



Artículo de investigación

# Estudio del efecto de la electrodeposición de iones de Ag y Cu en superficies previamente modificadas de acero AISI 304 sobre su susceptibilidad de inhibición antimicrobiana

*Study of the effect of electrodeposition of Ag and Cu ions on previously modified surfaces of AISI 304 steel on its susceptibility to antimicrobial inhibition*



Coraquetzali Magdaleno López , Francisco José Martínez Baltodano , Gregorio Vargas Gutiérrez 

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica No. 1062, Parque Industrial, Ramos Arizpe, Coahuila. México. C.P. 25900

**Autor de correspondencia:** Coraquetzali Magdaleno López, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica No. 1062, Parque Industrial, Ramos Arizpe, Coahuila. México. C.P. 25900. Correo electrónico: [coraquetzalli@cinvestav.mx](mailto:coraquetzalli@cinvestav.mx). ORCID: 0000-0002-9756-5766.

**Recibido:** 8 de Agosto del 2023

**Aceptado:** 16 de Enero del 2025

**Publicado:** 06 de abril del 2026

**Resumen.** - Prevenir la bioincrustación en diferentes ambientes acuosos, sin introducir sustancias tóxicas en el entorno, ha impulsado al desarrollo de nuevas investigaciones. La aplicación de la nanotecnología en la protección contra la bioincrustación se ha impulsado en diversos campos. En el presente trabajo se estudió el mecanismo involucrado en la formación de biopelículas sobre el acero inoxidable AISI 304 previamente modificado con depósito de iones metálicos (Ag y Cu). Las superficies modificadas se caracterizaron mediante diversas técnicas, como difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de energía dispersiva (EDS), ángulo de contacto y rugosidad. De igual forma, se evaluó la actividad microbiana de los sustratos con los electrodepositos de Ag y Cu de acuerdo con la norma ASTM E2562-12. Mediante las micrografías MEB se pudo ver la morfología de los recubrimientos de cobre y de plata en la superficie del acero inoxidable, donde se observó la formación de un depósito homogéneo y bien distribuido de las nanopartículas de Cu y Ag, la composición de estas nanopartículas fue confirmada mediante el análisis de EDS. El análisis DRX confirmó la presencia de Ag y Cu además de la austenita Fe- $\gamma$  (FCC) en la superficie. Esta austenita expandida proporciona elevada resistencia al desgaste y a la corrosión. Por otra parte, las superficies con el depósito de plata mostraron un descenso en la actividad antimicrobiana, esto debido a que la plata interfiere en el metabolismo celular ya sea rompiendo la pared celular o causando alteraciones genéticas en la bacteria que llevan a su muerte.

**Palabras clave:** Electrodeposición; Iones metálicos; Bioincrustación; Biopelículas.

**Abstract.** - Preventing biofouling in different aqueous environments, without introducing toxic substances into the environment, has driven the development of new research. The application of nanotechnology in biofouling protection has been promoted in various fields. In the present work, the mechanism involved in the formation of biofilms on AISI 304 stainless steel previously modified with metal ion deposits (Ag and Cu) was studied. The modified surfaces were characterized by various techniques, such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), contact angle and roughness. Likewise, the microbial activity of the substrates with Ag and Cu electrodeposits was evaluated according to ASTM E2562-12. SEM micrographs showed the morphology of the copper and silver coatings on the stainless-steel surface, where the formation of a homogeneous and well-distributed deposit of Cu and Ag nanoparticles was observed. The composition of these nanoparticles was confirmed by EDS analysis. XRD analysis confirmed the presence of Ag and Cu in addition to Fe- $\gamma$  austenite (FCC) on the surface. This expanded austenite provides high resistance to wear and corrosion. On the other hand, the surfaces with the silver deposit showed a decrease in antimicrobial activity, this is because silver interferes with cellular metabolism either by breaking the cell wall or causing genetic alterations in the bacteria that lead to its death.

**Keywords:** Electroplating; Metal ions; Biofouling; Biofilms.



## 1. Introducción

La bioincrustación marina se refiere a la adhesión de organismos indeseables (bacterias, algas, percebes, etc.) en superficies húmedas [1]. Dado que el océano representa el 71 % de la superficie de la Tierra, muchas regiones se ven afectadas por la bioincrustación. La bioincrustación representa una amenaza potencial para la seguridad de los equipos marinos y se convierte en un desafío para la producción sostenible [2].

La bioincrustación también puede promover la corrosión de las superficies. El asentamiento de organismos incrustantes en las superficies mejora los cambios localizados en el tipo y las concentraciones de iones, los niveles de oxígeno y el pH, lo que puede inducir la biodegradación de los recubrimientos, aumentar la conductividad del líquido y promover reacciones químicas/electroquímicas. Este tipo de corrosión se denomina corrosión influida por microbios (MIC) o biocorrosión [3].

Dado que los recubrimientos antiincrustantes tóxicos se prohibieron a nivel mundial debido a sus impactos negativos en el medio ambiente marino, el desarrollo de recubrimientos antiincrustantes eficientes y respetuosos con el medio ambiente se ha identificado como una necesidad apremiante [4].

