm-MWCNT-f/Ag (figura 29B) exhibe una morfología notablemente distinta a la del hidrogel de PAAm-MWCNT-f (figura 29A). Mientras que, el primero muestra una superficie más compacta, el segundo se observa más irregular, lo que sugiere una interacción más estrecha entre los MWCNT-f con plata y la matriz polimérica de la PAAm. Estos hallazgos respaldan la idea de que la funcionalización de los MWCNT-f con diferentes grupos funcionales permite modular las propiedades de los nanocompuestos de PAAm, abriendo un amplio abanico de posibilidades para el diseño de materiales con características específicas.

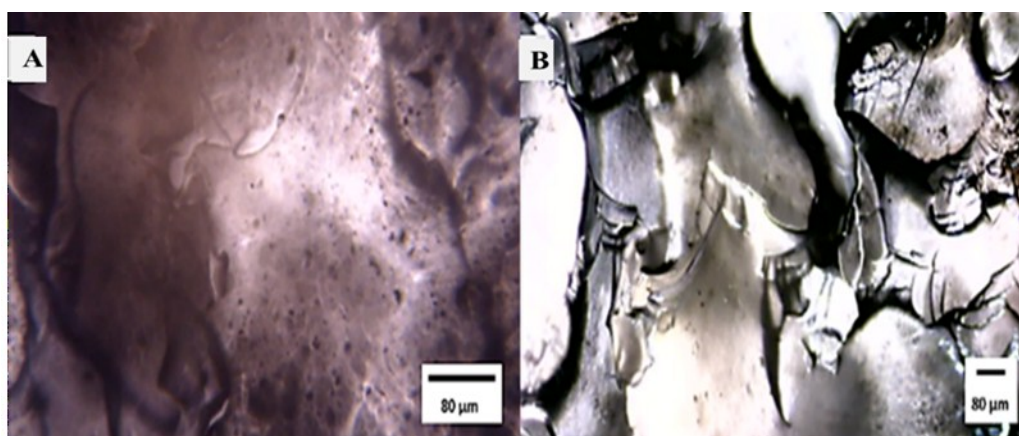


Figura 29. Comparación para hidrogeles en equilibrio de (A) PAAm-MWCNT-f 99,75/0,25 y (B) PAAm-MWCNT-f/Ag 99,75/0,25

Prueba Antibacteriana

La limitada eficacia de los recubrimientos antibacterianos actuales para prevenir infecciones en dispositivos biomédicos ha impulsado la búsqueda de nuevas estrategias. Estas estrategias deben garantizar una liberación controlada de agentes antimicrobianos y una amplia actividad contra diversos patógenos, superando así las limitaciones de los sistemas convencionales (Liu *et al.*, 2019).

Los hidrogeles de PAAm y PAAm-MWCNT-f en sus diferentes proporciones, que se hincharon únicamente en agua no exhibieron halos de inhibición, como se observa en la figura 30. Esto evidencia la importancia de la incorporación de iones de Ag^+ para conferir propiedades antimicrobianas a estos materiales. Este hallazgo concuerda con estudios previos por Gutiérrez *et al.* (2020), que demostraron que la actividad antimicrobiana de hidrogeles poliméricos está directamente relacionada con la presencia de iones metálicos como la plata. La ausencia de actividad antimicrobiana en los hidrogeles sin plata se debe a la falta de un agente biocida capaz de interactuar con los microorganismos. Los iones de plata, al entrar en contacto con las células bacterianas, interactúan con componentes esenciales como las proteínas y los ácidos nucleicos, lo que conduce a la pérdida de la viabilidad celular. Por lo tanto, la funcionalización de estos hidrogeles con nanopartículas de plata resulta crucial para desarrollar materiales con aplicaciones biomédicas, como sensores y parches, que requieren propiedades antimicrobianas y biocompatibilidad.

A diferencia de los resultados obtenidos con los hidrogeles en ausencia de plata, se evidencian (figura 31) que tanto los sistemas de PAAm/Ag como el nanocompuesto de PAAm-MWCNT-f/Ag inhiben el crecimiento bacteriano, tal como lo demuestran los halos de inhibición observados. Sin embargo, aunque ambos materiales presentan halos de inhibición similares, es fundamental considerar que la cantidad de plata absorbida/adsorbida inicialmente por cada material puede variar, lo que a su vez influye en la concentración local de iones de plata y, por consiguiente, en la cinética de liberación. Es decir, la variación en la absorción/adsorción inicial puede tener

repercusiones a largo plazo en la liberación sostenida de plata.

Estudios previos (Gutiérrez *et al.*, 2020) han demostrado que tanto la naturaleza del polímero como las condiciones de preparación influyen significativamente en la liberación de iones metálicos desde matrices poliméricas. En este caso, aunque no se evaluaron en detalle los mecanismos de liberación, las diferencias en la composición química entre los hidrogeles de PAAm y PAAm-MWCNT-f podrían generar variaciones en la movilidad de los iones de plata dentro de la matriz y, por ende, en su velocidad de liberación.

El nanocompuesto PAAm-MWCNT-f/Ag podría ofrecer una liberación más prolongada y controlada del agente antimicrobiano debido a una mayor afinidad de los iones plata por la matriz del nanocompuesto. Esto sugiere que la presencia de grupos carboxílicos en los nanotubos de carbono, interactúan con los iones plata, resultando en una liberación más sostenida, ideal para aplicaciones que requieren protección antimicrobiana a largo plazo.

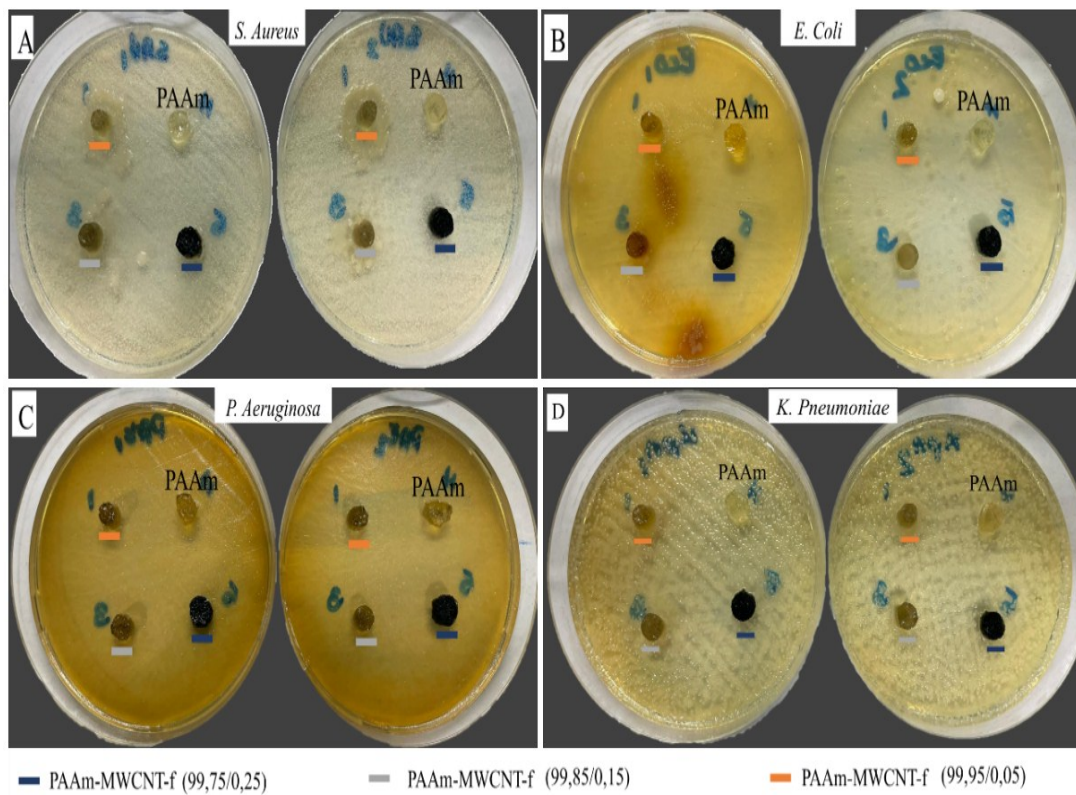


Figura 30. Actividad antimicrobiana de hidrogeles de PAAm y nanocompósito (PAAm-MWCNT-f) frente a bacterias patógenas en ausencia de solución de plata (AgNO_3), después de 120 h de incubación

