

Artículo

Fotocatálisis de rosa altamente eficiente impulsada por luz visible Producción de hidrógeno y tinte bengalí utilizando Ag@Cu/TiO₂ Nanocompuestos ternarios

Satish Yadav ¹, Asim Jilani ² , Sarika Sachan y ¹, Pramod Kumar ^{1,*}, Sajid Ali Ansari ³ , Mohamed Afzal ⁴
Mohammad Omaish Ansari ^{2,*} 

- ¹ Laboratorio de Materiales Funcionales, Departamento de Química Prof. Rajendra Singh (Rajju Bhaiya), Instituto de Ciencias Físicas para el Estudio y la Investigación, Universidad Veer Bahadur Singh Purvanchal, Jaunpur 222003, Uttar Pradesh, India; sarikasachan27aug@gmail.com (SS)
- ² Centro de Nanotecnología, Universidad Rey Abdulaziz, Jeddah 21589, Arabia Saudita; asim.jilane@gmail.com Departamento de Física,
- ³ Facultad de Ciencias, Universidad Rey Faisal, PO Box 400, Al-Ahsa 31982, Arabia Saudita; sansari@kfu.edu.sa
- ⁴ Departamento de Ciencias Farmacéuticas, Programa de Farmacia, Batterjee Medical College, PO Box 6231, Jeddah 21442, Arabia Saudita; mohammad.afzal@bmc.edu.sa
- * Correspondencia: pkchemistry.2009@gmail.com (PK); moansari@kau.edu.sa (MOA)

Resumen: En este trabajo, se sintetizó un nanocompuesto ternario Ag@Cu/TiO₂ mediante una metodología química simple y posteriormente se estudió para la degradación fotocatalítica del tinte rosa de bengala (RB) bajo luz visible, así como su producción de hidrógeno. La forma, el tamaño y el análisis topográfico mediante microscopía electrónica de barrido y transmisión revelaron que todos los constituyentes están bien intercalados y se encuentran en el rango nanométrico. El análisis de rayos X de energía dispersiva del Ag@Cu/TiO₂ mostró la presencia de Ti, O, Cu y Ag y la ausencia de otras impurezas, mientras que el análisis de mapeo mostró su distribución uniforme. La espectroscopia de fotones de rayos X también mostró una interacción exitosa entre los componentes. Además, se examinaron los cambios en el estado químico del Ti2p. Se encontró que la banda prohibida de Ag@Cu/TiO₂ utilizando las relaciones gráficas Tauc era la más baja con 2,86 eV en comparación con TiO₂ puro (3,28 eV), Ag/TiO₂ binario (3,13 eV) y Cu/TiO₂ (3,00 eV). El Ag@Cu/TiO₂ mostró la intensidad de fotoluminiscencia más baja, lo que sugiere la mayor eficiencia de degradación y la menor tasa de recombinación. La aplicación de Ag@Cu/TiO₂ hacia la degradación fotocatalítica del tinte RB exhibió una tasa de degradación de ~81,07%, que supera la eficiencia del TiO₂ puro en 3,31 veces. Aparte de esto, se encontró que la producción de H₂, lo que sugiere que el cobre y la plata contribuyeron de manera sinérgica, lo que resultó en hidrógeno de Ag@Cu/TiO₂ era de 17,1 μmol h⁻¹ g, la mayor producción de hidrógeno de TiO₂ puro.

Palabras clave: tinte rosa de bengala; región visible; degradación fotocatalítica; Nanocompuestos ternarios Ag@Cu/TiO₂



Cita: Yadav, S.; Jilani, A.; Sachan, S.; Kumar, P.; Ansari, SA; Afzal, M.; Ansari, MO Fotocatálisis altamente eficiente impulsada por luz visible de la producción de hidrógeno y tinte rosa de Bengala utilizando nanocompuestos ternarios Ag@Cu/TiO₂. Química 2024, 6, 489–505. <https://doi.org/10.3390/chemistry6030028>

Editores académicos: Gianguido Ramis, Vincenzo Vaiano y Olga Sacco

Recibido: 15 de abril de 2024

Revisado: 29 de mayo de 2024

Aceptado: 30 de mayo de 2024

Publicado: 20 de junio de 2024



Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

El agua es un elemento esencial para la supervivencia de la vida en la Tierra y está presente en la Tierra en forma de ríos, mares, lagos y aguas subterráneas. El rápido crecimiento de la población, el desarrollo, la Revolución Industrial y el cambio climático han contaminado todos los aspectos de los recursos hídricos [1]. Los principales contaminantes del agua son la curtiduría, el cuero, el caucho, los tintes, los cosméticos, los productos farmacéuticos alimentarios, las pinturas de imprenta, etc. [2,3]. Entre ellas, las industrias textil, farmacéutica, de pinturas para impresión y de tejidos vierten hasta un 17%-20% de tintes de colores en cuerpos de agua, lo que ha creado contaminación del agua [4]. Los tintes de colores sintéticos no son biodegradables y son altamente fotoestables [5]. El tinte inhibe la luz solar, disminuye la solubilidad del oxígeno molecular en el agua, lo que afecta la vida acuática de los organismos así como el ecosistema acuático, y tiene efectos tóxicos y cancerígenos a largo plazo para todos los organismos.

Entre los tintes orgánicos más utilizados se encuentra el tinte rosa de bengala (RB), que se utiliza en las industrias fotoquímica textil, gráfica y cosmética. Debe retirarse del agua ya que provoca picazón, enrojecimiento, inflamación, irritación y ampollas al entrar en contacto directo con la piel. Recientemente se han utilizado diferentes métodos, incluida la filtración por membrana, la coagulación, la floculación y la adsorción, para degradar la contaminación por tintes [6-8]. Sin embargo, todos estos métodos tienen limitaciones, incluyendo efluentes, desarrollo de lodos y dificultad para reactivar el adsorbente. La fotocatálisis es uno de los métodos más comunes y rentables para descomponer los tintes RB del agua utilizando nanocatalizadores eficientes [9]. La fotocatálisis de luz visible es un proceso que utiliza la energía de la luz visible para iniciar una reacción química. Implica el uso de un fotocatalizador, que puede absorber luz en el espectro visible y promover la conversión de reactivos en el producto deseado [10]. Recientemente, esta técnica ha despertado mucho interés debido a su respeto al medio ambiente, versatilidad, selectividad, eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad, que la hacen altamente aplicable para un gran número de usos.

Las nanopartículas muestran propiedades diferentes a las de los materiales a granel o especies moleculares o átomos de los que se derivan debido a la alta relación de volumen superficial [11]. Los diversos tipos de nanopartículas de metales de transición [12], óxidos de metales de transición y calcogenuros se utilizan para diversas aplicaciones, como almacenamiento de energía, almacenamiento de datos magnéticos, sensores y ferrofluidos, y degradación fotocatalítica de tintes orgánicos. Las nanopartículas, en particular las nanopartículas de óxidos metálicos, se utilizan ampliamente en el campo de la fotocatálisis de luz visible. Estas nanopartículas tienen propiedades únicas que las hacen efectivas en la fotocatálisis para diversas reacciones. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido metálico como el óxido de titanio (TiO_2) [13], el óxido de zinc (ZnO) [14] y el óxido de tungsteno (WO_3) [15] se han estudiado ampliamente por sus capacidades fotocatalíticas. Sin embargo, existen ciertos inconvenientes en el uso de nanopartículas para la fotocatálisis, como su alta banda prohibida y el requisito de que la banda prohibida del fotocatalizador debe coincidir con la energía de los fotones de luz visible para lograr una fotocatálisis de luz visible efectiva. Desafortunadamente, muchas nanopartículas de óxido metálico tienen una banda prohibida que corresponde a la luz ultravioleta (UV-Vis), lo que limita su actividad fotocatalítica en luz visible. Durante el proceso de fotocatálisis, las nanopartículas pueden aglomerarse, lo que da como resultado una disminución del área de superficie y una limitación de los sitios activos de reacción disponibles. Esta agregación puede ocurrir debido a varios factores, como una alta concentración, cambios de pH o la presencia de impurezas [16]. Para superar esta limitación, los investigadores han desarrollado varias estrategias, como el dopaje, la modificación de la superficie y la alteración de la banda prohibida, para activar nanopartículas de óxido metálico bajo iluminación con luz visible. Estas modificaciones permiten que las nanopartículas absorban una gama más amplia de luz, incluida la luz visible, mejorando así su eficiencia fotocatalítica [17]. Se han utilizado numerosos óxidos de metales de transición, como ZnO , TiO_2 , NiO y CuO , y calcogenuros metálicos, como ZnS y MoS_2 , para la eliminación de tintes coloreados, contaminantes industriales y residuos de agua farmacéutica [18-20]. El óxido de metal de transición más estudiado para la degradación fotocatalítica de contaminantes y colorantes es el TiO_2 , que tiene un fuerte poder oxidante, no es tóxico y es extremadamente estable frente a la corrosión foto y química. La fotocatálisis es un método prometedor porque es económico y respetuoso con el medio ambiente. El TiO_2 tiene una banda prohibida de ~ 3.2 eV. Varios estudios muestran la disminución de la banda prohibida del TiO_2 por el dopaje de nuevos metales de transición como Cu, Ag, Au, Pt, Ni y Co, así como polianilina (PANI), polipirrol (PPY) y óxido de grafeno reducido, que se extiende el cambio espectral en la región visible y aumenta la actividad fotocatalítica del TiO_2 [21]. Se ha demostrado que el azul de metilo (MB) y el naranja de metilo (MO) exhiben una degradación del 96,3% y del 97% bajo irradiación con luz UV-Vis utilizando TiO_2 sintetizado mediante el método solvotérmico modificado. Lin et al. [22] demostraron la degradación fotocatalítica (UV-VIS) del 2-clorofenol tóxico mediante el uso de un catalizador de TiO_2 . De manera similar, Zhang et al. [23] investigaron el efecto fotoeléctrico y las propiedades fotocatalíticas del TiO_2 dopándolo con nanopartículas de Ag para mejorar la degradación fotoeléctrica y fotocatalítica. Mingxuan Sun et al. [24] mostró una visibilidad mucho mejor

actividad fotocatalítica de la región, estabilidad fotoquímica y recombinación de carga baja de TiO₂ dopado con CdS y CdS/MoS₂.

Sobre la base de la discusión anterior, hemos sintetizado compuestos ternarios de Ag@Cu/TiO₂ mediante el método solvotérmico in situ para la degradación fotocatalítica del tinte RB en la región visible de la luz. El compuesto ternario sintetizado Ag@Cu/TiO₂ se caracterizó por sus características estructurales y morfológicas. Finalmente, se investigaron en profundidad la degradación fotocatalítica del tinte RB y el fenómeno de evolución de hidrógeno en la región visible.

2. Sección Experimental 2.1.

Materiales y métodos

Isopropóxido de titanio (IV) (TIP) 97 % de Qualigens, sulfato de cobre (II) pentahidratado 99,5 % (CuSO₄·5H₂O) de Sisco Research Laboratories, nitrato de plata 99,8 % (AgNO₃) de Sigma Aldrich, ácido ascórbico 99,7 % de Sisco Research Laboratories, borohidruro de sodio al 98 % (NaBH₄) de Sisco Research Laboratories, ácido clorhídrico al 35 % (HCl) de Sisco Research Laboratories (Mumbai, India) y colorante rosa de bengala (RB) de Sigma Aldrich (St. Louis). , MO, EE. UU.) se utilizaron en este estudio. Se utilizó agua desionizada como medio de reacción para el procedimiento de síntesis.