La investigación y el desarrollo de una nueva generación de agentes antimicrobianos innovadores y efectivos se han convertido en una necesidad urgente. En esta dirección, la comunidad científica se ha centrado en el estudio de nanomateriales, principalmente nanopartículas (NPs) de base metálica [5]. Las propiedades químicas, físicas y biológicas de las NPs se han mejorado en relación con su área específica, distribución de tamaño y morfología [6]. La síntesis de nanocompuestos con capacidad de controlar la biocorrosión en la superficie del metal pueden permitir una mayor eficiencia de inhibición de la corrosión en forma más rentable y ecológica [7,8]. Diferentes tipos de NPs de base metálica (Ag, Cu,) y no metálica (ZnO, TiO<sub>2</sub>, CuO y NiO) han demostrado buena actividad antimicrobiana [9].

Los aceros inoxidable se utilizan ampliamente por sus propiedades anticorrosivas en diferentes entornos húmedos. Sin embargo, en presencia de agua de mar, los aceros inoxidable son susceptibles a la formación de biopelículas y, en consecuencia, a la bioincrustación y corrosión inducida microbiológicamente [10].

En el presente trabajo de investigación se realizó un estudio de la implantación de NPs metálicas de Ag y Cu con propiedades antimicrobianas en superficies modificadas del acero inoxidable AISI 304, con el fin de desarrollar propiedades antibioincrustantes para su uso en ambientes marinos.

## 2. Metodología

### 2.1 Preparación del sustrato.

Se usaron probetas de acero inoxidable AISI 304, su composición química se muestra en la Tabla 1. A las probetas de acero inoxidable se les aplicó un tratamiento de oxi-nitrocarburo con pastas de cianato y carbonato de sodio a una temperatura de 550 °C durante un tiempo de 20 min [11].



Tabla 1. Composición química porcentual del acero inoxidable AISI 304.

C	S	P	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	Fe	Otros
0.02	0.014	0.044	0.25	1.68	1.76	9.56	18.04	68.2	0.432

## 2.2 Proceso de Electrodeposición

### 2.2.1. Determinación del potencial de reducción.

Posterior al tratamiento de oxi-nitrocarburation, se realizaron pruebas electroquímicas por medio de la técnica de voltamperometría cíclica (VC) para obtener el potencial de electrodeposición de iones de Ag y Cu en un electrolito de etalina ( $\text{HOC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{Cl}^-$ ). Se utilizó un potenciostato/galvanostato de la marca PARSTAT 4000®, conectado a una celda tradicional de tres electrodos de 30 ml en la cual el electrodo de trabajo fue un disco de acero inoxidable oxi-nitrurado, el contraelectrodo fue de platino y el electrodo de referencia fue de  $\text{Ag}/\text{Ag}^+$ . Se usó una velocidad de barrido de 10 mV/s, el electrolito se mantuvo a una temperatura de 25 °C sin agitación.

**Deposición.** Una vez que se obtuvo el valor del potencial de reducción, se procedió a realizar el electrodeposición mediante la técnica de cronoamperometría (CA). La cronoamperometría se realizó a un tiempo de 20 min. Finalizada la electrodeposición se enjuagó la superficie, se secó por convección y se almacenó para las pruebas de caracterización.

### 2.3 Caracterización química y microestructural

Las superficies modificadas fueron caracterizadas mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB) de emisión de campo marca PHILIPS, modelo XL30ESEM. Se realizaron mapeos elementales de las especies depositadas de Ag y Cu. Para determinar la química superficial de los depósitos se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX).

### 2.4 Caracterización de la actividad microbiana

Se evaluó la actividad microbiana de los sustratos con los electrodeposiciones de Ag y Cu según la norma ASTM E2562-12 [12]. Se utilizaron *Pseudomonas aeruginosa* gramnegativas ATCC 27588 en agar soya tripticaseína (TSA). Posteriormente se cultivó en agitación a 120 rpm por 16 h en medio de caldo de soya tripticaseína (TSB) a una concentración de 300 mg/L sobre cupones limpios de 1 cm de diámetro. Se utilizó un reactor (ISBR600) en el cual se adicionó el inóculo, ajustando un volumen final de 1000 mL con medio TSB a 300 mg/L. Los cupones fueron colocados en el reactor en condiciones “Batch” a 75 rpm a temperatura ambiente. Después de un día el reactor paso a una fase continua haciendo pasar 11 mL de medio TSB por minuto a una concentración de 100 mg/L durante un tiempo de 24 h, además se verificó la fluorescencia de *P. aeruginosa*. Terminado el cultivo en fase continua, se retiraron los cupones y se enjuagaron con solución salina estéril de 0.85% para eliminar las células bacterianas suspendidas. Los cupones fueron colocados en tubo falcón de 15 mL y se adicionó solución salina hasta cubrir el material. Posteriormente se realizó un desprendimiento de las biopelículas con cinco ciclos de Vortex-sonicación por 30 s. La biopelícula suspendida se plaqueó por el método de vertido en placa para determinar las



unidades formadoras de colonias (UFC) adheridas a los cupones, vertiendo las diluciones  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  para los cupones con un diámetro de 1.3 cm y las diluciones  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  para los cupones de 1 cm. El conteo de las CFU se realizó usando la ecuación 1.