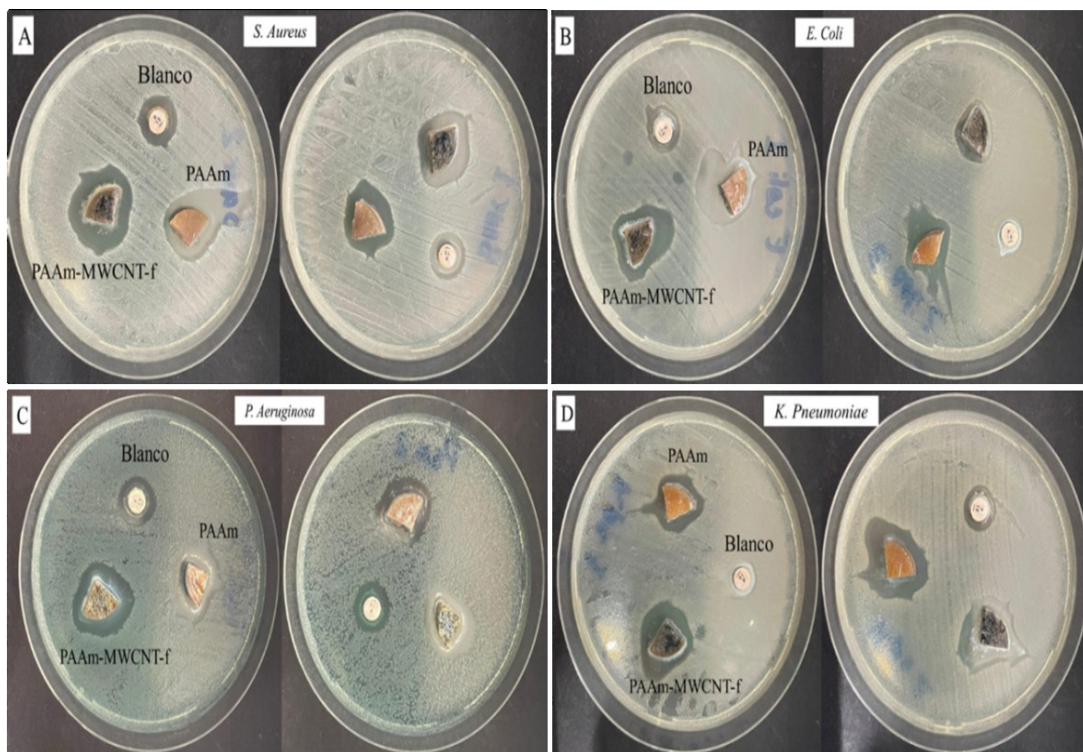


Figura 31. Actividad antimicrobiana de hidrogeles de PAAm y nanocompuestos (PAAm-MWCNT-f) frente a bacterias patógenas en presencia de AgNO_3 , después de 120 h de incubación

CONCLUSIONES

La funcionalización de los MWCNT con H_2SO_4 fue eficiente, lo cual se confirmó mediante el análisis por FTIR, evidenciando la incorporación de grupos funcionales ácidos en la superficie de los MWCNT-f.

Se logró la síntesis de hidrogeles de PAAm y PAAm-MWCNT-f en diferentes proporciones de alimentación, mediante polimerización vía radicales libres en solución, utilizando como agente entrecruzante *N,N'*-metilenbisacrilamida y persulfato de sodio como iniciador.

Los análisis de FTIR confirmaron la presencia de los grupos funcionales característicos en los diferentes tipos de hidrogeles sintetizados, lo que indica la incorporación de los MWCNT-f en la matriz polimérica.

La incorporación de grupos carboxílicos e hidroxilos a los MWCNT modificó las propiedades de absorción en los hidrogeles de PAAm-MWCNT.

La incorporación de iones Ag^+ en los nanocompuestos modificó las propiedades de hinchamiento del material, lo que corrobora interacciones entre los iones metálicos y los grupos funcionales de los MWCNT-f.

El modelo de Schott mostró menor velocidad de hinchamiento en el nanocompuesto de 0,25%. Esto sugiere que los NTC-f limitan la absorción de agua. Los NTC-f actúan como barreras, reduciendo la cinética del proceso.

El proceso difusional del agua a través del hidrogel siguió un comportamiento anómalo o no Fickiano a medida que se aumentó la concentración de NTC en el nanocompuesto de PAAm-MWCNT-f, indicando que la difusión del agua estuvo influenciada por la relajación viscoelástica de la matriz polimérica caracterizado por un exponente de difusión entre 0,5 y 1.

El análisis por MO indicó que la incorporación de los MWCNT-f en la matriz de PAAM fue efectiva e indujo cambios significativos en su morfología.

Los nanocompuestos de PAAM-MWCNT-f/Ag exhibieron propiedades antimicrobianas, mostrando halos de inhibición alrededor de los materiales, lo que sugiere una liberación controlada de iones Ag^+ .

RECOMENDACIONES

Utilizar otras técnicas de caracterización espectroscópicas (Raman, XPS) y microscópicas (SEM, TEM) para caracterizar en detalle la estructura, morfología y composición química de los MWCNT-f y los hidrogeles nanocompuestos.

Utilizar herramientas como la simulación computacional para predecir con precisión la estructura y propiedades de los MWCNT-f, permitiendo un diseño más eficiente de nuevos materiales con características deseadas.

Investigar métodos para funcionalizar selectivamente sitios específicos de los MWCNT, como los extremos o las paredes laterales, con el fin de obtener materiales con propiedades específicas, lo que es fundamental para su integración en sistemas biológicos.

Evaluar la biocompatibilidad a largo plazo y los posibles efectos tóxicos de estos materiales, por lo que se debe estudiar la interacción de los MWCNT-f con células y tejidos.

Para mejorar la selectividad y precisión en la determinación de grupos ácidos en los MWCNT-f, se sugiere reemplazar el NaOH por una base más débil. Esta modificación evitará la titulación de especies ácidas no deseadas y proporcionará resultados más confiables.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmadian, Z.; Kazeminava, F.; Afrouz, M.; Abbaszadeh, M.; Taban, N.; Abbasi, J.; Gouda, C.; Adeli, M. y Samadi, H. 2023. A review on the impacts of metal/metal nanoparticles on characteristics of hydrogels: Special focus on carbohydrate polymers, *International Journal of Biological Macromolecules*, 253: 126535.

Ajayan, P.; Zhou, Q.; Kim, K. y Huang, J. 2020. Applications of carbon nanotubes. *Chemical reviews*, 120(14): 10677-10718.

Andrade, M.; López, L. y Sáenz, A. 2012. Nanotubos de carbono: funcionalización y aplicaciones biológicas. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 43(3): 9-18.

Azpeitia, J.; Legorreta, F.; González, P.; Gallardo, C. y Abreu, A. 2015. Síntesis del híbrido NTC/Ph3P/Co, mediante síntesis asistida por microondas. *Tópicos De Investigación En Ciencias De La Tierra Y Materiales*, 2(2): 110-117.

Bal, A.; Çepni, F.; Çakir, O.; Acar, I. y Güçlü, G. 2015. Synthesis and characterization of copolymeric and terpolymeric hydrogel-silver nanocomposites based on acrylic acid, acrylamide and itaconic acid: investigation of their antibacterial activity against gram-negative bacteria. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(2): 509-518.

Bashir, S.; Hina, M.; Iqbal, J.; Rajpar, A.; Mujtaba, M.; Alghamdi, N.; Wageh, S.; Ramesh, K. y Ramesh, S. 2020. Conceptos fundamentales de los hidrogeles: síntesis, propiedades y sus aplicaciones. *Polímeros*, 12(11): 2702.

Bauer, A.; Kirby, W.; Sherris, J. y Turck, M. 1966. Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal of Clinical Pathology*, 45(4): 493-496.

Bayda, S.; Adeel, M.; Tuccinardi, T.; Cordani, M. y Rizzolio, F. 2019. The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical-Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules*, 25(1):112.

Bellingeri, R.; Mulko, L.; Molina, M.; Picco, N.; Alustiza, F.; Grosso, C.; Vivas, A.; Acevedo, D. y Barbero, C. 2018. Nanocompósitos basados en hidrogeles sensibles al pH y nanotubos de carbono decorados con quitosano con propiedades antibacterianas. *Materials science and engineering: C*, 90: 461-467.

Benítez, J.; Contreras, D.; Guzmán, P.; Ramírez, A.; Prin, J. y Gásque, B. 2011. Estudio de la difusión y cinética de hinchamiento en hidrogeles de poliacrilamida. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(6): 296-297.

Benítez, J. 2019. Diseño de hidrogeles como herramienta para la absorción de metales

presentes en aguas residuales y fuentes hidrotermales, Tesis Doctorado. Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad de Oriente, Cumaná.

Boehm, H. 1966. Chemical identification of Surface Groups. In: advances in catalysis, academic press, London, 179-274.

Bucarito, J.; Fuentes, M.; Prin, J.; García, A.; Rojas, L.; Barrios, E. y Rojas, B. 2014. Síntesis y uso de hidrogeles de poliacrilamida para la evaluación de metales biodisponibles en aguas intersticiales de los sedimentos del golfo de Cariaco (Venezuela). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(1): 7-20.

Bustamante, M.; Romero, D.; Arcentales, B.; Palomino, K.; Magaña, H. y Bucio, E. 2021. Hydrogels Classification According to the Physical or Chemical Interactions and as Stimuli-Sensitive Materials. *Gels*, 7(4): 182.

Cabello, C.; Sáenz, A.; López, L.; Pérez, C.; Ávila, C. y Valdez, J. 2012. Alternativas para la funcionalización de NTC's. Aplicación en nanomateriales poliméricos. *Afinidad LXIX*, 558.

Castillo, J.; Novoa, L.; Martínez, F. y Rivero, P. 2011. Carbon nanotubes-chitosan in HOS and THP-1 cells. *Revista de la Universidad Industrial de Santander*, 43: 21-26.

Chai, Q.; Jiao, Y. y Yu, X. 2017. Hydrogels for Biomedical Applications: Their Characteristics and the Mechanisms behind Them. *Gels*, 3(1): 6-15.