Se utilizó microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (JEOL, JSM-7600F, FESEM, Tokio, Japón) para estudiar la morfología de la superficie y las composiciones elementales. También se utilizó microscopía electrónica de transmisión (JEOL, JSM, ARM-200F, HRTEM, Tokio, Japón). El mapeo elemental se registró utilizando un espectroscopio de rayos X de dispersión de energía (EDS) de Oxford Instruments, Oxfordshire, Reino Unido, equipado con FESEM. Para la detección elemental, se utilizó espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) (ESCALAB 250 de Thermo Fisher Scientific, Warrington, Reino Unido) en una fuente de rayos X monocromatizada Al K α λ 1/4 1486,6 eV.

2.2. Síntesis de Ag@Cu/TiO₂

La síntesis de Ag@Cu/TiO₂ se realizó mediante la metodología solvotérmica. En este método, se dispersaron 6 ml de isopropanol en 86 ml de agua y se le agregaron gota a gota 6 ml de HCl. A la mezcla de isopropanol y ácido, se agregaron lentamente 5 ml de TIP y toda la mezcla se puso en condiciones de agitación a 80 °C durante 1 h, dando como resultado una solución coloidal blanca (denominada solución A). Esta solución coloidal blanca se sometió a centrifugación y posteriormente el TiO₂ recolectado se lavó con un exceso de solventes (mezcla de agua y etanol) y finalmente se secó en una estufa de aire a 80 °C durante 6 h para obtener TiO₂ puro. El Cu/TiO₂ se preparó disolviendo 0,4 g de CuSO₄·5H₂O en 100 ml (para una carga de ~5% de Cu en TiO₂) de agua y usando NaOH 0,05 M para mantener el pH en 12. A la solución anterior de CuSO₄·5H₂O, se mezclaron gota a gota 30 ml de ácido ascórbico 0,05 M y el resultado se calentó a 60 °C con agitación continua durante 1 h (Fig. El color amarillo de la mezcla cambió lentamente a marrón, indicativo del Cu formado (la dispersión de Cu se denominó solución B). Finalmente, ambas soluciones (A y B) se mezclaron bajo agitación continua y el Cu/TiO₂ resultante se sometió a centrifugación, se lavó con un exceso de disolventes (agua y etanol) y finalmente se secó a 80 °C durante 6 h para obtener Cu. /TiO₂. El Ag@Cu/TiO₂ se preparó preparando primero la solución coloidal de nanopartículas de Ag disolviendo 0,12 g de AgNO₃ en 100 ml de H₂O y luego se le agregaron gota a gota 30 ml de NaBH₄ 0,06 M. El compuesto binario Cu/TiO₂ se añadió a la solución coloidal de Ag y toda la mezcla se agitó continuamente durante 2 h. Así, el compuesto Ag@Cu/TiO₂ preparado se lavó con un exceso de disolventes (agua y etanol) y finalmente se secó a 80 °C durante 6 h para obtener Ag@Cu/TiO₂ puro.

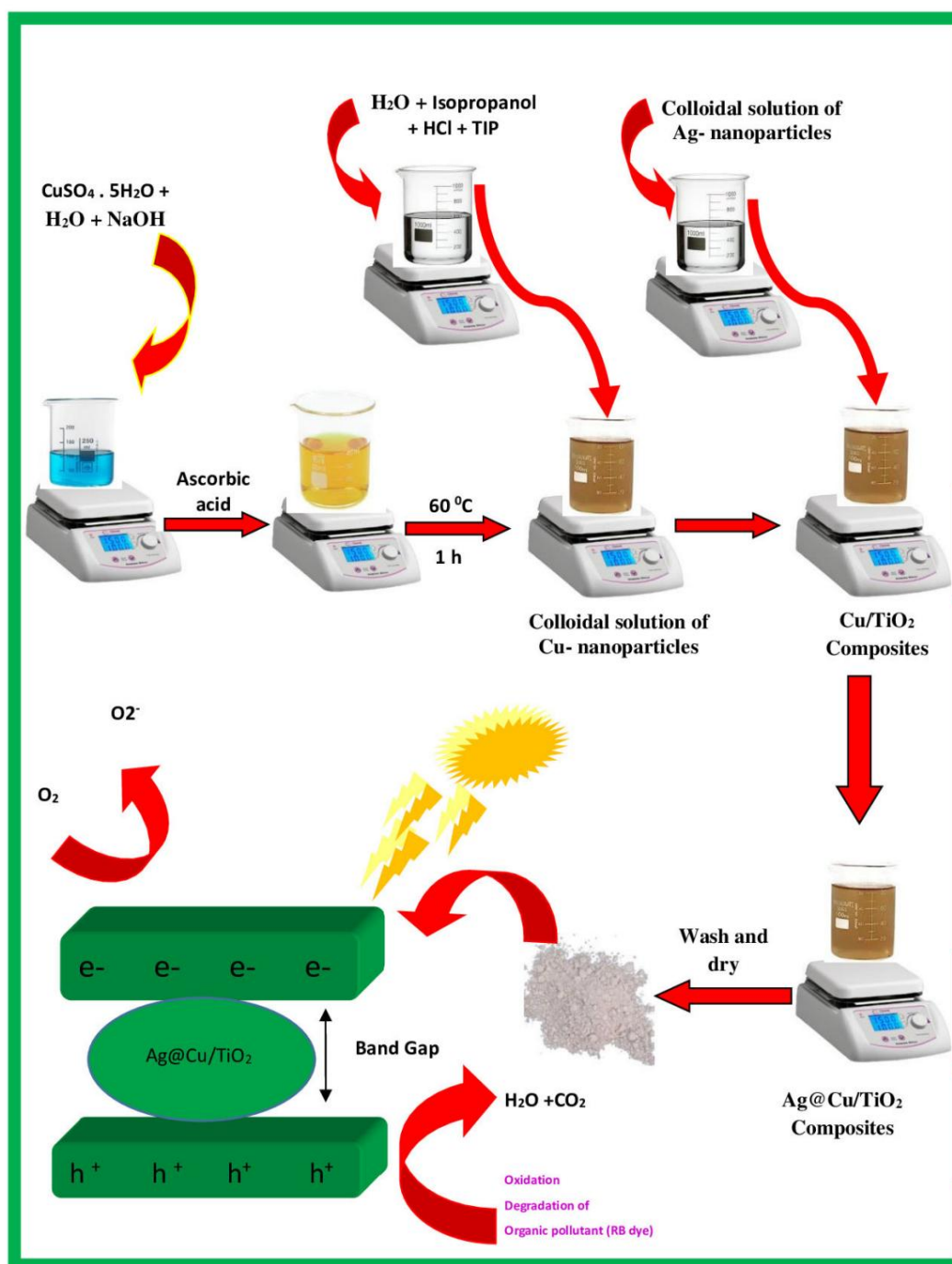


Figura 1. Ilustración esquemática de la síntesis de Ag@Cu/TiO₂.
Figura 1. Ilustración esquemática de la síntesis de Ag@Cu/TiO₂.

2.3. Degradación fotocatalítica de RB y producción de hidrógeno.

La actividad fotocatalítica de los catalizadores sintetizados, concretamente TiO₂ puro, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂, se evaluó en la degradación de RB y la producción de hidrógeno. Para ello, se preparó una solución de 250 ml que contenía 30 mg de RB y 20 mg de catalizador. La solución se irradió con luz UV (365 nm) durante 2 horas. La degradación de RB se evaluó mediante la medición de la absorbancia a 500 nm. La producción de hidrógeno se evaluó mediante la medición del volumen de gas producido en un sistema cerrado. Los resultados se muestran en la Figura 2. Se observó que la actividad fotocatalítica de los catalizadores sintetizados fue superior a la de TiO₂ puro. En particular, el catalizador Ag@Cu/TiO₂ mostró la mayor actividad fotocatalítica, tanto en la degradación de RB como en la producción de hidrógeno. Esto se atribuye a la presencia de Ag y Cu en la estructura del catalizador, que mejora la absorción de luz y la separación de los pares de electrones-huecos.

La eficiencia de degradación del TiO₂ puro, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ se calculó mediante la siguiente ecuación [25].

$$\text{Degradación(\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación proporcionada, C_0 representa la concentración inicial de tinte RB, mientras que C_t significa la concentración de RB después de un intervalo de tiempo específico (0, 20, 40 y 60 min). Posteriormente, se determinó la constante de velocidad aparente (k) utilizando la siguiente ecuación.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (2)$$

Para evaluar la producción de hidrógeno, se utilizó metanol como eliminador. En los procesos de producción de hidrógeno, los captadores desempeñan un papel fundamental a la hora de aumentar la eficiencia. Abordan desafíos clave al capturar pares de electrones y huecos y evitar que desperdicien la energía generada [1]. Además, los eliminadores apuntan y eliminan selectivamente las moléculas involucradas en reacciones secundarias no deseadas, protegiendo los intermediarios cruciales necesarios para la evolución del hidrógeno. Además, pueden facilitar el movimiento de cargas fotogeneradas dentro del sistema, asegurando su utilización eficiente para la producción de hidrógeno. Básicamente, los captadores actúan como guardianes, optimizando varios aspectos del proceso para maximizar la producción de hidrógeno [2].

3. Resultado y Discusión

3.1. Análisis morfológico de superficie

El análisis morfológico de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ se realizó mediante SEM (Figura 2) y TEM (Figura 3). El SEM del TiO₂ puro muestra grupos de partículas redondas de pequeño tamaño empaquetadas en agregados pequeños y grandes. Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ muestran una morfología similar, con todos los constituyentes en el rango nano. A partir de las micrografías se puede predecir que todos los componentes del Ag@Cu/TiO₂ están bien intercalados entre sí. Las imágenes TEM de Ag@Cu/TiO₂ muestran que todo el TiO₂, Cu y Ag están bien intercalados entre sí, siendo el tamaño de algunos TiO₂ ligeramente superior a 100 nm.

El análisis elemental del TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ por EDS muestra la presencia de Ti y O en el TiO₂, Ti, O y Ag en el Ag/TiO₂, Cu, Ti y O en el Cu/TiO₂ y Cu, Ti, O y Ag en Ag@Cu/TiO₂, lo que representa la formación exitosa del compuesto, así como la ausencia de impurezas. La distribución uniforme de los elementos respectivos, como se muestra en el análisis de mapeo (Figura 4), sugiere la eficacia de la metodología de síntesis.

3.2. Análisis químico y de composición de

superficies La composición elemental y los grupos funcionales de los catalizadores preparados (TiO₂ puro, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂) se estudiaron mediante espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS). Los espectros de estudio (Figura 5a) proporcionaron información sobre los elementos de la superficie, mientras que la composición detectada se ilustra en la Figura 5b. El TiO₂ puro demostró una composición que comprende 58,1% de oxígeno y 41,9% de titanio. En el caso del Ag/TiO₂, los elementos estuvieron presentes en los porcentajes de 51,7% oxígeno, 45,3% titanio y 3,0% plata. Asimismo, se confirmó la incorporación de cobre al Cu/TiO₂, con una composición de 50,7% oxígeno, 43,0% titanio y 6,3% cobre. El nanocompuesto ternario, denominado Ag@Cu/TiO₂, exhibió una composición elemental de 35,4% de oxígeno, 39,2% de titanio, 16,7% de plata y 8,7% de cobre.