$$\text{Log}_{10} (\text{CFU}/\text{cm}^2) = \text{Log}_{10} [(X/B)(V/A)(D)] \quad (1)$$

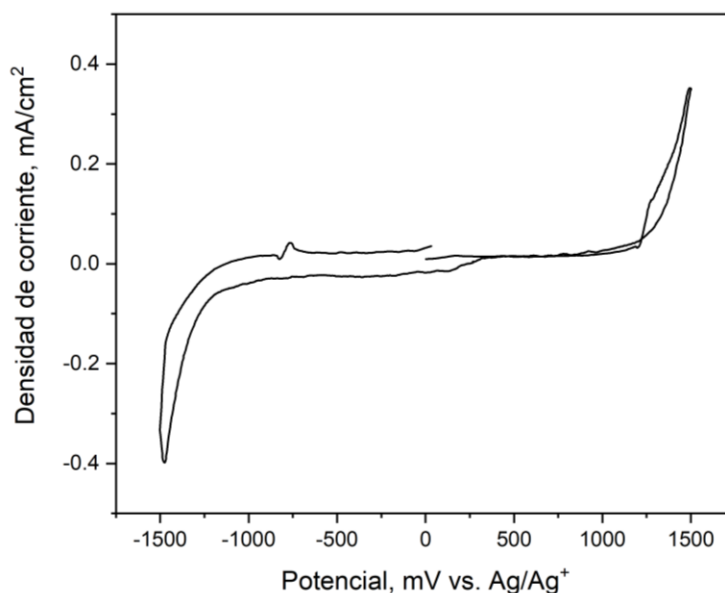
Donde,

- X: Unidad formadora de colonias, CFU
- B: Volumen plaqueado,  $\text{cm}^3$
- V: Volumen raspado,  $\text{cm}^3$
- A: Área superficial raspada,  $\text{cm}^2$
- D: Dilución

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Determinación del potencial de reducción por VC

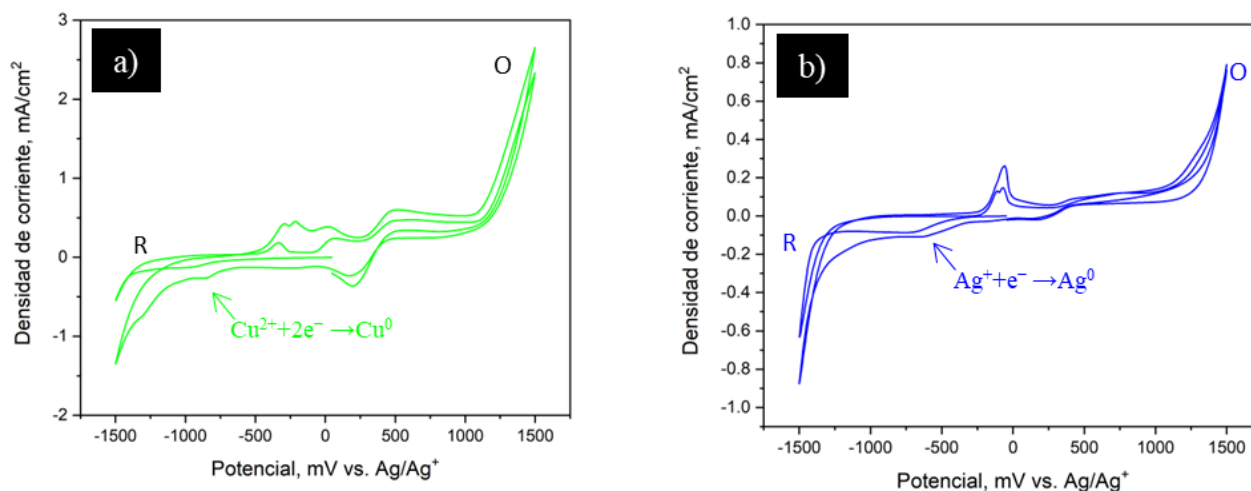
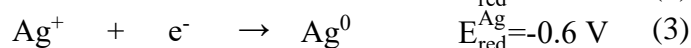
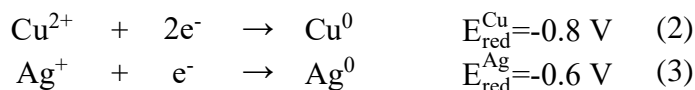
Un criterio clave para la selección de un solvente para estudios electroquímicos es la estabilidad electroquímica de dicho solvente [13] ya que en dicho intervalo el electrolito es electroquímicamente inerte. En la Figura 1 se observa que la ventana de potencial electroquímico para la etalina ( $\text{HOC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{Cl}^-$ ) se encuentra aproximadamente entre 1.0 y -1.0 mV, lo que implica que la ventana de potencial del acero inoxidable AISI 304 oxi-nitrocarburado es de alrededor de 2.0 V, a una temperatura ambiente de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  y una velocidad de escaneo de  $10\text{ mVs}^{-1}$ . Dicho intervalo corresponde a lo observado para el mismo electrolito por Popescu y col., 2011 [14].



**Figura 1.** Voltamograma cíclico del acero inoxidable AISI 304 oxi-nitrocarburado por pastas en electrolito de etalina (1 ChCl:2 EG).