Cortés, J.; Puig, J.; Morales, J. y Mendizábal, E. 2011. Hidrogeles nanoestructurados termosensibles sintetizados mediante polimerización en microemulsión inversa. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3): 513-520.

Daudon, M.; Dessombz, A.; Frochot, V.; Letavernier, E.; Haymann, J.; Jungers, P. y Bazin, D. 2016. Comprehensive morpho-constitutional analysis of urinary stones improves etiological diagnosis and therapeutic strategy of nephrolithiasis. *Comptes Rendus Chimie*, 19(11-12): 1470-1491.

Devaux, X.; Vigolo, B.; McRae, E.; Valsaque, F.; Allali, N.; Mamane, V.; Fort, Y.; Soldatov, V.; Dossot, M. y Tsareva, Y. 2015. Covalent functionalization of hiPco single-walled carbon nanotubes: differences in the oxidizing action of H₂SO₄ and HNO₃ during a soft oxidation process. *Chemistry Physics Chemistry*, 16(12): 2692-2701.

Eatemadi, A.; Darvishi, B.; Zarandi, P.; Shaabani, A. y Hamzeh, M. 2022. Carbon nanotubes: synthesis, properties, and applications. *Nanoscale research letters*, 17(1): 1-20.

Ferreira, F.; Franceschi, W.; Menezes, B.; Biagioni, A.; Coutinho, A. y Cividanes, L. 2019. Synthesis, characterization, and applications of carbon nanotubes, *Elsevier*,

Yaragalla, S.; Mishra, R.; Thomas, S.; Kalarikkal, N.; Maria, H. (Eds). *Carbon-based nanofillers and their rubber nanocomposites*. 1-45.

García, M.; Pérez, L. y Rodríguez, A. 2022. Avances en la polimerización de acrilamida para la síntesis de hidrogeles. *Revista de Química Aplicada*, 45(2): 123-135.

Girei, S.; Thomas, S.; Atieh, M.; Mezghani, K.; De, S.; Bandyopadhyay, S. y Juhani, A. 2012. Effect of –COOH functionalized carbon nanotubes on mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of polypropylene nanocomposites. *Journal of thermoplastic composite materials*, 25(3): 333-350.

Gómez, R. 2018. Modificación de nanotubos de carbono de pared múltiple con ácidos mono, di y tripróticos para su posible dispersión en solventes polares y no polares. Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná.

González, G. 2010. Caracterización de nanotubos de carbono recubiertos con nanohidroxiapatita. En De Jonge, N.; Lamy, Y.; Kaiser, M. y Letters, N. (Eds), *Acta Microscópica* (Segunda ed); 19(2): 196–201).

González, N.; Prin, J.; Benítez, J.; Ramírez, A.; García, A.; Ramirez, M.; Sabino, M. y Rojas, Blanca. 2012. Estudio de la cinética de difusión en hidrogeles sintetizados a partir de acrilamida-co-ácido acrílico con turba y almidón vía calentamiento convencional y bajo radiación microondas. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1): 136-144.

Gonzaga, T. 2022. Hidrogeles de poliacrilamida y nanomateriales de carbono funcionalizados para la adsorción de colorantes catiónicos. Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Gutiérrez, R. 2016. El efecto de los nanotubos de carbono funcionalizados y su polimerización con poli-ácido cítrico en contacto con células madre mesenquimales in vitro. Trabajo para ascender a la categoría de Maestro de Ciencias de la ingeniería. Universidad Iberoamericana, México.

Gutiérrez, S. y Navarro, J. 2020. Hidrogeles - nanocompósitos con actividad antimicrobiana. Trabajo de grado. Departamento de ciencias de la salud, Universidad de Talca, Chile.

Hernández, J. 2020. Estudio de hidrogeles de poli(acrilamida-co-ácido acrílico) y quitosano cargados con pesticida. Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná.

Ho, T.; Chang, C.; Chan, H.; Chung, T.; Shu, C.; Chuang, K.; Duh, T.; Yang, M. y Tyan, Y. 2022. Hydrogels: Properties and Applications in Biomedicine. *Molecules*, 27(9): 2902.

Hooijdonk, E.; Bittencourt, C.; Snyders, R. y Colomer, J. 2013. Functionalization of vertically aligned carbon nanotubes. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 4: 129-152.

Iijima, S. 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354: 56-58.

Kennepohl, D. y Farmer, S. 2022. “Condensación de ácidos con aminas”. “LibreTexts”. <<https://espanol.libretexts.org/@go/page/76900>> (13/09/2023).

Kuila, T.; Bose, S.; Mishra, A.; Khanra, P.; Kim, N. y Lee, J. 2012. Chemical functionalization of graphene and its applications. *Progress in Materials Science*, 57:1061- 1105.

Li, Z.; Tang, M.; Dai, J.; Wang, T. y Bai, R. 2016. Effect of multiwalled carbon nanotube-grafted polymer brushes on the mechanical and swelling properties of polyacrylamide composite hydrogels. *Polymer*, 85: 67-76.

Liu, Z.; Yang, Z. y Luo, Y. 2012. Swelling, pH sensitivity, and mechanical properties of poly(acrylamide-co-sodium methacrylate) nanocomposite hydrogels impregnated with carboxyl-functionalized carbon nanotubes. *Polymer Composites*, 33: 665–674.

Liu, H.; Shukla, S.; Vera, N.; Tharmalingam, N.; Mylonakis, E.; Burgwyn, B. y Shukla, A. 2019. Auranofin releasing antibacterial and antibiofilm polyurethane intravascular catheter coatings. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 9: 37.

Liu, Y.; Li, Q.; Wang, H.; Zhang, J. y Chen, W. 2021. Enhanced adsorption of heavy metal ions by oxidized carbon nanotubes: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 416: 125801.

Liu, Y.; Zhang, Y.; Wang, L. y Chen, H. 2022. Recent advances in functionalization of carbon nanotubes for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 132: 112526.

Mago, J. 2022. Estudio de hidrogeles de poli(acrilamida-co-ácido acrílico) sintetizados en etanol para potenciales aplicaciones en el sector biomédico. Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná.

Manzetti, S. y Andersen, O. 2012. Aspectos toxicológicos de los nanomateriales utilizados en la electrónica de consumo para la recolección de energía. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4): 2102-2110.

Mason, T. 2016. Practical sonochemistry: power ultrasound uses in chemistry and processing. Primera edición. Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK.

Menor, C. 2019. SDS-PAGE: Electroforesis en gel de poliacrilamida. *Chemistry Evolution*. 2.

Meredith, J.; Jin, C.; Narayan, R. y Aggarwal, R. 2013. Biomedical applications of carbon-nanotube composites. *Front Biosci (Elite Ed)*, 5(2): 610-21.

Mohan, Y.; Vimala, K.; Thomas, V.; Varaprasad, K.; Sreedhar, B.; Bajpai, S. y Raju, K. 2010. Controlling of silver nanoparticles structure by hidrogel networks. *Journal of Colloid and Interface Science*, 342(1): 73-82.

Novoselov, K.; Mishchenko, A.; Carvalho, A. y Neto, A. 2016. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*, 353: 6298.

Paliwal, S.; Giorgio, A.; Neil, D.; Michel, J. y Lacoste, A. 2020. Preclinical validation of therapeutic targets predicted by tensor factorization on heterogeneous graphs. *Scientific Reports*, 10: 18250.

Priya, A.; Premanand, R.; Ragupathi, I.; Bhaviripudi, V.; Aepuru, R.; Kannan, K. y Shanmugaraj, K. 2024. Comprehensive review of hydrogel synthesis, characterization, and emerging applications. *Journal of Composites Science*, 8(11): 457.

Ponnamma, D.; Sadasivuni, K.; Grohens, Y.; Gu, Q. y Thomas, S. 2014. Carbon nanotube based elastomer composites-an approach towards multifunctional materials. *Journal of Materials Chemistry C*, 2: 8446-8485.

Ramírez A., Benítez J., Contreras D., Guzmán P. y Rojas, B. 2011. Interacciones de hidrogeles de poli(acrilamida-co-ácido itacónico) estudiadas en soluciones de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(6): 308-316.

Ramírez, A.; Contreras, D.; Prin, L. y Rojas, B. 2013. Entrecruzamientos iónicos en hidrogeles de poli (acrilamida-co-ácido itacónico) postulados a partir del análisis de su morfología y de su cinética de absorción. *Acta Microscópica*, 22(2): 205-209.

Ramírez, A.; Benítez, J.; Rojas, L. y Rojas, B. 2016. Materiales polímeros de tipo hidrogeles: revisión sobre su caracterización mediante flir, dsc, meb y met. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2): 108-130.

Rathinavel, S.; Priyadharshini, K. y Panda, D. 2021. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. *Materials Science and Engineering: B*, 268: 115095.

Rojas, B.; Ramírez, M.; Prin, J.; Torres, C.; Bejarano, L.; Villaroel, H.; Rojas, L.; Murillo, M. y Katime, I. 2010. Hidrogeles de acrilamida/ácido acrílico y de acrilamida/poli(ácido acrílico): estudio de su capacidad de remediación en efluentes industriales. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 30(1): 28-39.