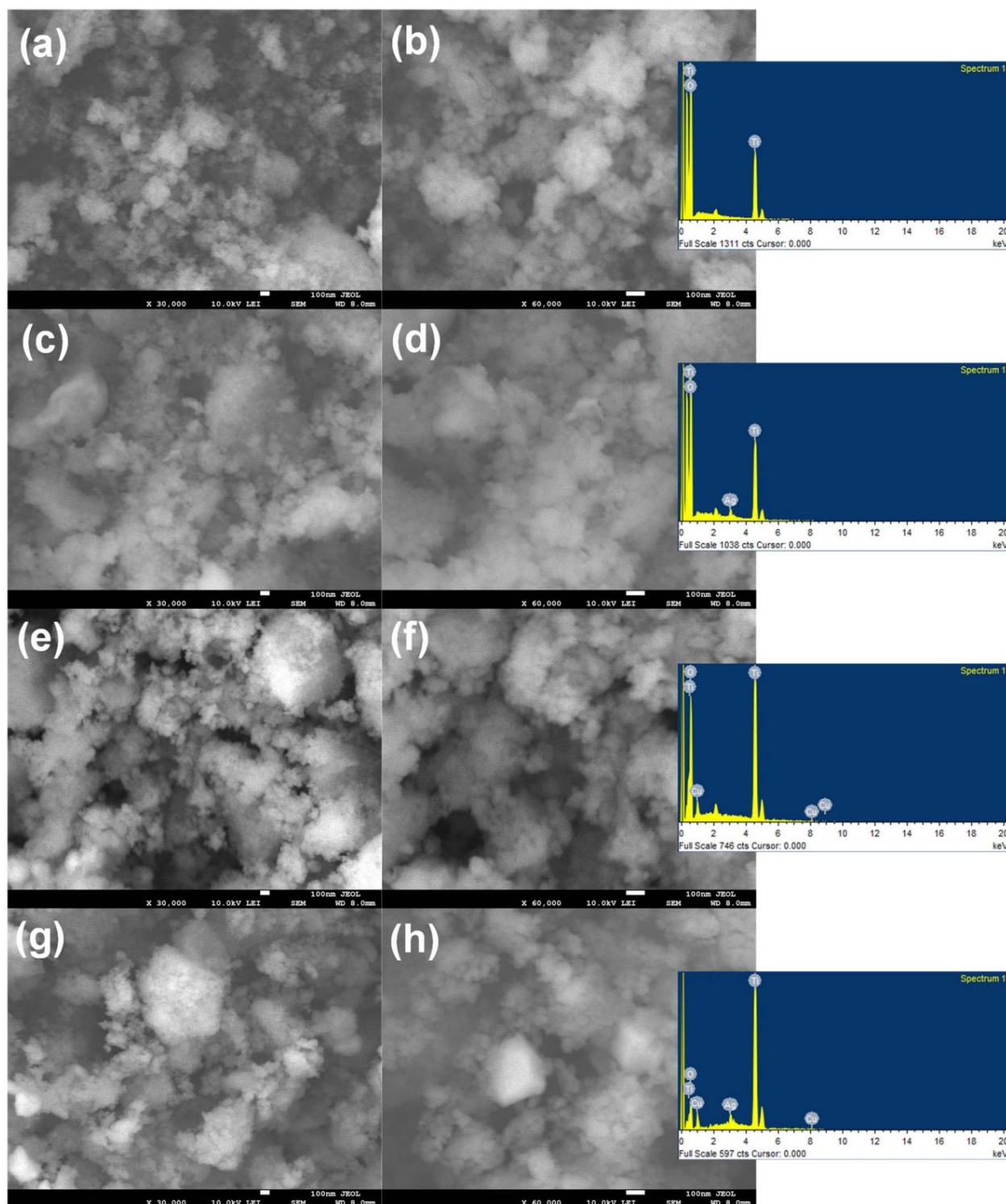


Figura 2. Micrografías SEM de TiO_2 (a,b), Ag/TiO_2 (c,d), Cu/TiO_2 (e,f) y Ag@Cu/TiO_2 (g,h). Figura 2. Micrografías SEM de TiO_2 (a,b), Ag/TiO_2 (c,d), TiO_2 (a,b), Ag/TiO_2 (c,d), Cu/TiO_2 (e,f) y Ag@Cu/TiO_2 (g,h), junto con sus respectivos análisis elementales. junto con su respectivo análisis elemental.

El análisis del estado químico del Ti2p se exploró más a fondo para dilucidar las interacciones químicas en TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 y Ag@Cu/TiO_2 (Figura 6a-d). En el análisis del estado químico del TiO_2 puro (Figura 6a), se observaron distintos picos a 457,99 eV y 463,67 eV, correspondientes a $\text{Ti}2\text{p}_{3/2}$ y $\text{Ti}2\text{p}_{1/2}$, con contribuciones de 73,32% y 26,68%, respectivamente. La introducción de Ag y Cu en el TiO_2 provocó alteraciones en las contribuciones de $\text{Ti}2\text{p}_{3/2}$ y $\text{Ti}2\text{p}_{1/2}$. Específicamente, la muestra de Ag/TiO_2

Aportes totales del 72,05% (Ti2p3/2) y 27,95% (Ti2p1/2). De igual forma, el Cu/TiO2 presentó aportes totales de 78,38% (Ti2p3/2) y 21,62% (Ti2p1/2). El compuesto ternario final, Ag@Cu/TiO2, mostró contribuciones totales del 72,31% (Ti2p3/2) y del 27,69% (Ti2p1/2). En resumen, los cambios observados en las contribuciones porcentuales atómicas de Chemistry 2024, 6, FOR PEER REVIEW después de la adición de Ag y Cu significan la interacción exitosa entre los componentes.

7

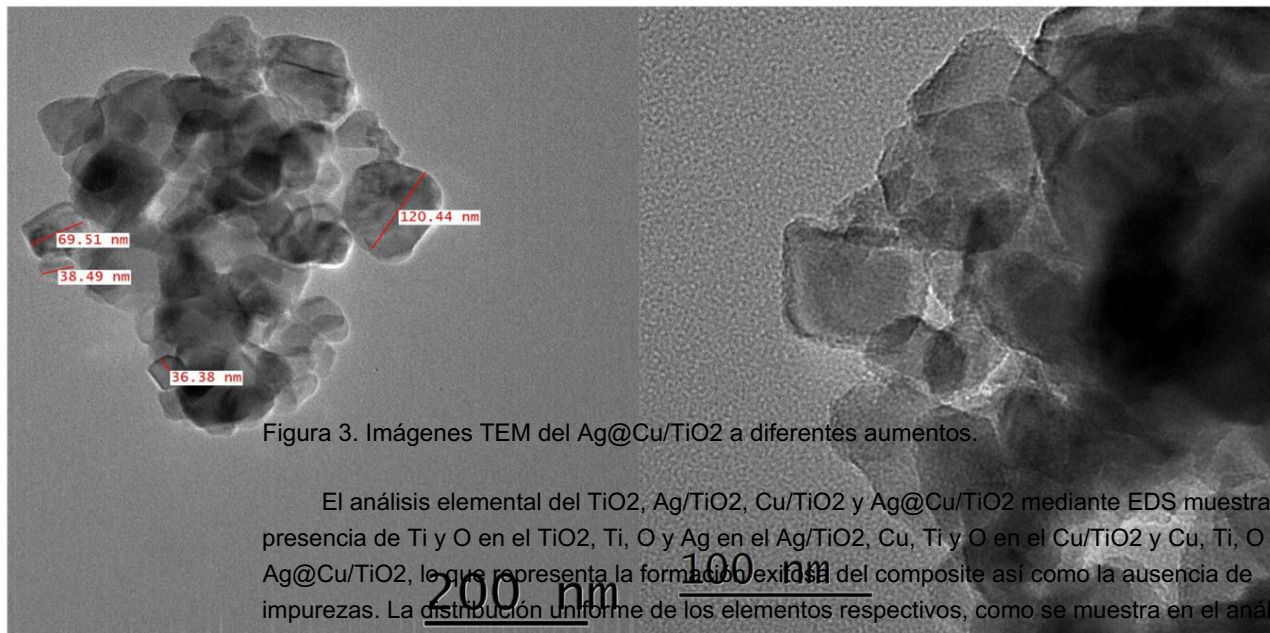


Figura 3. Imágenes TEM del Ag@Cu/TiO2 a diferentes aumentos.

El análisis elemental del TiO2, Ag/TiO2, Cu/TiO2 y Ag@Cu/TiO2 mediante EDS muestra la presencia de Ti y O en el TiO2, Ti, O y Ag en el Ag/TiO2, Cu, Ti y O en el Cu/TiO2 y Cu, Ti, O y Ag en Ag@Cu/TiO2, lo que representa la formación exitosa del composite así como la ausencia de impurezas. La distribución uniforme de los elementos respectivos, como se muestra en el análisis de mapeo (Figura 4), sugiere la Figura 3. Imágenes TEM de Ag@Cu/TiO2 con diferentes aumentos. eficacia de la metodología de síntesis.

Figura 3. Imágenes TEM del Ag@Cu/TiO2 a diferentes aumentos.