En la Figura 2 se presentan los voltamperogramas cíclicos correspondientes a los electrolitos con cobre y con plata obtenidos a una velocidad de escaneo de 10 mVs<sup>-1</sup>. En esta figura se observan los eventos de reducción del cobre a un potencial de -800.0 mV (Eq. 2) y de la plata a un potencial de -600 mV (Eq. 3).

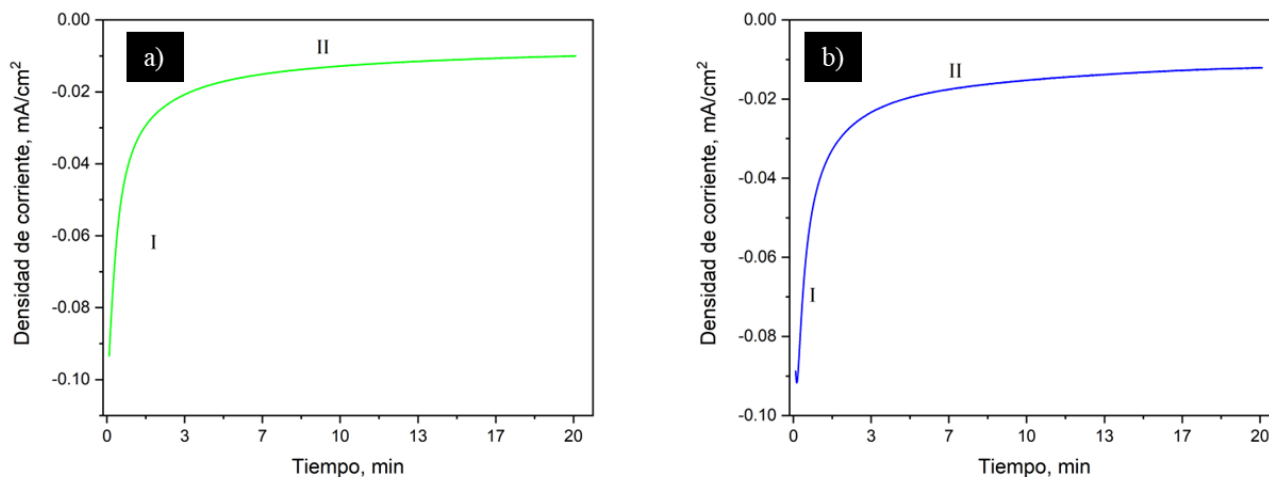


**Figura 2.** Voltamogramas cíclicos del acero inoxidable AISI 304 oxi-nitrocarburado en electrolito de etalina (1 ChCl:2 EG) con sal precursora de: a) nitrato de cobre (Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) 10mM; b) nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub>) 10mM.

### 3.2 Electrodeposición metálica.

Una vez que se determinó la ventana de potencial y se determinó en que potencial ocurre la reducción de los iones metálicos se realizaron los electrodeósitos por cronoamperometría para encontrar el tiempo máximo en el que la densidad de corriente es estable, ya que mediante el control del tiempo es posible fijar la cantidad de material depositado.

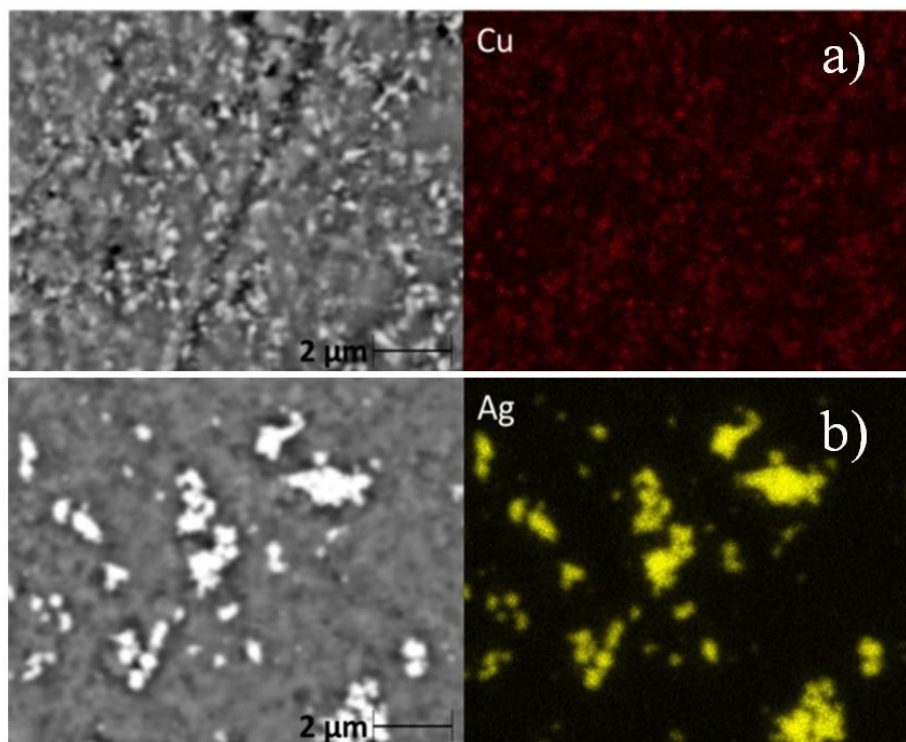
En la Figura 3a se observa la curva obtenida por cronoamperometría del acero inoxidable AISI 304 modificado usando el electrolito de etalina con sal de nitrato de cobre (Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) 10mM. En este caso, el tiempo de estabilización fue de 10 min. En el caso del electrolito formado por etalina con el nitrato de plata (AgNO<sub>3</sub>) 10mM (Figura 3b) se observa que el tiempo de estabilización fue de 7 min. Estos tiempos corresponden a los tiempos máximos de deposición, ya que, como se mencionó anteriormente se busca limitar el crecimiento del recubrimiento sobre la superficie.