Rotaru, A.; Pricope, G.; Plank, T.; Clima, L.; Ursu, E.; Pinteala, M.; Davis, J. y Barboiu, M. 2017. G-Quartet hydrogels for effective cell growth applications. *Chemical*

communications, 53: 12668–12671.

Ruangpomvisuti, V. 2010. Molecular modeling of dissociative and non-dissociative chemisorption of nitrosamine on close-ended and open-ended pristine and Stone-Wales defective (5,5) armchair single-walled carbon nanotubes. *Journal of Molecular Modeling*, 16(6): 1127-1138.

Sáenz, A.; Rodríguez, K.; Rubio, W.; Barajas, L.; Ramírez, L, Ávila, C y Jiménez, R. 2016. Modificación superficial asistida con energía ultrasónica de nanotubos de carbono con ácido maléico, ácido malónico y ácido tartár. *Avances en Química*, 11(1): 47-52.

Sánchez, J.; Fuentes, R.; Galindo, I.; Martínez, A y Velasco, C. 2013. Análisis de la modificación superficial de los nanotubos de carbono sometidos a distintos tratamientos de oxidación. *Acta universitaria*, 23(1): 17-22.

De Souza, M.; Gil, Y.; Ramírez, A.; Prin, J.; Guzmán, P.; Otero, B.; Rodríguez, C.; Katime, I. y Gáscue, B. 2014. Hidrogeles de poli(acrilamida): evaluación de su comportamiento en fluido fisiológico simulado (sbf). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 15(4): 198-210.

Suslick, K. (ed). 2020. *Sonochemistry and sonoluminescence*. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, Usa.

Schott, H. 1992. Cinética de hinchamiento de polímeros. *Journal of Macromolecular Science, Parte B* , 31(1): 1-9.

Smith, M. y March, J. 2020. March's advanced organic chemistry: reactions, mechanisms, and structure. Octava edición. John Wiley & Sons.

Smith, A. y Johnson, C. 2023. Biocompatibilidad y estabilidad de hidrogeles de poliacrilamida para aplicaciones biomédicas. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 111(5): 1234-1245.

Syduzzaman, M.; Islam, M.; Fuad, M.; Ahmed, T.; Tajwar, T. y Mamun, N. 2024. Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry. *Results in Materials*, 25: 100654.

Wensheng, C. y Ram, G. 2012. «Hydrogels». *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.

Zerpa, M. 2017. Estudio del efecto estructural del comonomero ácido en hidrogeles copolímeros a base de acrilamida sobre la capacidad absorbente de iones Mg^{2+} , Co^{2+} y Ni^{2+} . Trabajo de grado. Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Datos de hinchamiento de hidrogeles

Tabla A1. Datos de hinchamiento en agua desionizada del hidrogel de PAAm

t (min)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)				
0	0,0943	0,1002	0,1006	240	0,6995	0,6877	0,6914
5	0,1552	0,1546	0,1595	270	0,7243	0,7189	0,7243
10	0,1761	0,1774	0,1790	300	0,7509	0,7497	0,7554
15	0,1945	0,1925	0,1951	330	0,7719	0,7771	0,7818
20	0,2151	0,2123	0,2151	360	0,7920	0,8031	0,8094
25	0,2280	0,2250	0,2273	1470	0,9203	1,0349	1,0347
30	0,2448	0,2367	0,2387	1510	0,9224	1,0360	1,0352
35	0,2631	0,2491	0,2524	1550	0,9195	1,0371	1,0367
40	0,2819	0,2644	0,2703	1590	0,9191	1,0391	1,0394
45	0,3038	0,2828	0,2873	1630	0,9167	1,0385	1,0374
50	0,3211	0,2988	0,3048	1670	0,9200	1,0393	1,0365
55	0,3359	0,3145	0,3196	1710	0,9208	1,0420	1,0381
60	0,3618	0,3369	0,3417	1750	0,9227	1,0423	1,0406
70	0,3749	0,3486	0,3528	1790	0,9223	1,0416	1,0413
80	0,4047	0,3759	0,3820	2930	0,9209	1,0498	1,0451
90	0,4328	0,4047	0,4120	2980	0,9205	1,0479	1,0463
100	0,4613	0,4295	0,4381	3030	0,9207	1,0470	1,0442
				3080	0,9194	1,0469	1,0436

110	0,5040	0,4744	0,4792
120	0,5252	0,4962	0,5010
130	0,5445	0,5172	0,5227
140	0,5641	0,5368	0,5421
150	0,5818	0,5550	0,5604
160	0,5970	0,5741	0,5802
170	0,6111	0,5867	0,5914
180	0,6258	0,6049	0,6095
200	0,6546	0,6354	0,6397
220	0,6766	0,6609	0,6662

3130	0,9213	1,0462	1,0437
3180	0,9206	1,0489	1,0467
3230	0,9209	1,0480	1,0466
3280	0,9215	1,0481	1,0465
4430	0,9212	1,0478	1,0450
4490	0,9204	1,0491	1,0459
4550	0,9227	1,0468	1,0454
4610	0,9199	1,0449	1,0423
8790	0,9210	1,0472	1,0453
8910	0,9150	1,0486	1,0438

Tabla A2. Datos de hinchamiento en agua desionizada del hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,75/0,25).

t (min)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)
0	0,1006	0,0983	0,1000
5	0,1500	0,1523	0,1558
10	0,1727	0,1741	0,1818
15	0,1912	0,1939	0,1986
20	0,2081	0,2086	0,2159
25	0,2215	0,2250	0,2320
30	0,2367	0,2398	0,2475
35	0,2504	0,2557	0,2581
40	0,2616	0,2652	0,2739
45	0,2737	0,2838	0,2963
50	0,2927	0,3001	0,3112
55	0,3120	0,3230	0,3255
60	0,3266	0,3358	0,3396
70	0,3538	0,3623	0,3720
80	0,3798	0,3925	0,4022
90	0,4032	0,4206	0,4209
100	0,4253	0,4397	0,4511
110	0,4464	0,4619	0,4747
120	0,4705	0,4857	0,4924

270	0,7170	0,7345	0,7329
300	0,7513	0,7617	0,7718
330	0,7813	0,7967	0,7986
360	0,8124	0,8226	0,8279
1346	1,1495	1,1361	1,1325
1386	1,1503	1,1368	1,1251
1426	1,1571	1,1360	1,1206
1466	1,1533	1,1335	1,1205
1506	1,1532	1,1363	1,1180
1546	1,1597	1,1398	1,1224
1586	1,1597	1,1415	1,1247
1626	1,1636	1,1445	1,1249
1666	1,1691	1,1432	1,1267
1706	1,1676	1,1480	1,1289
2790	1,1921	1,1635	1,1463
2840	1,1881	1,1632	1,1442
2890	1,1884	1,1592	1,1422
2940	1,1881	1,1602	1,1407
2990	1,1915	1,1584	1,1400
3040	1,1880	1,1578	1,1453

130	0,4922	0,5098	0,5205
140	0,5117	0,5263	0,5375
150	0,5320	0,5481	0,5531
160	0,5500	0,5714	0,5748
170	0,5679	0,5851	0,5923
180	0,5836	0,5982	0,6065
200	0,6173	0,6408	0,6411
220	0,6471	0,6646	0,6670
240	0,6741	0,6872	0,6950

3090	1,1865	1,1600	1,1416
3140	1,1895	1,1583	1,1422
4290	1,1937	1,1639	1,1444
4350	1,1916	1,1631	1,1455
4410	1,1882	1,1629	1,1447
4470	1,1896	1,1627	1,1460
8550	1,1950	1,1664	1,1453
8670	1,1919	1,1627	1,1438

Tabla A3. Datos de hinchamiento en agua desionizada del hidrogel de PAAm-MWCNT-f(99,85/0,15).

t (min)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)
0	0,1004	0,1002	0,1005
5	0,1567	0,1820	0,2364
10	0,1835	0,2155	0,2702
15	0,2039	0,2427	0,2997
20	0,2242	0,2670	0,3256
25	0,2424	0,2941	0,3527
30	0,2570	0,3178	0,3748
35	0,2748	0,3367	0,3964
40	0,2942	0,3570	0,4195
45	0,3154	0,3787	0,4370
50	0,3350	0,3957	0,4557
55	0,3535	0,4153	0,4739
60	0,3734	0,4300	0,4871
70	0,4102	0,4617	0,5223
80	0,4420	0,4922	0,5510
90	0,4760	0,5203	0,5826
100	0,5032	0,5460	0,6059
110	0,5293	0,5692	0,6316
120	0,5556	0,5939	0,6546
240	0,7691	0,7940	0,8587
270	0,8098	0,8292	0,8933
300	0,8407	0,8583	0,9256
330	0,8713	0,8879	0,9512
360	0,8945	0,9093	0,9761
1410	1,1121	1,1115	1,1557
1450	1,1141	1,1116	1,1583
1490	1,1173	1,1143	1,1667
1530	1,1191	1,1146	1,1755
1570	1,1196	1,1136	1,1776
1610	1,1209	1,1145	1,1770
1650	1,1190	1,1173	1,1765
1690	1,1171	1,1178	1,1760
1730	1,1153	1,1182	1,1754
2785	1,1216	1,1207	1,1712
2835	1,1198	1,1154	1,1690
2885	1,1212	1,1180	1,1669
2935	1,1183	1,1163	1,1662
2985	1,1208	1,1170	1,1670
3035	1,1189	1,1167	1,1651