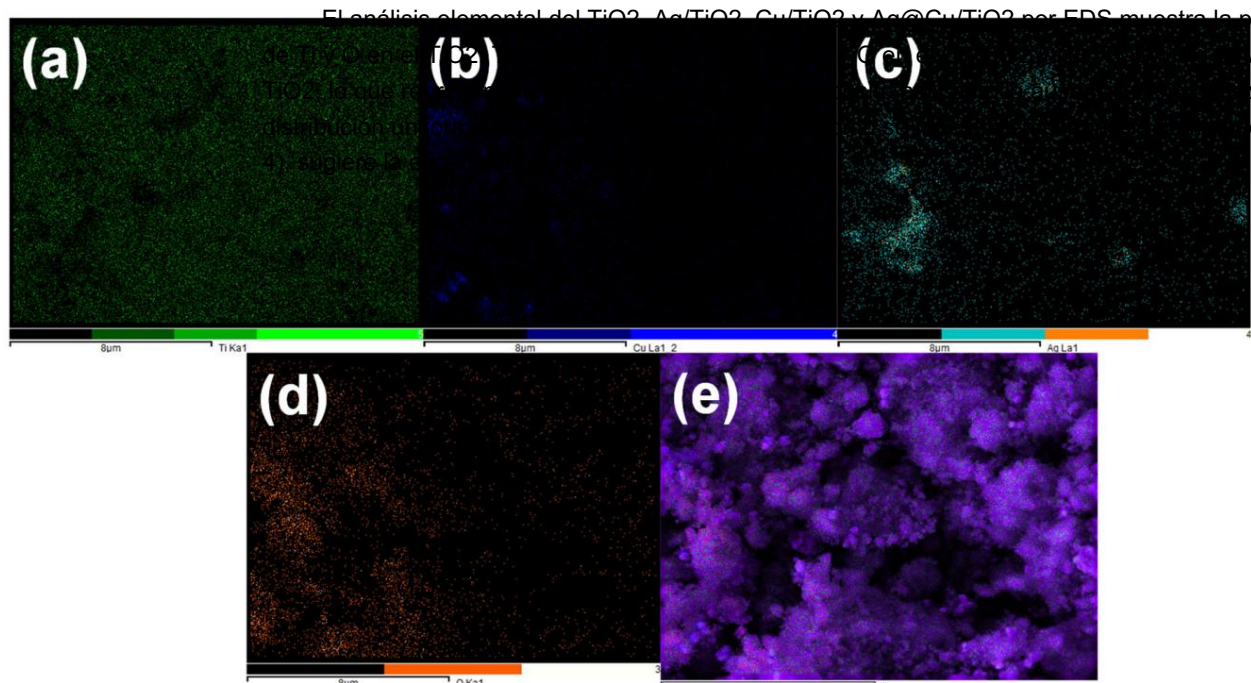
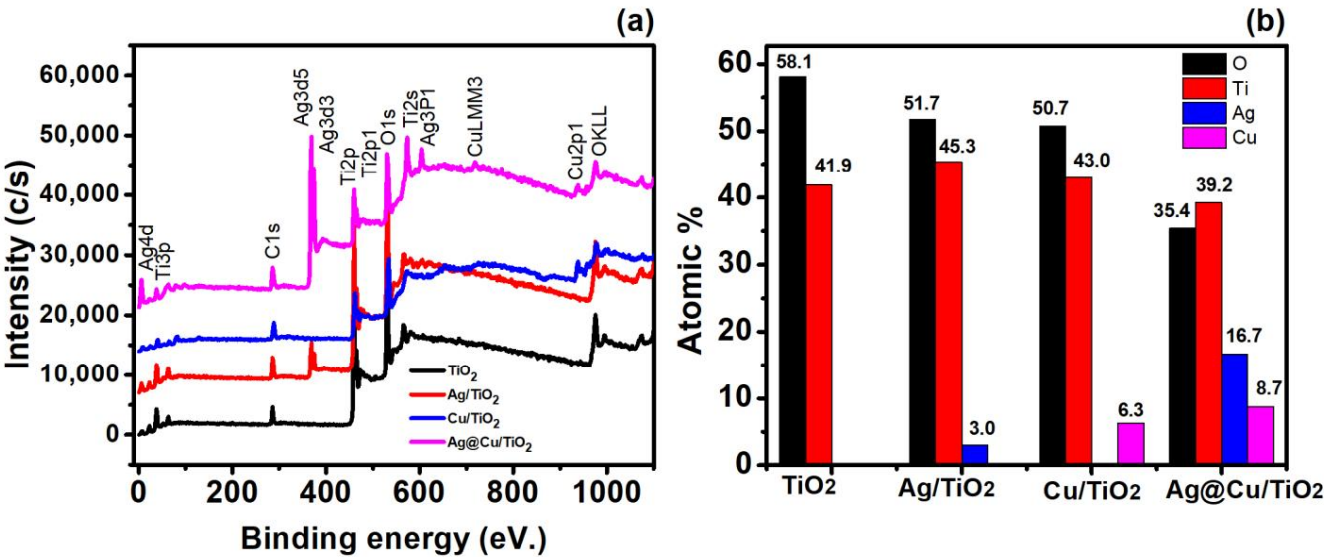


Figura 4. Distribución del mapeo elemental de Ti (a), O (b), Ag (c), Cu (d) y elementos mixtos (e).

3.2. Análisis químico y de composición de superficies

La composición elemental y los grupos funcionales de los catalizadores preparados (TiO2 puro, Ag/TiO2, Cu/TiO2 y Ag@Cu/TiO2) se estudiaron mediante espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS). Los espectros de estudio (Figura 5a) proporcionaron información sobre los elementos de la superficie, mientras que la composición detectada se ilustra en la Figura 5b. El TiO2 puro demostró una Figura 4. Distribución cartográfica elemental de Ti (a), O (b), Ag (c), Cu (d) y elementos mixtos (e).

3.2. Análisis químico y de composición de superficies



Química 2024, 6, PARA REVISIÓN POR PARES

Figura 5. (a) espectros de estudio XPS y (b) composición de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂.

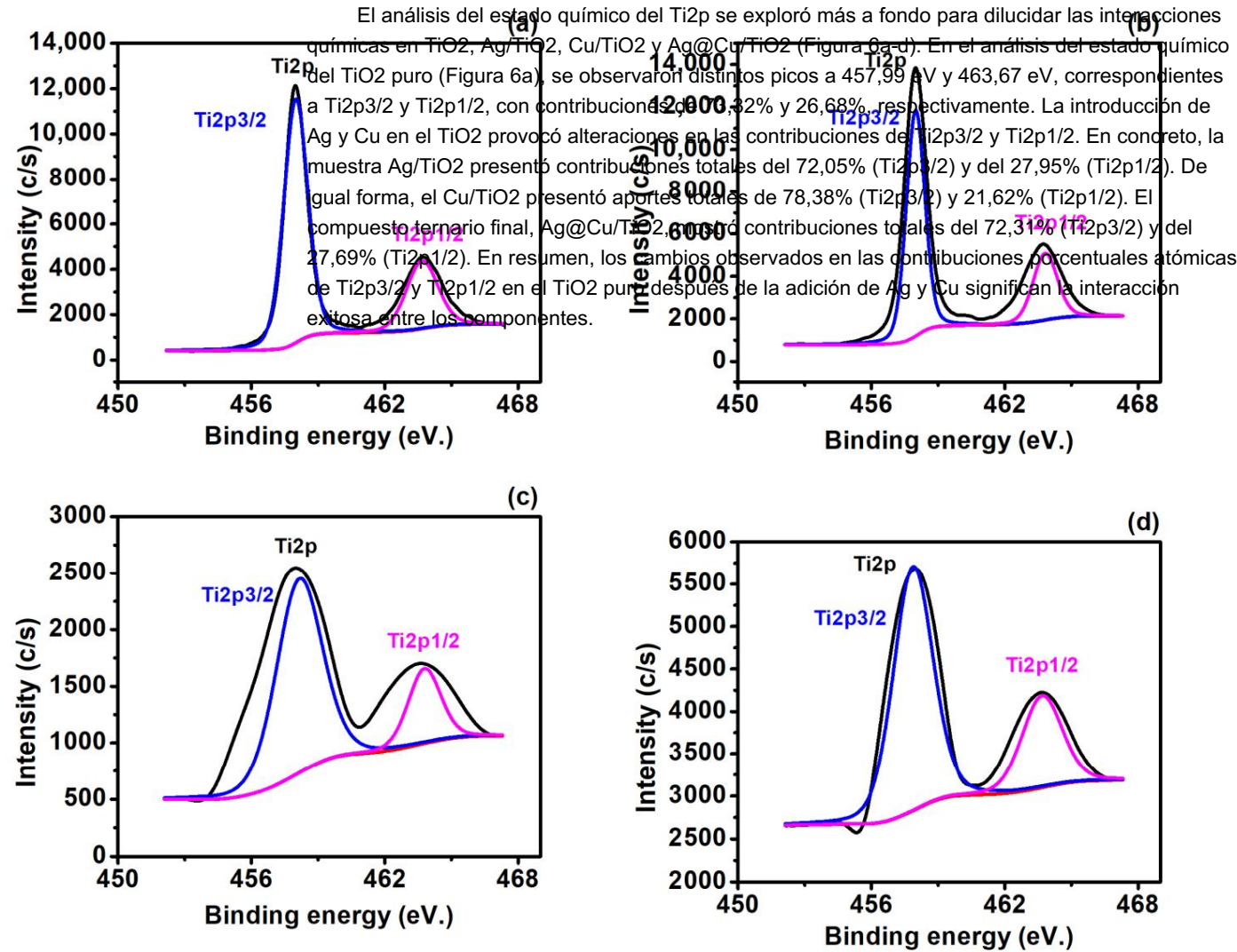


Figura 6. (a-d) Espectros de alta resolución de Ti 2p para TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂.

Los espectros de O 1s del TiO₂ puro (Figura 7a) exhiben dos picos principales alrededor de 530 eV y 532,5 eV, atribuidos a la interacción entre el oxígeno y el Ti a 530 eV y la vacancia de oxígeno a 532,5 eV, respectivamente [1]. En particular, la presencia de Ag en el TiO₂ (Ag/TiO₂), como se muestra en la Figura 7b, da como resultado un aumento en la vacancia de oxígeno del 12,54% al 13,12%.

Los espectros de O1 del TiO₂ puro (Figura 7a) exhiben dos picos principales alrededor de 530 eV y 532,5 eV, atribuidos a la interacción entre el oxígeno y el Ti a 530 eV y la vacancia de oxígeno a 532,5 eV, respectivamente [1]. En particular, la presencia de Ag en el TiO₂ (Ag/TiO₂), como se muestra en la Figura 7b, da como resultado un aumento en la vacancia de oxígeno del 12,54% al 13,12%. Esta tendencia continúa con la adición de Cu al TiO₂ (Cu/TiO₂) y al ternario Ag@Cu/TiO₂. La máxima vacancia de oxígeno, que alcanza el 56,45%, se observa para Ag@Cu/TiO₂. Estas vacantes sirven como sitios de captura activa para moléculas de tinte y contaminantes, mejorando así la actividad fotocatalítica del material [2]. Estos hallazgos se alinean con nuestros resultados fotocatalíticos, como se describe más adelante en la Figura 9. Además, es evidente un pico adicional en alrededor de 534,6 eV para Ag@Cu/TiO₂, atribuido al oxígeno de superficie (O_s), contribuyendo aún más a la actividad fotocatalítica mejorada del Ag@Cu/TiO₂ ternario en comparación con el TiO₂, Ag/TiO₂ y Cu/TiO₂ puros.

10

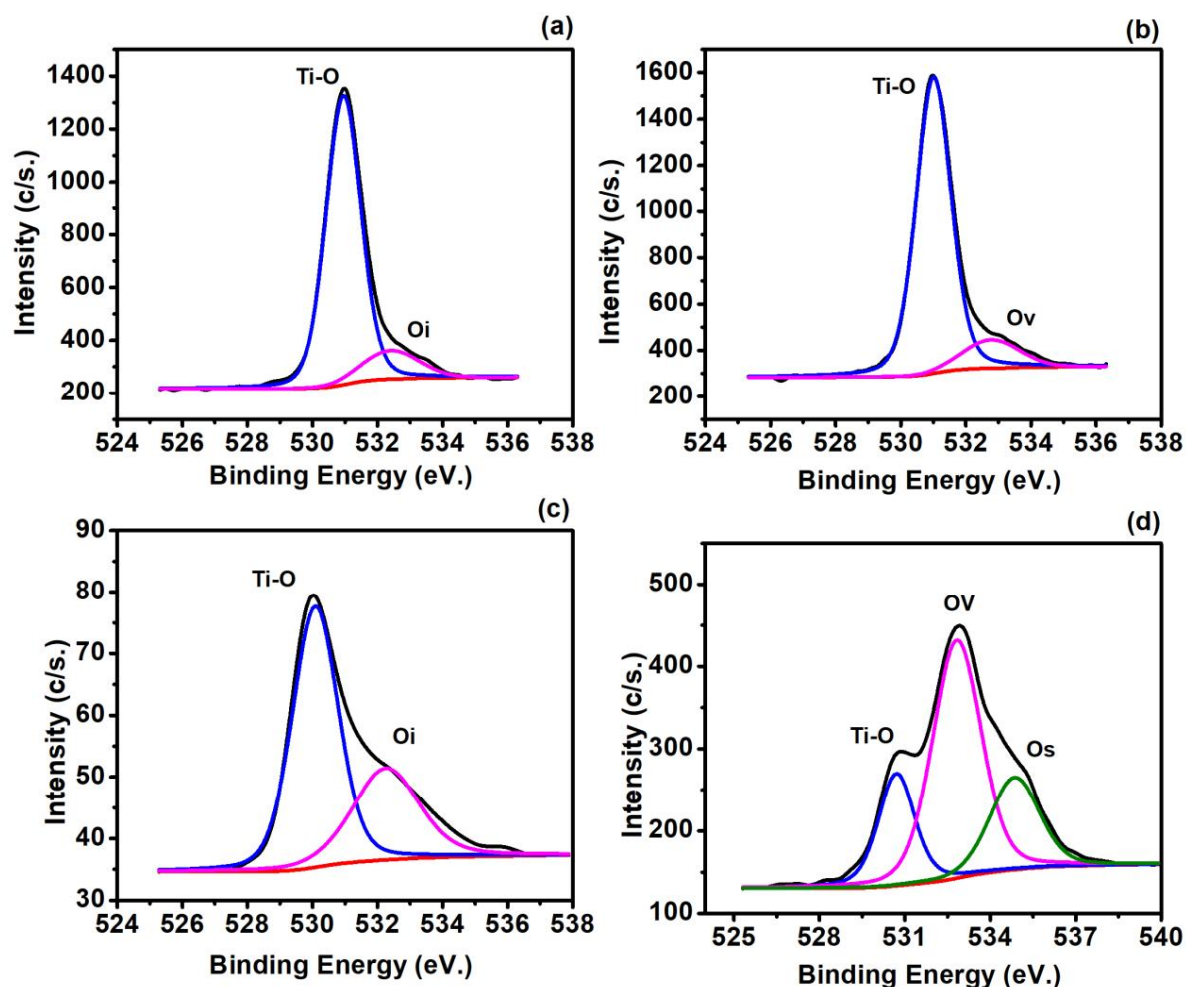


Figura 9. (a-d) O1p de alta resolución de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ puros.