**Figura 3.** Cronoamperometría del AISI 304 oxi-nitrocarburado en electrolito de etalina (1 ChCl:2 EG) con sal precursor de: a) nitrato de cobre ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ) 10mM y potencial de -800 mV; b) nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) 10mM y potencial de -600 mV.

### 3.3 Caracterización química y microestructural

La Figura 4a) muestra el mapeo elemental del depósito de cobre, en la cual se puede ver la morfología de las nanopartículas de cobre sobre la superficie del acero inoxidable AISI 304 oxi-nitruado. Se observa la formación de un depósito disperso y homogéneo y bien distribuido sobre la superficie.



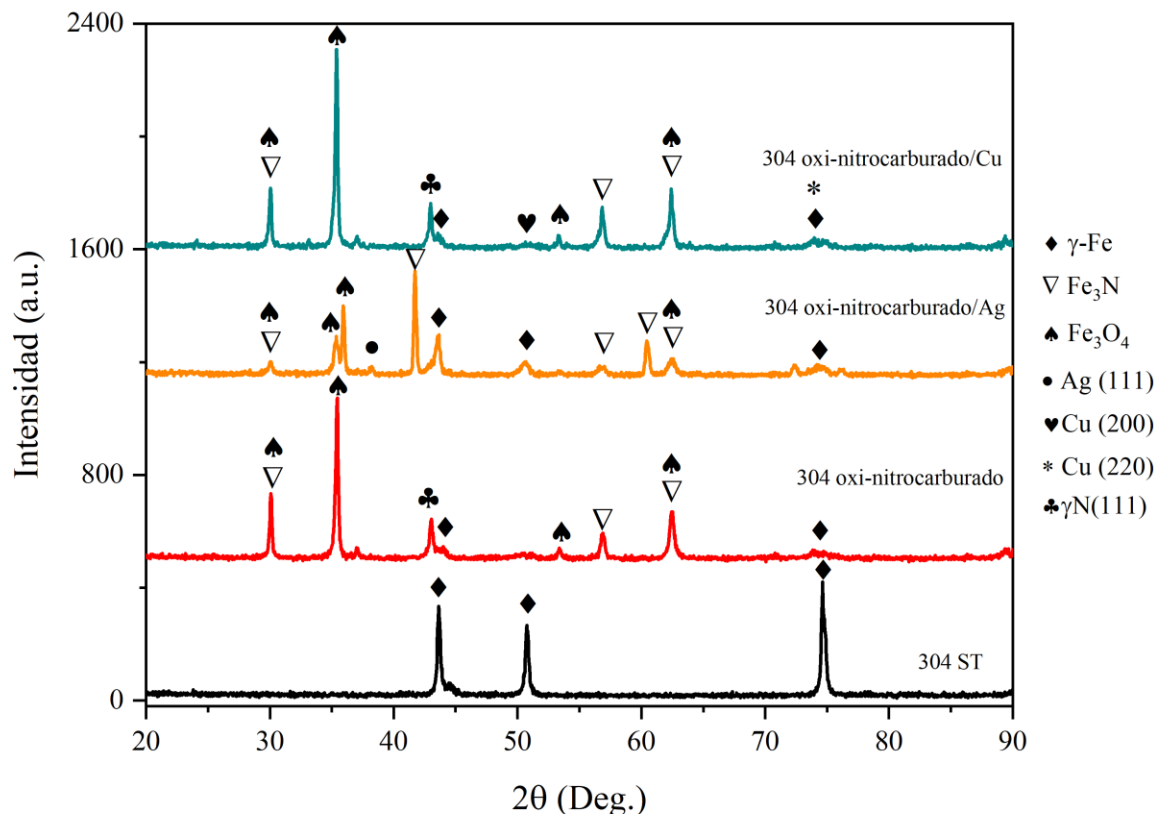
**Figura 4.** Análisis por mapeo elemental por rayos X del acero inoxidable AISI 304 oxi-nitrocarburado, a) con depósito de Cu por 20 min a un potencial de -800 mV, b) con depósito de Ag por 20 min a un potencial de -600 mV.



La Figura 4b) muestra el mapeo elemental del depósito de plata sobre la superficie del acero inoxidable AISI 304 oxi-nitrurado. El recubrimiento resultante muestra formación de aglomerados, dejando partes del sustrato sin recubrir. Esta formación de aglomeraciones se atribuye al tiempo de electrodeposición, por lo que se buscará reducir el tiempo de depósito para obtener un depósito más homogéneo y disperso [15].

La Figura 5 muestra los difractogramas de rayos X de la superficie de un acero inoxidable sin tratamiento, del acero inoxidable oxi-nitrocarburado y de la superficie del acero inoxidable oxi-nitrocarburado con depósitos de plata y de cobre.