130	0,5778	0,6154	0,6782
140	0,6001	0,6351	0,6971
150	0,6225	0,6553	0,7178
160	0,6412	0,6734	0,7358
170	0,6634	0,6893	0,7544
180	0,6783	0,7089	0,7724
200	0,7113	0,7375	0,8028
220	0,7429	0,7673	0,8316

3085	1,1189	1,1190	1,1720
3135	1,1182	1,1189	1,1667
4270	1,1188	1,1185	1,1665
4330	1,1166	1,1190	1,1684
4390	1,1189	1,1171	1,1645
4450	1,1213	1,1159	1,1647
8653	1,1235	1,1251	1,1694
8773	1,1200	1,1215	1,1712

Tabla A4. Datos de hinchamiento en agua desionizada del hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,95/0,05).

t (min)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)
0	0,1004	0,1003	0,1005
5	0,1974	0,2174	0,2054
10	0,2286	0,2486	0,2351
15	0,2563	0,2757	0,2622
20	0,2800	0,2995	0,2834
25	0,3031	0,3249	0,3087
30	0,3228	0,3469	0,3291
35	0,3429	0,3676	0,3478
40	0,3613	0,3857	0,3660
45	0,3806	0,4040	0,3847
50	0,3956	0,4215	0,3994
55	0,4126	0,4375	0,4159
60	0,4259	0,4528	0,4333
70	0,4580	0,4849	0,4637
80	0,4866	0,5152	0,4901
90	0,5130	0,5382	0,5159
100	0,5364	0,5613	0,5398
110	0,5580	0,5842	0,5617
120	0,5834	0,6066	0,5845

240	0,7778	0,8059	0,7780
270	0,8162	0,8391	0,8126
300	0,8460	0,8707	0,8435
330	0,8732	0,8988	0,8723
360	0,8975	0,9230	0,8995
1410	1,1681	1,1735	1,1608
1450	1,1701	1,1750	1,1616
1490	1,1693	1,1797	1,1666
1530	1,1725	1,1776	1,1661
1570	1,1744	1,1835	1,1698
1610	1,1750	1,1842	1,1721
1650	1,1758	1,1826	1,1682
1690	1,1771	1,1829	1,1684
1730	1,1830	1,1832	1,1686
2785	1,1832	1,1896	1,1802
2835	1,1825	1,1840	1,1812
2885	1,1838	1,1846	1,1764
2935	1,1833	1,1833	1,1774
2985	1,1805	1,1845	1,1754
3035	1,1798	1,1843	1,1740

130	0,6011	0,6278	0,6045
140	0,6218	0,6479	0,6286
150	0,6400	0,6651	0,6431
160	0,6592	0,6839	0,6614
170	0,6758	0,7032	0,6776
180	0,6902	0,7195	0,6936
200	0,7247	0,7488	0,7237
220	0,7517	0,7767	0,7516

3085	1,1791	1,1833	1,1742
3135	1,1811	1,1841	1,1787
4270	1,1814	1,1844	1,1790
4330	1,1810	1,1837	1,1774
4390	1,1800	1,1835	1,1775
4450	1,1804	1,1849	1,1751
8653	1,1857	1,1853	1,1844
8773	1,1845	1,1838	1,1810

Tabla A5. Datos de hinchamiento en agua desionizada del hidrogel de PAAm-MWCNT-f/Ag (99,75/0,25).

t (min)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)
0	0,0996	0,0999	0,1001
5	0,1480	0,1485	0,1497
10	0,1680	0,1672	0,1674
15	0,1873	0,1901	0,1815
20	0,2031	0,2034	0,1964
25	0,2242	0,2237	0,2094
30	0,2381	0,2355	0,2233
35	0,2615	0,2519	0,2347
40	0,2731	0,2694	0,2498
45	0,2855	0,2804	0,2593
50	0,3005	0,2942	0,2720
55	0,3135	0,3075	0,2870
60	0,3280	0,3212	0,3015
70	0,3545	0,3476	0,3271
80	0,3812	0,3681	0,3575
90	0,4017	0,3893	0,3851
180	0,5460	0,5322	0,5901
200	0,5678	0,5536	0,6243
220	0,5891	0,5739	0,6562

240	0,6072	0,5932	0,6879
270	0,6322	0,6180	0,7277
300	0,6542	0,6394	0,7640
2880	0,8198	0,8125	1,0838
2930	0,8211	0,8121	1,0839
2980	0,8177	0,8136	1,0818
3030	0,8204	0,8126	1,0824
3080	0,8195	0,8124	1,0806
4295	0,8184	0,8208	1,0828
4355	0,8217	0,8159	1,0827
8615	0,8220	0,8183	1,0840
8735	0,8210	0,8173	1,0839

Cálculos del índice de hinchamiento ($\%H$) y del porcentaje de agua ($\%W$) absorbido por los hidrogeles en agua desionizada con las masas de los hidrogeles obtenidos a diferentes intervalos de tiempo, el $\%H$ y $\%W$ se obtuvo a través de las Ecuaciones 3 y 4:

t (min)	m_1 (g)
0	0,1006
5	0,1500

$$\%H = \left(\frac{m_t - m_o}{m_o} \right) \times 100$$

$$\%W = \left(\frac{m_t - m_o}{m_t} \right) \times 100$$

Donde m_0 y m_t son las masas del hidrogel seco (xerogel) e hidrogel hinchado en el tiempo t , respectivamente.

Utilizando los datos de la tabla A2 (Disco 1). Para un $t = 5$ min del hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,85/0,25):

$$\%H = \left(\frac{0,1500 - 0,1006}{0,1006} \right) \times 100$$

$$\%H = 49,1054$$

$$\%W = \left(\frac{0,1500 - 0,1006}{0,1500} \right) \times 100$$

$$\%H = 32,9333$$

Los cálculos se realizaron de igual manera para todos los datos de las tablas A1 hasta A5.

APÉNDICE B. Curvas de hinchamiento de los hidrogeles en estudio

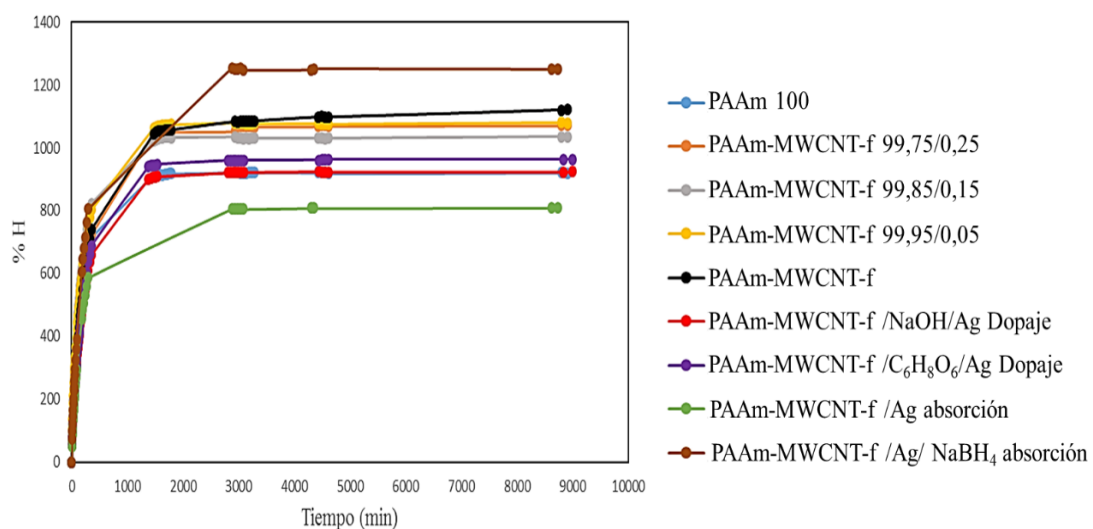


Figura B1. Isotermas de absorción de los hidrogeles de Poliacrilamida (PAAm) y los nanocompuestos (AAM-X) sumergidos en agua desionizada en sus diferentes condiciones de reacción. X: MWCNT

APÉNDICE C. Ajuste por la ecuación de Schott

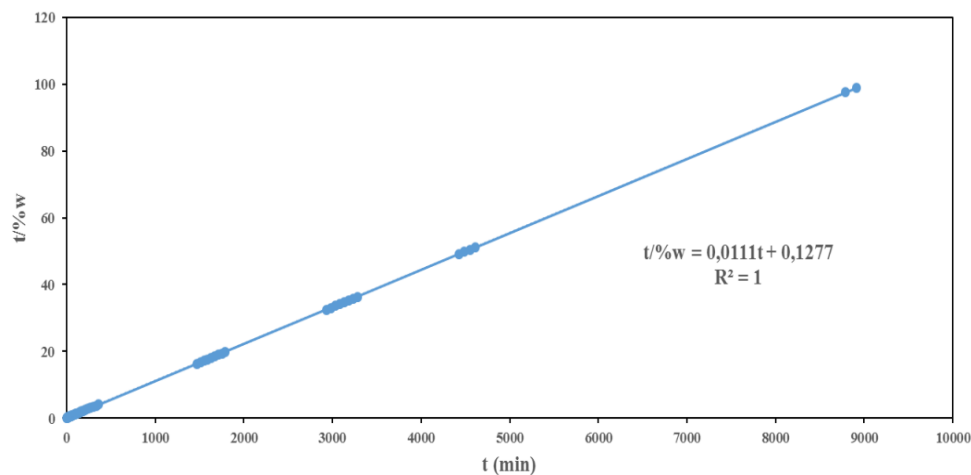


Figura C1. Regresión lineal de las isotermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden, de un hidrogel de poli(AAm) sintetizado en agua desionizada.