El estado químico de Ag3d en Ag/TiO₂ (Figura 8a) revela los picos de Ag3d5/2 a 368 eV y 374 eV, respectivamente, con contribuciones de 59,90% y 40,10%, y Ag3d3/2 a 368 eV y 374 eV, respectivamente, con contribuciones de 59,90% y 40,10%. Sin embargo, al agregar Cu al Ag/TiO₂ (Ag@Cu/TiO₂), como se muestra en la Figura 8b, estos picos sufren ligeros cambios, pasando los porcentajes al 59,03% y 40,97%, respectivamente. El análisis de Cu2p3 de Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ se presenta en la Figura 9c,d. Los picos observados a 937 eV se atribuyen a la interacción del Cu con el oxígeno (CuOx), mientras que los de 945,5 eV corresponden al pico de sacudida del satélite, con contribución (CuOx), mientras que los de 945,5 eV corresponden al pico de sacudida del satélite, con contribuciones del 27,46% y 30,71%, respectivamente [1]. Esta alteración en la contribución del pico de satélite de agitación respalda aún más la mejora de la actividad fotocatalítica del pico del satélite de agitación mejora de la actividad fotocatalítica del Ag@Cu/TiO₂ ternario. el ternario Ag@Cu/TiO₂.

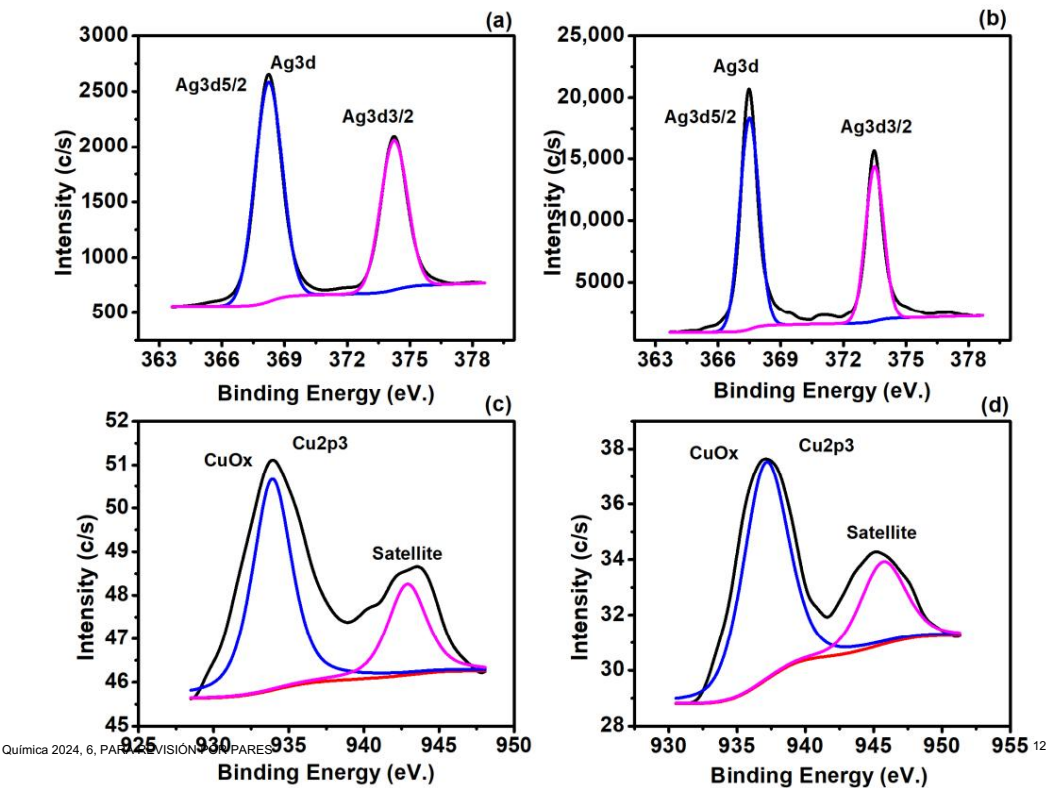


Figura 8. (a,b) Espectros de Ag 3d de Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂. (c,d) Espectros de Cu 2p de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂. Lo que resulta en una mayor degradación fotocatalítica de RB.

3.3. Movimiento del portador de carga

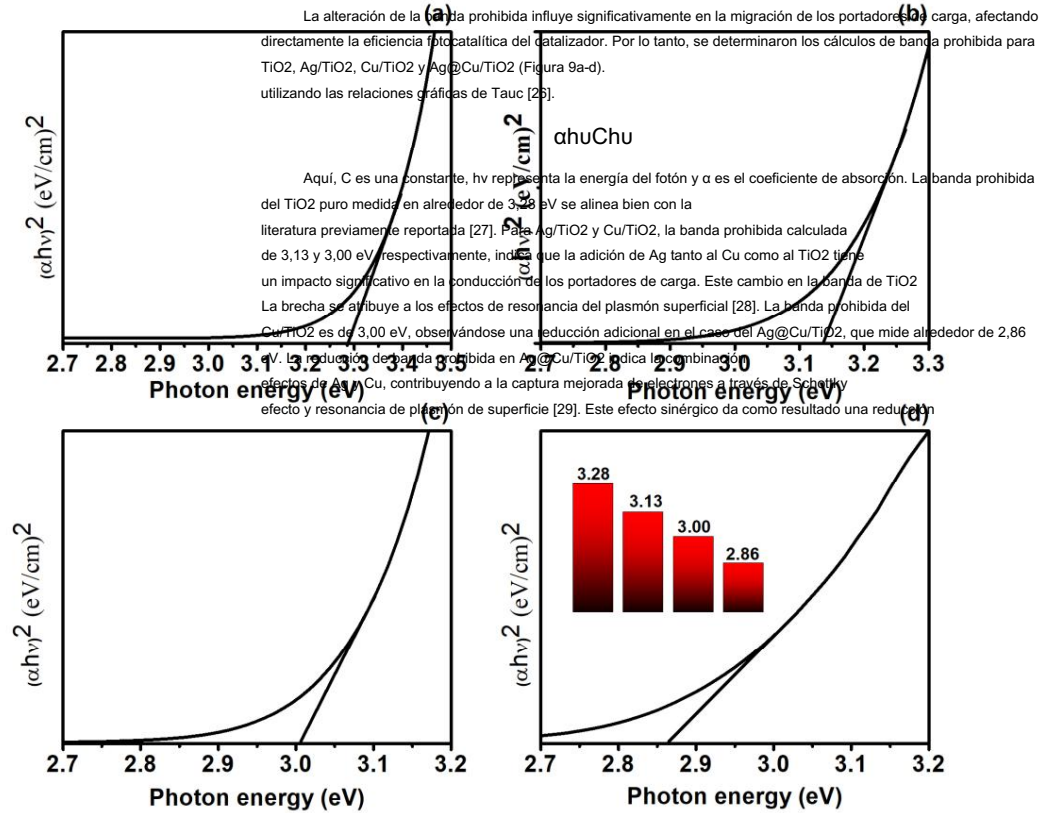


Figura 9. Análisis de banda prohibida de (a) TiO₂, (b) Ag/TiO₂, (c) Cu/TiO₂ y (d) Ag@Cu/TiO₂ y un recuadro que muestra el cambio en la banda prohibida.

3.4. Relación de recombinación de carga

La relación de recombinación de carga es inversamente proporcional al rendimiento fotocatalítico. Las relaciones de recombinación de carga de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ se determinaron a través de espectros de fotoluminiscencia, como se muestra en la Figura 10. El análisis de los espectros de fotoluminiscencia reveló que el TiO₂ exhibió un pico de alta intensidad en comparación con Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂, lo que indica una alta relación de recombinación para el TiO₂, lo que en consecuencia conduce a una menor eficiencia fotocatalítica.

3.3. Movimiento del portador de carga

La alteración de la banda prohibida influye significativamente en la migración de los portadores de carga, afectando directamente la eficiencia fotocatalítica del catalizador. Por lo tanto, los cálculos de la banda prohibida para TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ (Figura 9a-d) se determinaron utilizando las relaciones de gráficos Tauc [26].

$$\alpha(h\nu) = C(h\nu - E_g)^n$$

Por ejemplo

Aquí, C es una constante, $h\nu$ representa la energía del fotón y α es el coeficiente de absorción. La banda prohibida del TiO₂ puro medida en alrededor de 3,28 eV se alinea bien con la literatura publicada anteriormente [27]. Para Ag/TiO₂ y Cu/TiO₂, la banda prohibida calculada de 3,13 y 3,00 eV, respectivamente, indica que la adición de Ag tanto al Cu como al TiO₂ tiene un impacto significativo en la conducción de los portadores de carga. Este cambio en la banda prohibida de TiO₂ se atribuye a los efectos de resonancia del plasmón superficial [28]. La banda prohibida del Cu/TiO₂ es de 3,00 eV, observándose una reducción adicional en el caso del Ag@Cu/TiO₂, que mide alrededor de 2,86 eV. La reducción de la banda prohibida en Ag@Cu/TiO₂ indica los efectos combinados de Ag y Cu, lo que contribuye a la captura de electrones mejorada a través del efecto Schottky y la resonancia de plasmón superficial [29]. Este efecto sinérgico da como resultado una banda prohibida estrecha, electrones acelerados y movimientos de huecos en Ag@Cu/TiO₂, lo que en consecuencia da como resultado una degradación fotocatalítica mejorada de RB.