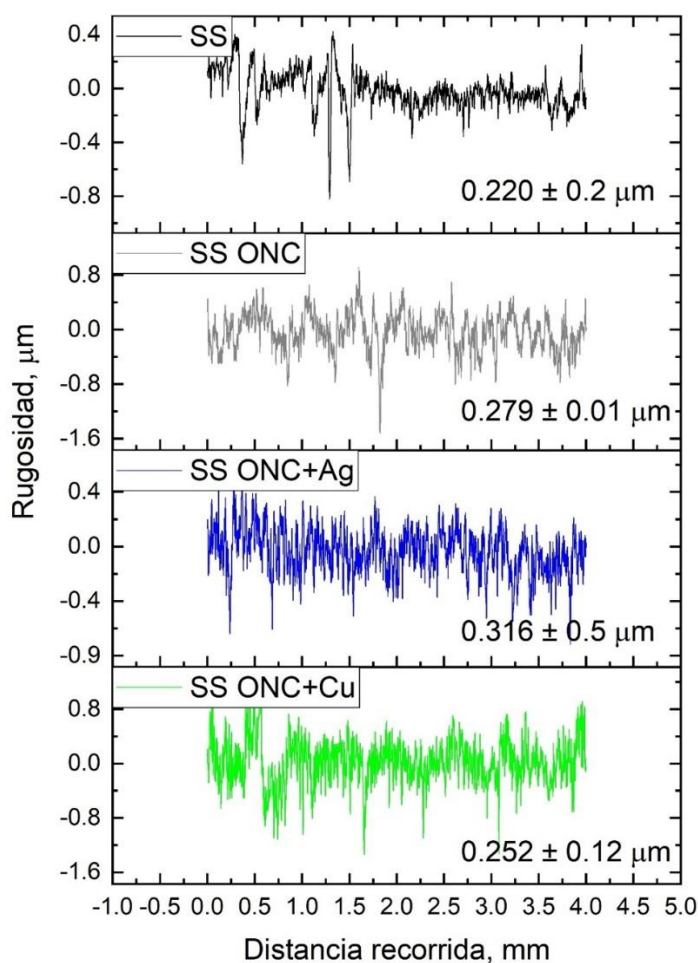
El análisis confirma la presencia de austenita Fe- $\gamma$  (FCC) en la superficie del acero sin tratamiento al igual que en la muestra oxi-nitrocarburada. Después del tratamiento de oxi-nitruración, se detectó nitruro de hierro ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y austenita expandida [ $\gamma\text{N}$  (111)]. Esta austenita expandida proporciona elevada resistencia al desgaste y a la corrosión [11]. En los patrones de difracción de la superficie de acero inoxidable oxi-nitrocarburada y con el depósito de iones de Ag y Cu se confirmó la presencia adicional de las señales de Ag (111) en  $38.1^\circ$  y Cu (200) en  $50.37^\circ$ , lo que corrobora que si se está realizando el depósito.



**Figura 5.** Difractogramas de rayos X del acero inoxidable AISI 304 sin tratamiento y después del tratamiento de oxi-nitrocarburation de los depósitos de plata y cobre.



La rugosidad superficial se refiere a las variaciones en altura con respecto a un plano de referencia [16]. En la Figura 6 se muestran los valores de rugosidad media para los diferentes tratamientos estudiados, donde se observa que la superficie del acero oxi-nitrocarburado con el depósito de plata presenta el mayor valor de rugosidad ( $0.316 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ), probablemente esto se atribuya a los aglomerados que se forman en la superficie. Posteriormente le sigue la superficie oxi-nitrocarburada con una rugosidad de  $0.279 \pm 0.01 \mu\text{m}$ , la superficie con el depósito de cobre con una rugosidad de  $0.252 \pm 0.12 \mu\text{m}$  y por último el acero inoxidable sin tratamiento con un valor de rugosidad de  $0.220 \pm 0.2 \mu\text{m}$ . La rugosidad de la superficie modificada con el tratamiento de oxi-nitrocarburation con respecto al acero inoxidable sin tratamiento se puede atribuir a la alta tasa de carbonización además que probablemente esté asociado con la microsegregación de granos debido a la formación de precipitados. En la figura SEM del acero AISI 304 nitrurado a  $580 \text{ }^\circ\text{C}$  con mayor aumento, (consulte la Fig. 4), revela que los precipitados de tamaño micrométrico se encuentran principalmente en los límites de grano y, al mismo tiempo, también están presentes algunos precipitados intragranulares. La geometría y la textura superficial en este tipo de superficies es de gran importancia, ya que gran parte de su capacidad antibacteriana depende de estos parámetros.