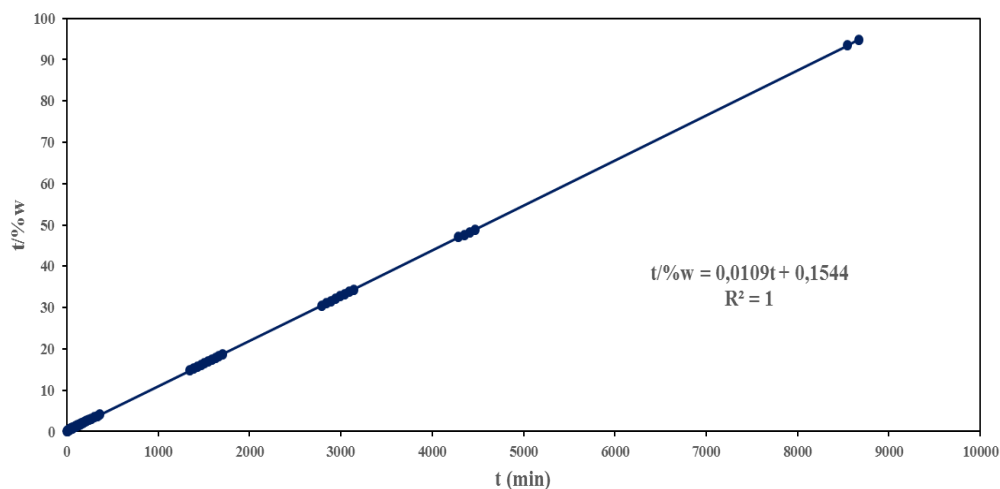


Figura C2. Regresión lineal de las isotermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden, de un hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,75/0,25) sintetizado en agua desionizada.

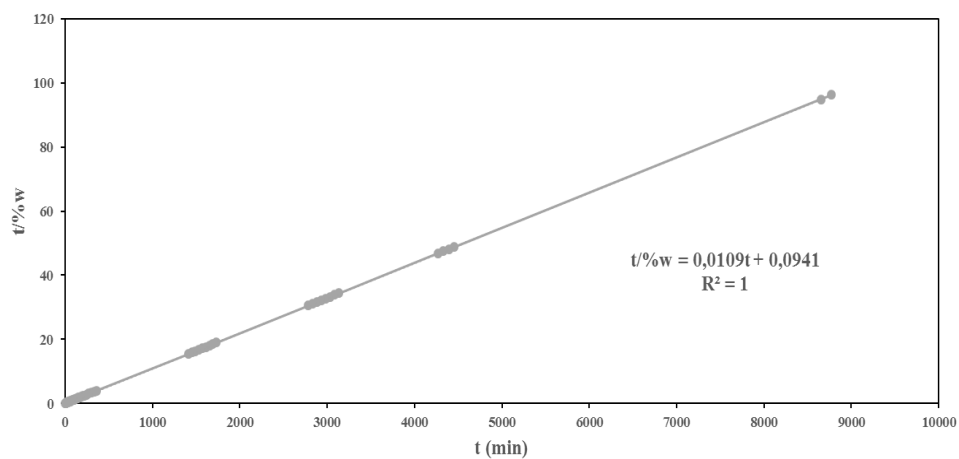


Figura C3. Regresión lineal de las isothermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden, de un hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,85/0,15) sintetizado en agua desionizada.

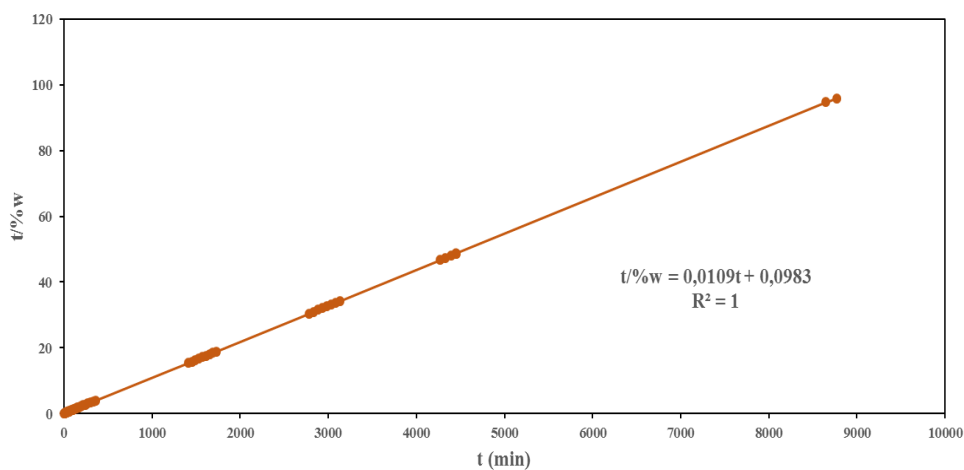


Figura C4. Regresión lineal de las isothermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden, de un hidrogel de PAAm-MWCNT-f (99,95/0,05) sintetizado en agua desionizada.

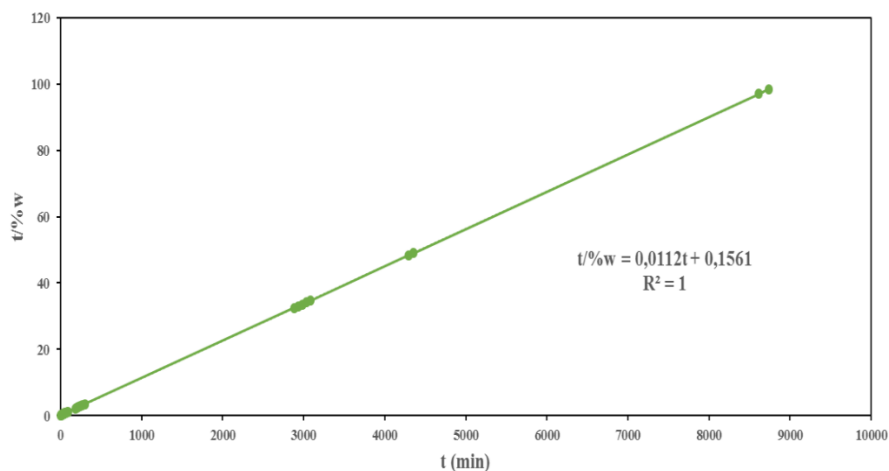


Figura C5. Regresión lineal de las isotermas de hinchamiento, de acuerdo con la cinética de segundo orden, de un hidrogel de PAAm-MWCNT-f/Ag (99,75/0,25) sintetizado en agua desionizada.

Se procedió a realizar el ajuste propuesto por Schott empleando la Ecuación 5. Con los valores obtenidos en cada isoterma de hinchamiento realizado por triplicado, fue posible obtener los valores de $\%W_{\infty}$ y k_h de la siguiente forma:

A partir de la regresión lineal el porcentaje de agua absorbido ($\%W_{\infty}$) en el equilibrio, se calculó a partir del valor de la pendiente:

donde $m = 0,0111$ para un $t = 1$

$$\%W_{\infty} = \left(\frac{1}{m} \right)$$

$$\%W_{\infty} = \left(\frac{1}{0,0111} \right) = 90,090$$

La constante de velocidad de hinchamiento (k_h), se determinó utilizando el valor del intercepto de la recta:

Donde:

$$b = \left(\frac{1}{k_h W_{\infty}^2} \right) \quad k_h = \left(\frac{1}{0,1277 \times 8116,208} \right) = 0,96 \times 10^{-3}$$

APÉNDICE D. Resultados obtenidos para la determinación del %COOH presente en los MWCNT-f

Tabla D1. Datos obtenidos mediante titulación potenciométrica para la determinación de la concentración real de NaOH con $\text{KC}_8\text{H}_5\text{O}_4$

V_{NaOH} (ml)	pH	21	5,53
0	4,08	22	5,60
1	4,20	23	5,69
2	4,25	24	5,77
3	4,34	25	5,88
4	4,40	26	6,02
5	4,49	27	6,24
6	4,57	28	6,55
7	4,65	29	7,51
8	4,71	30	10,15
9	4,78	31	10,99
10	4,84	33	11,42
11	4,91	34	11,53
12	4,96	35	11,66
13	5,02	36	11,71
14	5,08	37	11,76
		38	11,80

15	5,14
16	5,20
17	5,25
18	5,31
19	5,39
20	5,46

39	11,84
40	11,87
45	11,99
50	12,07

Tabla D2. Datos obtenidos mediante titulación potenciométrica para la determinación de la concentración real de HCl con Na_2CO_3

$V_{\text{HCl}} \text{ (ml)}$	pH
0	11,15
1	10,98
2	10,93
3	10,79
4	10,66
5	10,55
10	10,25
15	9,94
20	9,65
25	9,21
30	8,39
31	7,97
32	7,75
33	7,63
34	7,52
35	7,45
36	7,41
38	7,25
40	7,07

42	7,06
44	7,02
46	6,83
47	6,75
48	6,74
49	6,72
50	6,67
52	6,51
54	6,30
55	6,18
56	5,95
57	5,70
58	4,18
59	3,04
60	2,72

Tabla D3. Datos obtenidos mediante titulación potenciométrica para la determinación de la acidez del NaOH con HCl (Blanco).