3.4. Relación de recombinación de carga

La relación de recombinación de carga es inversamente proporcional al rendimiento fotocatalítico. Las relaciones de recombinación de carga de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂ se determinaron a través de los espectros de fotoluminiscencia, como se muestra en la Figura 10. El análisis de los espectros de fotoluminiscencia reveló que el TiO₂ exhibió un pico de alta intensidad. en comparación con Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂, lo que indica una alta relación de recombinación para el TiO₂, lo que en consecuencia conduce a una menor eficiencia fotocatalítica. Por el contrario, Ag@Cu/TiO₂ tuvo una intensidad baja, lo que sugiere una mayor eficiencia de degradación. Los resultados de fotoluminiscencia se alinean con nuestros hallazgos fotocatalíticos, que indicaron que la eficiencia de degradación es la siguiente: Ag@Cu/TiO₂ > Cu/TiO₂ > Ag/TiO₂ > TiO₂.

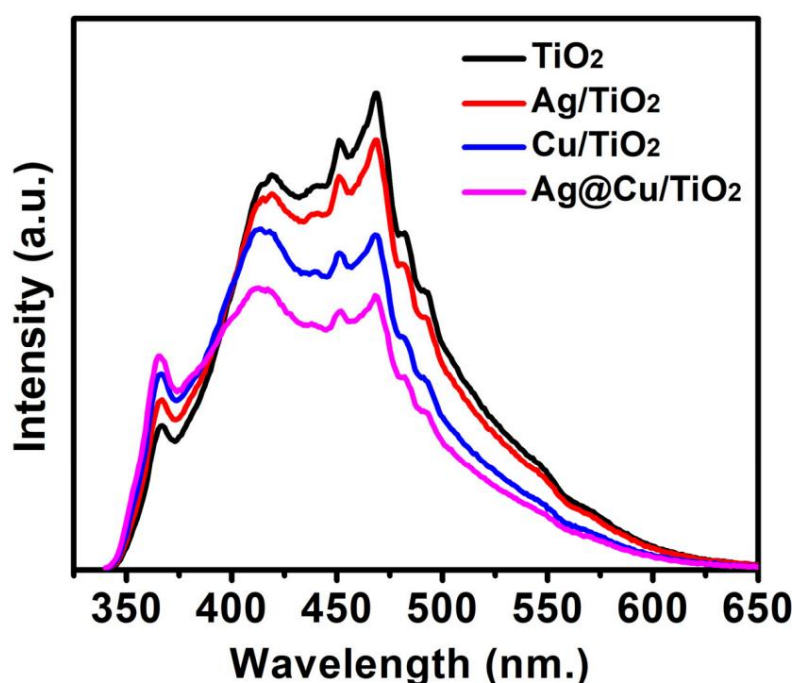


Figura 10. Relación de recombinación de carga de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂.

3.5. Degradación fotocatalítica de RB

El espectro UV-Vis de RB dependiente del tiempo bajo irradiación UV-Vis se muestra en la Figura 9a, donde el pico de absorción característico está en λ_{max} de 545 nm, que es la característica principal de RB. Al observar la Figura 9a, se hace evidente que con el aumento del tiempo de irradiación de 0 a 60 m, el pico de absorción disminuye gradualmente, lo que indica la desradación de RB b TiO₂, A/TiO₂, Cu/TiO₂ y A@Cu/TiO₂. bajo luz visible.

3.5. Degradación fotocatalítica de RB

El espectro UV-Vis de RB dependiente del tiempo bajo irradiación UV-Vis se muestra en la Figura 9a, donde el pico de absorción característico está en λ_{max} de 545 nm, que es la característica principal de RB. Al observar la Figura 9a, se hace evidente que con el aumento del tiempo de irradiación de 0 a 60 m, el pico de absorción disminuye gradualmente, lo que indica la degradación de RB por TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 y Ag@Cu/TiO_2 bajo luz visible.

Las Figuras 9b,c ilustran las estadísticas de degradación, lo que demuestra que la eficiencia de degradación del TiO_2 puro es aproximadamente del 24,41% dentro de 60 m de irradiación. Esta eficiencia relativamente baja se debe a su gran banda prohibida y su alta tasa de recombinación de carga. Con la integración de Ag, la eficiencia de degradación del TiO_2 puro aumentó a aproximadamente 34,73% en el mismo período. Esta mejora se debe a la resonancia de fotoluminiscencia superficial inducida por la plata, que suprime la recombinación de los portadores de carga, intensificando en consecuencia la degradación de RB por Ag/TiO_2 [25].

La eficiencia de degradación del Cu/TiO_2 fue aproximadamente del 68,38%, que es 2,82 veces mayor que la del TiO_2 puro. Esta mejora se debe a la reducción del índice de recombinación de carga y a la introducción de sitios activos como vacantes de oxígeno en el TiO_2 puro, lo que resulta en una captura más efectiva de las moléculas de RB y, por lo tanto, mejora la eficiencia de degradación del Cu/TiO_2 [26]. De manera similar, el efecto combinado de la plata y el cobre es evidente en la eficiencia fotocatalítica del Ag@Cu/TiO_2 ternario, que exhibió una tasa de degradación de aproximadamente 81,07%, que es 3,31 veces mayor que la del TiO_2 . La mejora notable se debe a la reducción efectiva en la recombinación de los pares electrón-hueco y a la introducción de sitios más activos para la captura de moléculas de RB. Además, la incorporación de plata y cobre al TiO_2 condujo a una mayor absorción de luz, lo que contribuyó aún más a la mejora general. Además, a medida que aumenta la eficiencia de degradación, también aumenta la constante de velocidad de reacción de TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 y Ag@Cu/TiO_2 . Se encontró que la constante de velocidad de reacción (Figura 11d) para Ag@Cu/TiO_2 era aproximadamente $2,76 \times 10^{-2}$ 5.94 veces más que el del TiO_2 . La constante de velocidad de reacción para Ag/TiO_2 y Cu/TiO_2 fue de alrededor de $7,11 \times 10^{-3}$ y $1,91 \times 10^{-2}$, respectivamente.

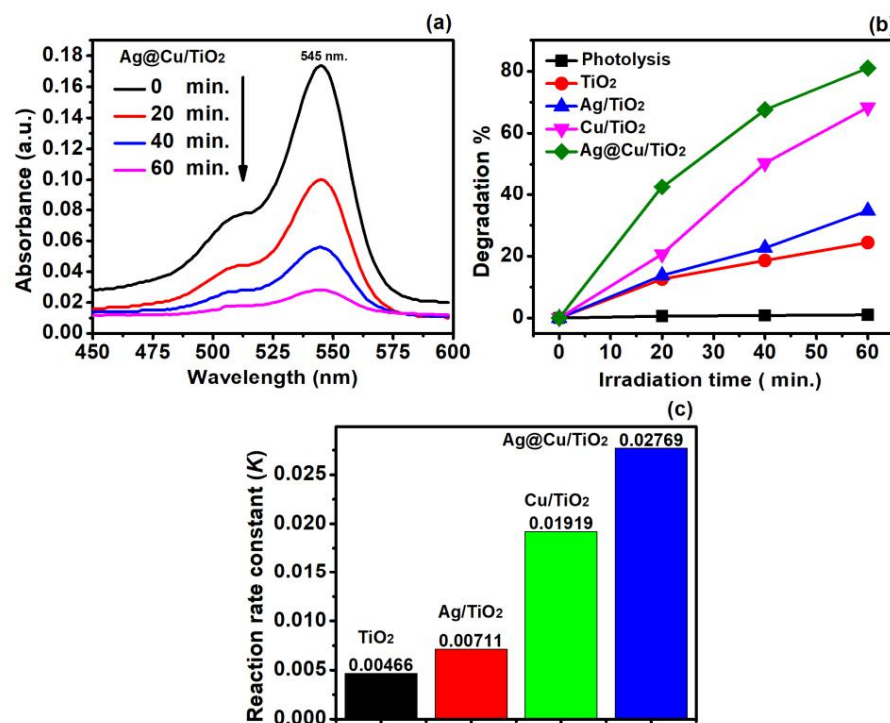


Figura 11. (a) Espectro UV-Vis de RB dependiente del tiempo para Ag@Cu/TiO_2 , y (b) estadísticas de degradación y (c) constante de velocidad de reacción para TiO_2 , Ag/TiO_2 , Cu/TiO_2 y Ag@Cu/TiO_2 según las condiciones optimizadas de reacción. El valor optimizado de TiO_2 bajo el valor optimizado de 200 mg de cada catalizador en una solución de 250 ml que contiene 30 mg/l de colorante RB. valor optimizado de 200 mg de cada catalizador en una solución de 250 ml que contiene 30 mg/l de colorante RB.

3.5.1. Efecto de la concentración de RB

La concentración de tinte es un factor crucial ya que puede mejorar o disminuir la eficiencia fotocatalítica del catalizador. Para examinar esto, se llevaron a cabo una serie de reacciones a varias concentraciones de RB, a saber, 5, 20, 30, 40 y 50 ppm, manteniendo la dosis de Ag@Cu/TiO_2 fija en 200 mg/250 ml y la intensidad de la luz en una lámpara halógena de 500 W. Como se muestra en la Figura 12a, se encontró que la degradación de RB estaba en su punto máximo, alrededor del 81,07 %, a una concentración de RB de 30 ppm. Los resultados revelaron un aumento progresivo en

3.5.1. Efecto de la concentración de RB

La concentración de tinte es un factor crucial ya que puede mejorar o disminuir la eficiencia fotocatalítica del catalizador. Para examinar esto, se llevaron a cabo una serie de reacciones a varias concentraciones de RB, a saber, 5, 20, 30, 40 y 50 ppm, manteniendo la dosis de Ag@Cu/TiO₂ fija en 200 mg/250 ml y la luz. intensidad con una lámpara halógena de 500 W. Como se muestra en la Figura 12a, se encontró que la degradación de RB estaba en su punto máximo, alrededor del 81,07 %, a una concentración de RB de 30 ppm. Los resultados revelaron un aumento progresivo en la tasa de degradación de 5 ppm a 30 ppm, con valores de degradación de aproximadamente 49,5%, 57,1%, 70,9% y 81,07% para 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm y 30 ppm, respectivamente. En particular, la degradación de RB comenzó a disminuir más allá de 30 ppm, con valores de degradación de 75,9% y 65,2% para 40 ppm y 50 ppm, respectivamente. El rendimiento fotocatalítico altamente eficiente del Ag@Cu/TiO₂ se debe a la creciente disponibilidad de moléculas de tinte RB para la excitación y la transferencia de energía con una concentración creciente de RB [30]. Sin embargo, al superar un nivel de concentración crítico, en nuestro caso 30 ppm, las moléculas de colorante comienzan a absorber la radiación¹⁵ en lugar de ser absorbidas por el Ag@Cu/TiO₂, lo que resulta en una disminución de la eficiencia fotocatalítica del Ag@Cu/. TiO₂ [31].