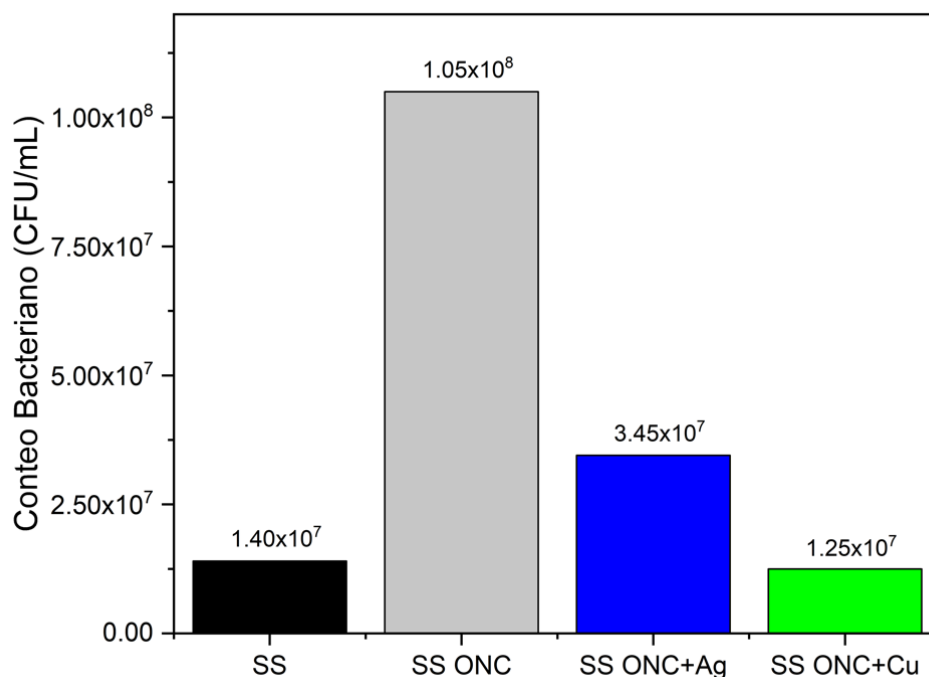
**Figura 6.** Rugosidad media del acero inoxidable sin tratamiento, oxi-nitrocarburado (ONC) y ONC más depósitos de Ag y Cu.



### 3.4 Caracterización de la actividad microbiana

Para analizar el efecto antibacteriano de la superficie del acero inoxidable AISI 304, se comparó el conteo de las unidades formadoras de colonias (UFC) de la sepa de *P. aeruginosa* en diferentes superficies tratadas en comparación con la superficie del acero sin tratamiento. En la Figura 7 se observa un conteo de  $1.40 \times 10^7$  UFC/mL para la muestra de acero inoxidable sin tratamiento, en cuanto a las superficies oxi-nitrocarbурadas se observa un aumento significativo en el conteo esto debido al aumento en la rugosidad de estas superficies, lo que beneficia la adherencia de los microorganismos a esta superficie, esto corresponde con el comportamiento de la rugosidad en ambas superficies, teniendo un aumento significativo en la superficie oxi-nitrocarbурadas. Este resultado muestra que el proceso de oxi-nitrocarbурación no mejoró el desempeño antimicrobiano.

Las superficies con el depósito de plata en un sustrato oxi-nitrocarbурado mostraron un descenso en la actividad antimicrobiana, esto debido a que la plata interfiere en el metabolismo celular ya sea rompiendo la pared celular o causando alteraciones genéticas en la bacteria que llevan a su muerte [17]. La superficie con depósito de cobre mostró el menor conteo de unidades formadoras de colonias debido a la generación de especies reactivas de oxígeno que dañan irreversiblemente las membranas de la pared celular [18]. En las condiciones estudiadas, el recubrimiento del cobre mostró el mejor desempeño antimicrobiano. Esto debido a la dispersión más homogénea y libre de aglomerados que se observaron en las micrografías.



**Figura 7.** Representación gráfica de la actividad antibacteriana de las superficies de acero inoxidable sin tratamiento, con tratamiento de oxi-nitrocarbурación y con tratamiento de oxi-nitrocarbурación + electrodepositos de plata y cobre.

Esta investigación tiene como aportación obtener una superficie con propiedades multifuncionales. Los electrodepositos en superficies que previamente fueron modificadas y tuvieron una mejoría en la resistencia a la corrosión y el desgaste gracias a la oxi-nitrocarbурación, la adición de nanopartículas, las



cuales garantizan las propiedades antimicrobianas, lo que sumado a la etapa anterior deja cubierto los tres fenómenos relacionados con la bioincrustación (corrosión electroquímica, desgaste y corrosión inducida microbiológicamente).

#### 4. Conclusiones

Las superficies con el depósito de Cu resultaron en una morfología dispersa y homogénea, esto se puede confirmar en las micrografías y el mapeo elemental; mientras que en los depósitos de Ag se forman aglomerados, por lo cual es necesario hacer uso de un dispersante catiónico para mejorar la distribución homogénea de las NPs de Ag. La adición de nanopartículas de plata y cobre redujeron el conteo de unidades formadoras de colonias siendo el cobre el que menor actividad microbiana presentó, esto debido a la dispersión más homogénea y libre de aglomerados que se observaron en las micrografías. Posteriormente a la evaluación antimicrobiana realizada a nivel laboratorio, se pretende realizar la selección de muestras del acero inoxidable AISI 304 con las NPs depositadas (cupones) con mejor comportamiento, para ser evaluadas en ambientes marinos y corroborar su eficiencia frente a los micro y macroorganismos presentes en el mar.