$V_{\text{HCl (1)}} \text{ (ml)}$	pH	$V_{\text{HCl (2)}} \text{ (ml)}$	pH
0,0	13,09	0,0	12,12
1,0	12,95	1,0	12,11
2,0	12,90	2,0	12,06
3,0	12,89	3,0	12,03
4,0	12,85	4,0	12,00
5,0	12,81	5,0	11,97
6,0	12,74	6,0	11,89
7,0	12,68	7,0	11,85
8,0	12,56	8,0	11,73
9,0	12,46	9,0	11,64
10,0	12,32	10,0	11,50
11,0	12,14	11,0	11,23
12,0	11,84	12,0	10,80
12,5	11,53	12,5	10,40
13,0	11,17	13,0	9,90
13,5	10,59	13,5	9,52
14,0	10,08	14,0	8,17
14,5	8,50	14,5	7,33
15,0	7,88	15,0	5,95

15,5	6,75	15,5	3,08
16,0	3,86	16,0	2,70
16,5	3,38	16,5	2,44
17,0	3,20	17,0	2,36
18,0	2,97	18,0	2,24
19,0	2,89	19,0	2,15
20,0	2,79	20,0	2,08

Tabla D4. Datos obtenidos mediante titulación potenciométrica para la determinación de la acidez superficial de MWCNT funcionalizados

$V_{\text{HCl (1)}} \text{ (ml)}$	pH	$V_{\text{HCl (2)}} \text{ (ml)}$	pH	$V_{\text{HCl (3)}} \text{ (ml)}$	pH
0,0	12,05	0,0	11,95	0,0	12,18
1,0	12,00	1,0	11,84	1,0	12,08
2,0	11,92	2,0	11,65	2,0	11,98
3,0	11,82	3,0	11,29	3,0	11,93
4,0	11,71	4,0	10,65	4,0	11,77
5,0	11,42	5,0	10,22	5,0	11,50

5,5	11,29	5,5	9,87	5,5	11,27
6,0	10,90	6,0	9,68	6,0	10,97
6,5	10,49	6,5	9,26	6,5	10,51
7,0	10,12	7,0	8,75	7,0	10,12
7,5	9,76	7,5	7,54	7,5	9,77
8,0	9,30	8,0	7,08	8,0	8,66
8,5	7,92	8,5	6,94	8,5	8,21
9,0	7,21	9,0	6,63	9,0	7,61
9,5	6,60	9,5	6,52	9,5	7,34
10,0	2,93	10,0	6,12	10,0	4,20
10,5	2,60	10,5	2,82	10,5	2,85
11,0	2,44	11,0	2,56	11,0	2,56
11,5	2,32	11,5	2,35	11,5	2,39
12,0	2,23	12,0	2,21	12,0	2,29
12,5	2,18	12,5	2,17	12,5	2,22
13,0	2,13	13,0	2,13	13,0	2,15
13,5	2,09	13,5	2,08	13,5	2,11
14,0	2,03	14,0	2,04	14,0	2,06
14,5	2,00	14,5	1,99	14,5	2,03
15,0	1,96	15,0	1,95	15,0	2,00

Las figuras D1-D4 muestran las curvas obtenidas en la titulación potenciométrica.

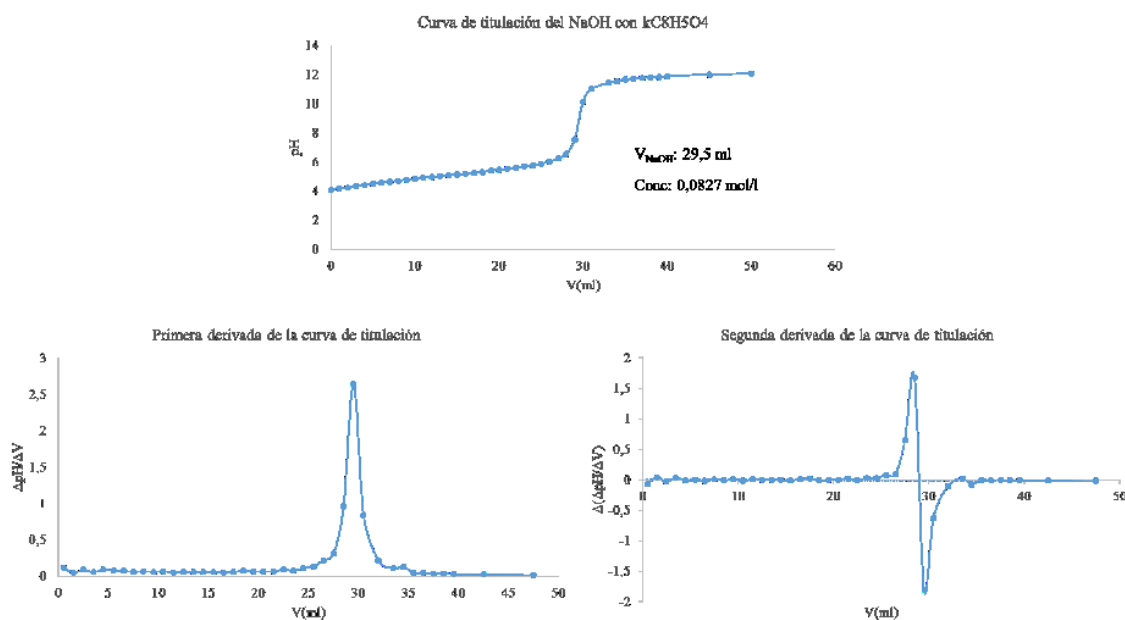


Figura D1. Determinación de la concentración real de NaOH mediante titulación potenciométrica con $\text{KC}_8\text{H}_5\text{O}_4$

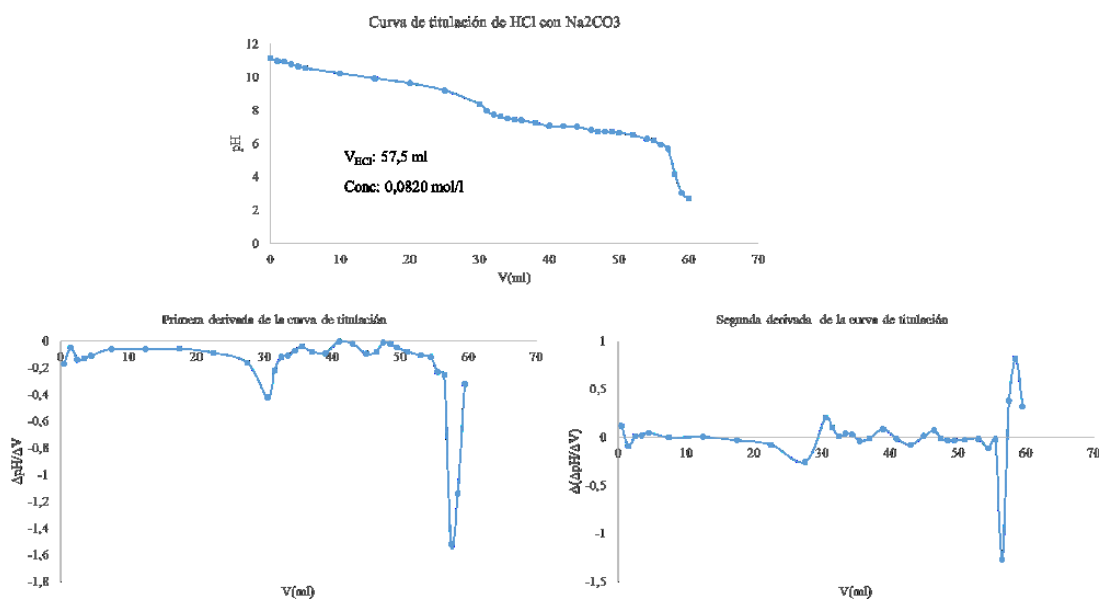


Figura D2. Determinación de la concentración real de HCl mediante titulación potenciométrica con Na_2CO_3