Química 2024, 6, PARA REVISIÓN POR PARES

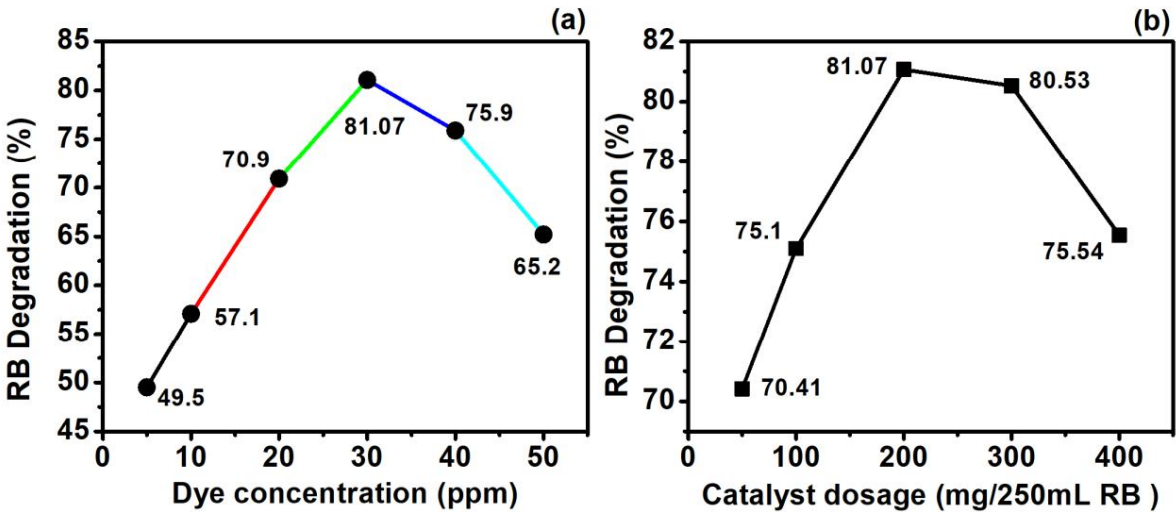


Figura 12. (a) Efecto de la concentración de RB sobre la degradación de RB por 5 ppm, 10 ppm, 20 ppm, 30 ppm, 40 ppm y 50 ppm en 500 nm manteniendo la dosis de Ag@Cu/TiO₂ fija en 200 mg/250 mL y la intensidad de la luz con una lámpara halógena de 500 W. (b) Variación en las dosis de Ag@Cu/TiO₂ en 50 mg/250 mL, 100 mg/250 mL, 200 mg/250 mL, 300 mg/250 mL y 400 mg/250 mL.

Ag@Cu/TiO₂ de la dosis de tinte

La degradación fotocatalítica depende de la cantidad de catalizador en la solución. Para estudiar la variación de la eficiencia de degradación del RB con la dosis de Ag@Cu/TiO₂, se realizaron experimentos a 50 mg/250 mL, 100 mg/250 mL, 200 mg/250 mL, 300 mg/250 mL y 400 mg/250 mL, manteniendo la irradiación de 60 mW/cm² y la intensidad de la luz de irradiación (500 W) (500 W) y la concentración de RB (30 ppm) constantes.

Los resultados (Figura 12b) revelaron que la eficiencia de Ag@Cu/TiO₂ hacia la degradación aumentó con la degradación del 70,41% con 50 mg/250 mL de dosis, 75,1% con 100 mg/250 mL y del 81,07% con 200 mg/250 mL. Esta aproximadamente 70,41% a 50 mg/250 mL se debe a la mayor disponibilidad de regiones con el mayor número de Ag@Cu/TiO₂, lo que facilita la captura de moléculas de RB. Regiones activas con el aumento de la dosis de Ag@Cu/TiO₂ que facilita la degradación de RB. Sin embargo, a medida que aumentaba la dosis de Ag@Cu/TiO₂ de 200 mg/250 mL a 300 mg/250 mL, hubo una ligera reducción en la eficiencia, que fue aproximadamente del 80,53%. Esta eficiencia disminuyó aún más hasta el 75,54% a 400 mg/250 mL. Esta eficiencia disminuyó aún más. Esta disminución de la eficiencia se puede atribuir a la desorción y dispersión de la luz más allá de un cierto umbral de dosis de Ag@Cu/TiO₂ [29].

La reutilización cíclica del Ag@Cu/TiO₂ se evaluó durante siete ciclos consecutivos (ver Figura S2). Sorprendentemente, la reutilización se mantuvo estable en 79,96% incluso después del séptimo ciclo. Estos hallazgos subrayan el potencial prometedor de Ag@Cu/TiO₂ para el tinte RB

Esta disminución de la eficiencia se puede atribuir a la desorción y dispersión de la luz más allá de un cierto umbral de dosis de Ag@Cu/TiO₂ [29].

La reutilización cíclica del Ag@Cu/TiO₂ se evaluó durante siete ciclos consecutivos (ver Figura S2). Sorprendentemente, la reutilización se mantuvo estable en un 79,96% incluso después del séptimo ciclo. Estos hallazgos subrayan el potencial prometedor de Ag@Cu/TiO₂ para la degradación del tinte RB bajo luz visible.

3.5.3. Mecanismo fotocatalítico propuesto

La Figura 13 muestra la ruta sugerida de degradación de Ag@Cu/TiO₂ de RB. Hay tres formas posibles para la formación de heterouniones binarias y ternarias con TiO₂.

El nivel de energía del orbital molecular ocupado más alto del Cu se encuentra entre la banda de valencia (VB) y la banda de conducción (CB) del TiO₂, lo que facilita la formación de la heterounión binaria. Bajo irradiación de luz visible, Cu/TiO₂ facilita la transferencia de huecos a Cu, lo que lleva al transporte de electrones al CB del TiO₂. La gran cantidad de agujeros en el Cu reaccionan con el RB, provocando oxidación y posterior degradación del RB. Además, el CB generado se produce en una heterounión binaria Ag@TiO₂ debido a las diferencias en el TiO₂ y los electrones transferidos al Ag [32]. Esto muestra que el Ag tiene un papel importante como reservorio de electrones. El CB de Ag carga al crear una barrera Schottky. Esto a su vez mejora las funciones de trabajo de TiO₂ y Ag [32]. Esto muestra que Ag tiene un papel importante como electrón en la degradación fotocatalítica bajo luz visible [33]. Además, el más superficial de Ag reduce la recombinación de cargas al crear una barrera Schottky. Esto a su vez, aumenta la actividad fotocatalítica al estimular la migración de electrones (SPR) y mejora la degradación fotocatalítica bajo luz visible [33]. Además, la superficie de Ag se produce mediante la recolección de fotones. La migración de huecos a Cu facilita la producción de resonancia de plasmón (SPR) y aumenta la actividad fotocatalítica al fomentar la recolección de fotones. La migración de huecos a Cu facilita la producción de TiO₂ y en última instancia, al CB de Ag. Aquí, aceleran los procesos de oxidación de heterouniones ternarias en Ag@Cu/TiO₂, donde los electrones se transfieren al CB y se reducen, produciendo radicales libres. El proceso de degradación comienza cuando el RB absorbe el TiO₂ y finalmente llega al CB del Ag. Aquí aceleran los procesos de oxidación de estos radicales, y reducción, produciendo radicales libres. El proceso de degradación comienza cuando RB absorbe estos radicales.

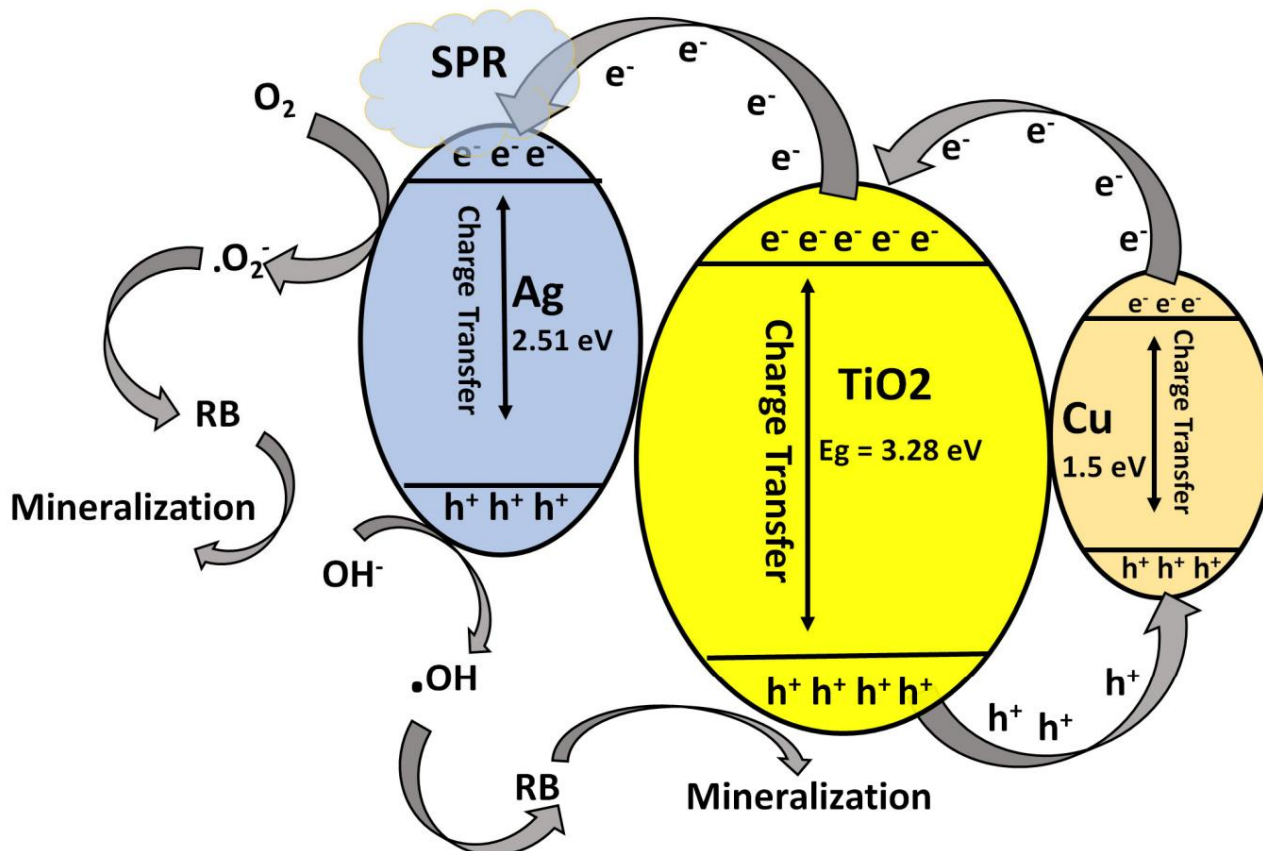


Figura 13. Mecanismo de degradación propuesto de RB por Ag@Cu/TiO₂.

Figura 13. Mecanismo de degradación propuesto de RB por Ag@Cu/TiO₂.

3.6. Producción de hidrógeno

Utilizando una concentración del 20% de metanol como eliminador, evaluamos la generación de hidrógeno fotocatalítico de TiO₂, Ag/TiO₂, Cu/TiO₂ y Ag@Cu/TiO₂. Los resultados, como

Contribuciones de los autores: Conceptualización, SY, AJ, PK, SAA y MOA; Curación de datos, SS y SY; Análisis formal, SY, SS y SAA; Adquisición de financiación, SY y PK; Investigación SY, AJ, PK, SAA, MOA y MA; Metodología, SY, PK, AJ y MOA; Administración de proyectos, SY, AJ, PK y MOA; Recursos, SY, AJ, PK y MOA; Software, SS y MA; Supervisión, AJ, PK y MOA; Validación, SY y MA; Visualización, SY, PK, SAA y MOA; Escritura: borrador original, SY y MA; Escritura: revisión y edición, SY, AJ, PK y MOA Todos

Química 2024, 6, PARA REVISIÓN POR PARES

Química 2024, 6, PARA REVISIÓN POR PARES

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

2 Huang, L.; Huang, X.; Yan, J.; Liu, Y.; Jiang, H.; Zhang, H.; Tang, J.; Liu, Q. Avanza la investigación sobre la aplicación de la perovskita

3. Noor, R.; Maqsood, A.; Baig, A.; Pandé, CB; Zahra, SM; Saad, A.; Anwar, M.; Singh, SK Una revisión completa sobre el agua

4. Huang, S.T.-T.; Lee, W.W.; Chang, J.-L.; Huang, W.S.-S.; Chou, S.-Y.; Chen, C.-C. Síntesis hidrotermal de nanocubos de SrTiO₃:

5 Solayman HM; Hossen MA; Abd Aziz A; Yahya Nueva York: Carriño IK; Ching SI; Monir MI; Zoh K-D Actuación

6 Evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales con tintes, una revisión. J. Medio Ambiente. Química. Ing. 2023, 11, 109610. [\[Referencia cruzada\]](#)
Evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales con tintes, una revisión. J. Medio Ambiente. Química. Ing. 2023, 11, 109610. en
Adsorción y eliminación de colorantes de compuestos residuales del agua. J. Pelloso. Madrid: 2020; 742, 100024.