#### 5. Agradecimientos

A CONAHCyT por su apoyo financiero a través del Proyecto Ciencia Frontera # 2019-845101, "Descubrimiento Acelerado de Materiales Antiincrustantes (DAMA)".

#### 6. Reconocimiento de autoría

*Coraquetzali Magdaleno López*: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data curation, Writing – original draft, Visualization. *Francisco José Martínez Baltodano*: Methodology, Validation, Formal analysis, Resources, Writing – review & editing. *Gregorio Vargas Gutiérrez*: Supervision, Project administration, funding acquisition, Writing – review & editing.

#### Referencias

1. L. Tian, Y. Yin, H. Jin, W. Bing, E. Jin, J. Zhao and L. Ren, "Novel marine antifouling coatings inspired by corals", *Materials Today Chemistry*, vol. 17, pp. 100294, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100294>
2. H. Jin, L. Tian, W. Bing, J. Zhao, and L. Ren, "Toward the application of graphene for combating marine biofouling", *Advanced Sustainable Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 2000076, 2021.  
<https://doi.org/10.1002/adsu.202000076>
3. B. J. Little, D. J. Blackwood, J. Hinks, F. M. Lauro, E. Marsili, A. Okamoto, and H.C. Flemming, "Microbially influenced corrosion-Any progress?", *Corrosion Science*, vol. 170, pp. 108641, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
4. J.A. Lewis, "Battling biofouling with, and without, biocides", *Chemistry in Australia*, pp. 26-29, 2018.



5. G.V. Vimbela, S.M. Ngo, C. Frazee, L. Yang, and D.A. Stout, "Antibacterial properties and toxicity from metallic nanomaterials", *International journal of nanomedicine*, vol. 12, pp. 3941-3965, 2017. <https://doi.org/10.2147/IJN.S134526>
6. A. Singh, P.K. Gautam, A. Verma, V. Singh, P.M. Shivapriya, A. Shivalkar, and S.K. Samanta, "Green synthesis of metallic nanoparticles as effective alternatives to treat antibiotics resistant bacterial infections: A review", *Biotechnology Reports*, vol. 25, pp. e00427, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00427>
7. O. Mařátková, J. Michailidu, A. Miřkovská, I. Kolouchová, J. Masák, and A. Čejková, "Antimicrobial properties and applications of metal nanoparticles biosynthesized by green methods", *Biotechnology Advances*, vol. 58, pp. 107905, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107905>
8. J. Becerra, P. Ortiz, A.P. Zaderenko, and I. Karapanagiotis, "Assessment of nanoparticles/nanocomposites to inhibit micro-algal fouling on limestone façades", *Building Research & Information*, vol. 48 no. 2, pp. 180-190, 2020. <https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1609233>
9. M. Guerrero Correa, F.B. Martínez, C.P. Vidal, C. Streitt, J. Escrig, and C.L. de Dicastillo, "Antimicrobial metal-based nanoparticles: a review on their synthesis, types and antimicrobial action", *Beilstein journal of nanotechnology*, vol. 11, pp. 1450-1469, 2020. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.129>
10. B.J. Little, and J.S. Lee, "Microbiologically Influenced Corrosion. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", USA. John Wiley & Sons, Inc., Wiley Online Library, Hoboken, 2009. <https://doi.org/10.1002/0471238961.micrlitt.a01>
11. L. López, and G. Vargas, "High wear resistance and better pitting corrosion resistance of AISI 316L stainless steel by a self-protective oxy-nitrocarburizing paste", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 16, pp. 1803-1813, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.118>
12. ASTM, Standard Test Method for Quantification of Pseudomonas aeruginosa Biofilm Grown with High Shear and Continuous Flow using CDC Biofilm Reactor (E2562-12), 2017.
13. Abbas, Q. & Binder, L. (2010). Synthesis and Characterization of Choline Chloride Based Binary Mixtures. *ECS Transactions*. 33 (7): 49-59. <https://doi.org/10.1149/1.3484761>
14. A.M. Popescu, V. Constantin, A. Cojocaru, and M. Olteanu, "Electrochemical Behaviour of Copper (II) Chloride in Choline Chloride-urea Deep Eutectic Solvent", *Rev. Chim*, vol. 62, no. 2, pp. 206-211, 2011.
15. B. Khodashenas, and H.R. Ghorbani, "Synthesis of silver nanoparticles with different shapes", *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, no. 8, pp. 1823-1838, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.014>



16. B. Bhu shan, "Principles and Applications of Tribology". (Second Edition). John Wiley & Sons, Ltd, pp.993, 2013.
17. W. Sim, R.T. Barnard, M.A.T. Blaskovich, and Z.M. Ziora, "Antimicrobial Silver in Medicinal and Consumer Applications: A Patent Review of the Past Decade (2007-2017)", Antibiotics (Basel), vol. 7, no. 4, pp. 93, 2018. <https://doi.org/10.3390/antibiotics7040093>
18. I. Salah, I.P. Parkin, and E. Allan, "Copper as an antimicrobial agent: recent advances", RSC Advances, vol.11, no. 30, pp. 18179-18186, 2021. <https://doi.org/10.1039/D1RA02149D>

Derechos de Autor (c) 2026 Coraquetzali Magdaleno López, Francisco José Martínez Baltodano, Gregorio Vargas Gutiérrez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)