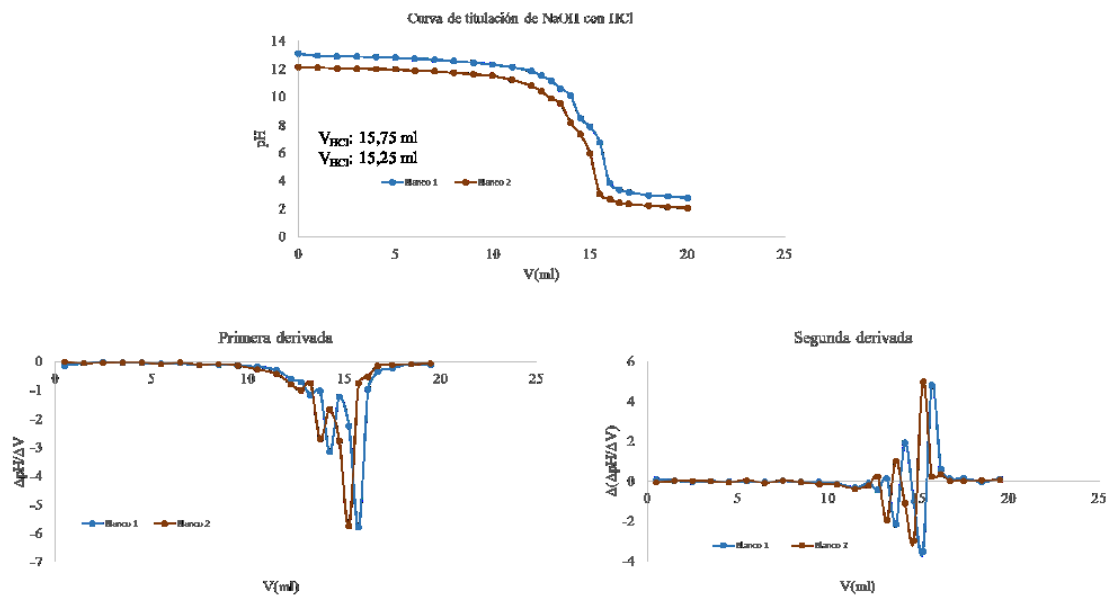


Figura D3. Curva de titulación potenciométrica de NaOH Vs HCl

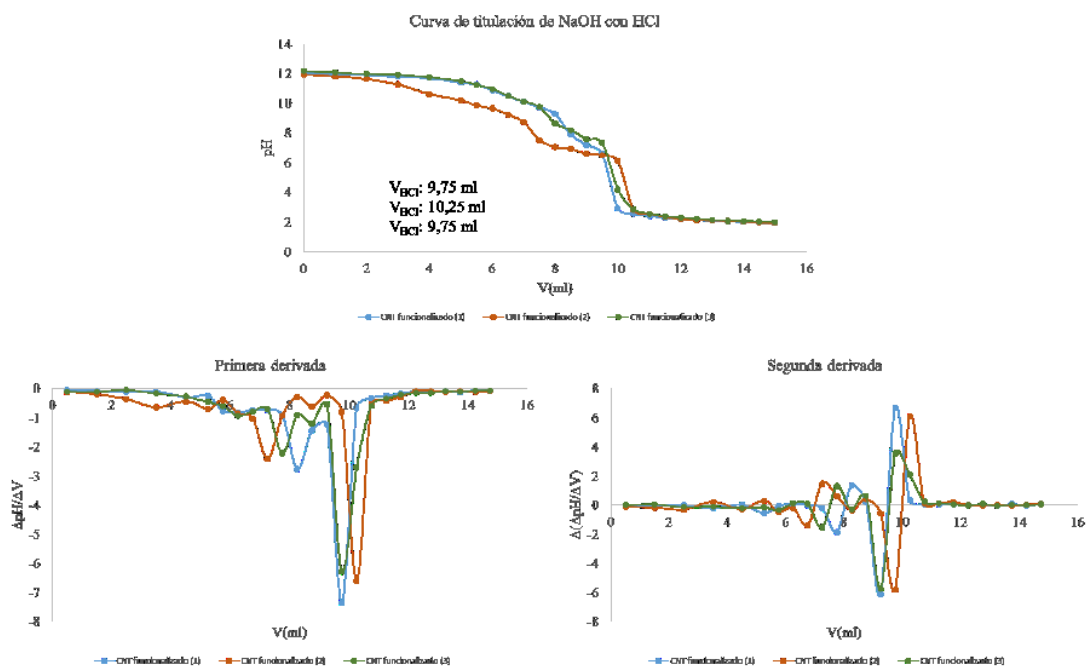


Figura D4. Determinación de la acidez superficial de MWCNT funcionalizados mediante titulación potenciométrica

Los datos de la tabla D4, y mediante la Ecuación 1, se utilizaron para calcular el $\text{Contenido}_{(\text{ácido})}$ en los MWCNT-f.

Para los MWCNT-f (Tabla D4):

$m(\text{g})$	$C_{\text{NaOH}} (\text{mol l}^{-1})$	$V_{\text{NaOH}} (\text{ml})$	$C_{\text{HCl}} (\text{mol l}^{-1})$	$V_{\text{HCl}} (\text{ml})$
0,0109	0,0827	15,00	0,0820	9,75

$$\text{Contenido}_{(\text{ácido})} = \frac{(C_{\text{NaOH}} \times V_{\text{NaOH}} - C_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}})}{m_{\text{MWCNT-f}}}$$

$$\text{Contenido}_{(\text{ácido})} = \frac{(0,0827 \times 15 - 0,0820 \times 9,75)}{0,0109}$$

$$\text{Contenido}_{(\text{ácido})} = 40,4587 \text{ mmol g}^{-1}$$

Estos cálculos se aplicaron de igual manera para todos los volúmenes obtenidos en el gráfico D4. Los resultados reportados son los valores promedio por triplicado.

HOJAS DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/6

Título	Obtención de nanocompuestos de hidrogeles de poliacrilamida/nanotubos de carbono, con posibles aplicaciones biomédicas
Subtítulo	

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código ORCID / e-mail	
Cova R. Marielis J.	ORCID	
	e-mail marielisrojas11@gmail.com	
	e-mail marieliscova11@gmail.com	
	ORCID	
	e-mail	
	e-mail	

Palabras o frases claves:

funcionalización
MWCNT
acrilamida,
grupos funcionales

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/6

Área	Subáreas
Ciencias	Química
Línea de Investigación: Hidrogeles-nano materiales	

Área o Línea de investigación: Hidrogeles

Resumen (abstract):

Los materiales nanocompuestos basados en hidrogeles podrían utilizarse para crear sensores biomédicos que puedan detectar enfermedades y trastornos en el cuerpo humano, debido a que son altamente sensibles a los cambios en el entorno, como la temperatura, el pH y la presión. Una de las vías para obtener estos materiales es mediante su combinación con nanotubos de carbono (NTC), sin embargo, estos presentan propiedades hidrofóbicas que limitan su dispersión en sistemas biológicos. En este sentido, la funcionalización de los NTC permite modificar su estructura, incorporando grupos funcionales que mejoran su dispersión en sistemas acuosos, lo que facilita su integración en matrices poliméricas. En este trabajo, se evaluó la incorporación de NTC funcionalizados (MWCNT-f) y nanopartículas de plata (Ag) en hidrogeles de poliacrilamida (PAAm). La caracterización mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) confirmó la presencia de grupos funcionales carboxílicos e hidróxidos en la superficie de los MWCNT-f, lo que indica una exitosa funcionalización. Además, la titulación ácido-base permitió cuantificar el contenido de grupos ácidos en los MWCNT-f. La incorporación de iones Ag^+ y MWCNT-f en la matriz de PAAm condujo a una disminución del grado de hinchamiento del hidrogel, atribuible a la formación de enlaces iónicos entre los iones Ag^+ y los grupos funcionales presentes en el polímero y los NTC. Por otro lado, se observó un aumento en la capacidad de retención de agua en los hidrogeles nanocompuestos de PAAm-MWCNT-f en comparación con el hidrogel de PAAm, lo que sugiere una mayor interacción entre los grupos funcionales de la PAAm y los grupos funcionales en los MWCNT-f. Los resultados de las pruebas antimicrobianas indican que los sistemas conformados por hidrogeles nanocompuestos cargados con plata, exhiben una actividad antibacteriana, característica no observada en los materiales nanocompuestos, lo que sugiere que dicha actividad se debe a la liberación de los iones Ag^+ .

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código ORCID / e-mail										
Benítez José L	ROL										
		CA		AS	X	TU		JU			
	ORCID	10951994									
	e-mail	benitezudo@gmail.com									
Mago A. Fernando J.	ROL										
		CA		AS		TU	X	JU			
	ORCID	11829463									
	e-mail	magofernandoa@gmail.com									
	ROL										
		CA		AS		TU		JU			
	ORCID										
	e-mail										
	e-mail										

Fecha de discusión y aprobación:

Año Mes Día

2025	03	12
-------------	-----------	-----------

Lenguaje: SPA

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo
NSUTTG_CRMJ2025.-DOC

Alcance:

Espacial: UNIVERSAL

Temporal: INTEMPORAL

Título o Grado asociado con el trabajo: Licenciatura en Química

Nivel Asociado con el Trabajo: Licenciatura

Área de Estudio: Química

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado: Universidad de Oriente

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

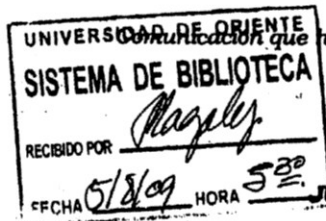
Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI – 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.



Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

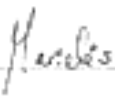
JUAN A. BOLANOS CUAPEL
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YGC/maruja

Artículo 41 del REGLAMENTO DE TRABAJO DE PREGRADO (vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009): “Los trabajos de grados son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y solo podrá ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Concejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Concejo Universitario, para su autorización”.



AUTOR



TUTOR