Complejo supramolecular y su híbrido magnético. *Inorg. Química. Frente.* 2018, 5, 694-704. [\[Referencia cruzada\]](#)

Aguas subterráneas contaminadas mediante metodología de respuesta superficial. *Moléculas* 2022, 27, 7953. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

8. Gan, Y.; Ding, G.; Xu, B.; Li, L.; Zhang, S.; Cui, Y.; Wu, B.; Huang, W.; Song, X. Control de la contaminación por antimonio (Sb) mediante coagulación y filtración por membrana en el tratamiento de agua/aguas residuales: una revisión completa. *J. Peligro Madre* 2023, 442, 130072.

9. Saeed, U.; Jilani, A.; Iqbal, F.; Al-Turaiif, H.; Naveed, P.; Arzeno, G. *Gráfica asistida por vídeo de grafeno reducido @Varillas de ZnO para*

107. Blázquez-Moreno, A.; Moya, P.; Marín-Muñoz, F. Síntesis de nuevos fotocatalizadores heterogéneos basados en Rose Bengal

desinfección y descontaminación eficaz de las aguas residuales, Catalán. Hoy 2023, 413, 113948. [\[CrossRef\]](#)

sin núcleo de magnetita para la degradación de fármacos. *Catalán*. 2023; 413: 113994. [\[CrossRef\]](#)

S. Pitchaimuthu, S. Purohit y A. K. Singh / Química Nova 46(2023) 1-7

13. Lei, B.; Robertson, N. Mesocristales de TiO_2 : inmovilización, fluoración superficial y aplicación en aguas fotocatalíticas.

11. Flores, V.; Moyá, J.; Boscá, F.; Martín, M. E. Efecto de la actividad de fotocatalizadores heterogéneos New Rose Bengal-SiO₂ con un Aplica. Navegar. Ciencia. 2023, 616, 156487. [\[Referencia cruzada\]](#)

12. Shrivastava, K.; Sundaram, K.; Kirubakaran, D.D.; Veerasingam, L.; Emmanuel, S.S.; Krishnamoorthy, S.; Devadas, A.; Nagarajan, D. Síntesis de nanocompuestos de nanofibras de carbono y óxido de zinc con propiedades fotocatalíticas y antimicrobianas altamente eficientes. *Revista Colombiana de Química* 2016, 39, 1-10.

15. Guo, M.; Yuan, B. Tratamiento de Aguas Residuales. *La Ciencia* 2023, 8, 1643. <https://doi.org/10.3390/la8041643>.

Absorbedor solar de sulfuro/óxido de tungsteno con degradación fotocatalítica mejorada para la purificación de aguas residuales con tintes. J. Colloids Interface Sci. 2023; 631: 38-43. doi:10.1016/j.jcis.2023.03.016

16. Christoforidis, K.C.; Fornasiero, P. Producción de hidrógeno fotocatalítico: una brecha en el futuro suministro de energía. *ChemCatChem* 2023, 15, 1211–1224. <https://doi.org/10.1002/cssc.202201254>

17. Dong, S.; Feng, J.; Fan, M.; Pi, Y.; Hu, L.; Han, X.; Liu, M.; Sol, J.; Sun, J. Desarrollo reciente en fotocatalizadores heterogéneos para el tratamiento de Aguas Residuales. *J. Ing. de Procesos de Agua*, 2023, 34, 104020.

18. Palaniyandhi, V.K.; Manoharan, K.; Ramani, K.; Sureshram, R. Comportamiento fotocatalítico mejorado hacia el sulfuro de zinc impulsado por la luz solar absorbida en el solar de sulfuro de zinc con degradación de tinte. *Sistema de degradación fotocatalítica mejorada hacia el sulfuro de zinc impulsado por la luz solar*. *Journal of Photochemistry and Photobiology: Part A* 2019, **378**, 112112. [CrossRef]

16. Christoforidis, K.C.; Fornasiero, P. Producción de hidrógeno fotocatalítico: una brecha en el futuro suministro de energía. *ChemCatCh* 19. Taveh, AM; Hussein, D.

10. Nanométer. 2015. 3. 63-62. <https://doi.org/10.1002/anie.201500000>.

20. Li, Z.; Meng, X.; Zhang, Z. Desarrollo reciente de la fotocatalisis basada en MoS₂ una revision. *147* *Quimica. Fotobiol. C Tratamiento de agua con fotoquimica n* fotocatalizadores sensibles a la luz visible: una revision. *RSB Avanzado*. 2019; **5**, 14610–14630.

18. Palanisamy, VK; Manoharan, K.; Raman, K.; Sundaram, R. Comportamiento fotocatalítico eficiente impulsado por la luz solar de nanobarras de sulfuro de zinc hacia la degradación del rosa de Bengala. *J. Mater. Ciencia. Madre. Electrón.* 2020, 31, 14795–14809. [\[Referencia cruzada\]](#)
19. Tayeb, AM; Hussein, DS Síntesis de nanopartículas de TiO₂ y su actividad fotocatalítica para el azul de metileno. *Soy. J. Nanomater.* 2015, 3, 57–63.
20. Li, Z.; Meng, X.; Zhang, Z. Desarrollo reciente de la fotocatálisis basada en MoS₂: una revisión. *J. Fotoquímica. Fotobiol. C Fotoquímica. Rev.* 2018, 35, 39–55. [\[Referencia cruzada\]](#)
21. Li, Z.; Wang, S.; Wu, J.; Zhou, W. Progresos recientes en fotocatalizadores de TiO₂ defectuosos para aplicaciones energéticas y ambientales. *Renovar. Sostener. Energía Rev.* 2022, 156, 111980. [\[CrossRef\]](#)
22. Chun-Te Lin, J.; Sopajaree, K.; Jitjanesuwan, T.; Lu, M.-C. Aplicación de luz visible sobre dióxido de titanio dopado con cobre que cataliza la degradación de clorofenoles. *Sep. Purif. Tecnología.* 2018, 191, 233–243.
23. Zhang, H.; Wang, G.; Chen, D.; Lv, X.; Li, J. Ajuste del rendimiento fotoelectroquímico de nanocompuestos de Ag-TiO₂ mediante Reducción/Oxidación de Ag. *Química. Madre.* 2008, 20, 6543–6549. [\[Referencia cruzada\]](#)
24. Sol, M.; Wang, Y.; Colmillo, Y.; Sol, S.; Yu, Z. Construcción de compuestos ternarios MoS₂/CdS/TiO₂ con fotocatalítico mejorado Actividad y Estabilidad. *J. Compd. de aleaciones.* 2016, 684, 335–341. [\[Referencia cruzada\]](#)
25. Dustgeer, señor; Asma, ST; Jilani, A.; Raza, K.; Hussain, SZ; Shakoob, MB; Iqbal, J.; Abdel-wahab, MS; Darwesh, R. Síntesis y caracterización de nuevas películas delgadas monofásicas de Cu₂O pulverizadas : actividad estructural, antibacteriana y degradación fotocatalítica del azul de metileno. *Inorg. Química. Comunitario.* 2021, 128, 108606. [\[Referencia cruzada\]](#)
26. Jilani, A.; Iqbal, J.; Rafique, S.; Abdel-wahab, MS; Jamil, Y.; Al-Ghamdi, AA Investigaciones de cambios de estado químico de fotoelectrones morfológicos, ópticos y de rayos X de películas delgadas de ZnO. *Optik* 2016, 127, 6358–6365. [\[Referencia cruzada\]](#)
27. Kumari, A.; Zamán, M.; Kumar, A.; Singh, VR; Ghosh, A.; Sahoo, SK; Rahaman, A.; Mandal, SK; Bhunia, S. Un enfoque alternativo para estudiar el comportamiento fotocatalítico del TiO₂ utilizando técnicas espectroscópicas avanzadas basadas en sincrotrón. *J. Mater. Ing. Realice* 2023, 32, 10391–10401. [\[Referencia cruzada\]](#)
28. Shi, Y.; Pequeño, Xu, Z.; Guo, F.; Li, Y.; Shi, W. El acoplamiento sinérgico de efectos piezoelectricos y plasmónicos regula la barrera Schottky en nanopartículas de agricultura/ heteroestructura de nano hojas ultrafinas de g-C₃N₄ para mejorar la actividad fotocatalítica. *Aplica. Navegar. Ciencia.* 2023, 616, 156466. [\[Referencia cruzada\]](#)
29. Di, S.; Guo, S.; Wang, Y.; Wang, W.; Jung, YM; Chen, L.; Wang, L. Efecto de resonancia del plasmón superficial sobre la transferencia de carga en Ag@ Compuestos Cu₂O-rGO. *Madre. Química. Física.* 2023, 301, 127621. [\[Referencia cruzada\]](#)
30. Hanafi, MF; Sapawe, N. Efecto de la concentración inicial sobre la degradación fotocatalítica del tinte azul brillante Remazol utilizando Catalizador de níquel. *Madre. Hoy Proc.* 2020, 31, 318–320. [\[Referencia cruzada\]](#)
31. Reza, KM; Kurny, A.; Gulshan, F. Parámetros que afectan la degradación fotocatalítica de tintes utilizando TiO₂ : una revisión. *Aplica. Ciencia del agua.* 2017, 7, 1569–1578. [\[Referencia cruzada\]](#)
32. Mansfeldova, V.; Zlamalova, M.; Tarabkova, H.; Janda, P.; Vorojta, M.; Piliat, L.; Kavan, L. Función de trabajo de cristales individuales de TiO₂ (anatasa, rutilo y brookita): efectos del medio ambiente. *J. Física. Química. C* 2021, 125, 1902–1912. [\[Referencia cruzada\]](#)
33. Huang, K.; Li, C.; Zheng, Y.; Wang, L.; Wang, W.; Meng, X. Avances recientes en fotocatálisis basada en plata: inhibición de la fotocorrosión, mejora de la respuesta a la luz visible y aceleración de la separación de cargas. *Sep. Purif. Tecnología.* 2022, 283, 120194. [\[Referencia cruzada\]](#)
34. Yadav, AA; Hunge, YM; Kang, S.-W. Nanoestructura de óxido de cobre en forma de bola esponjosa modificada por óxido de grafeno reducido para mejorar la producción de hidrógeno fotocatalítico. *Madre. Res. Toro.* 2021, 133, 111026. [\[Referencia cruzada\]](#)
35. Wu, D.; Liu, H.; Chen, J.; Liu, W.; Histan, G.; Wang, T. Hidrogeles de grafeno reducido 3D microporosos reticulados integrados en NP de Cu como fotocatalizador para la evolución del hidrógeno. *J. Ciencia de la interfaz coloidal.* 2020, 577, 441–449. [\[Referencia cruzada\]](#)

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.