



EFFECTO ANTIMICROBIANO DE LAS FIBRAS DE *Vicugna pacos* “alpaca” FUNCIONALIZADAS CON NANOPARTÍCULAS DE PLATA

ANTIMICROBIAL EFFECT OF *Vicugna pacos* “ALPACA” FIBERS FUNCTIONALIZED WITH SILVER NANOPARTICLES

Juan Javier Pedro Huaman^{1*}, Gina Genara Zavaleta Espejo^{1,2}, Hector Anibal Felix Quintero², Segundo Rosalí Jáuregui Rosas², José Antonio Saldaña Jiménez^{1,2}, Elsi Violeta Mejía Uriarte³, Karen Alexandra Tafur Trujillo¹,
Claudia Maricel Soto Varas¹


¹Facultad de Ciencias Biológicas Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n - Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.


²Grupo Multidisciplinario de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo.

³Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México.


J. Pedro:  <http://orcid.org/0000-0001-6230-3670>

G. Zavaleta:  <http://orcid.org/0000-0001-9087-6767>

H. Felix:  <http://orcid.org/0000-0002-1733-5451>

S. Jáuregui:  <http://orcid.org/0000-0001-9817-3214>

E. Mejía:  <http://orcid.org/0000-0001-6474-2132>

J. Saldaña:  <http://orcid.org/0000-0001-6111-0869>

K. Tafur:  <http://orcid.org/0000-0001-7239-3737>

C. Soto:  <http://orcid.org/0000-0001-5651-1035>

Artículo original

Recibido: 04 de mayo 2022

Aceptado: 25 de junio 2022

Resumen

Las fibras de *Vicugna pacos* “alpaca” se han utilizado por los pobladores del Ande peruano desde tiempos inmemoriales como materia prima para la industria textil. Sin embargo, en el mundo globalizado, necesita un valor agregado que le permita competir con otras materias primas como algodón, seda, lana, entre otras. La nanotecnología permite cambiar las propiedades de los materiales mediante la incorporación de nanopartículas a su superficie, proceso conocido como funcionalización. Nuestro objetivo investigativo determinó el efecto antimicrobiano de fibras de alpaca funcionalizadas con nanopartículas de plata (AgNPs) sintetizadas por vía química, con diferentes concentraciones de citrato trisódico. Utilizando la metodología AATCC 100 modificada, evaluamos dicho efecto sobre las cepas bacterianas de *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus* expuestas a fibras café oscuro brillante. Los resultados cualitativos y cuantitativos señalan que son superiores los tratamientos de 6 y 10 mg de citrato trisódico. Por lo tanto, se infiere que las fibras funcionalizadas presentan un adecuado efecto antibacteriano siendo una alternativa promisoría para la industria textil peruana.

Palabras clave: AATCC 100, citrato trisódico, fibras de alpaca; funcionalización; nanotecnología.

Abstract

The fibers of *Vicugna pacos* “alpaca” have been used by the inhabitants of the Peruvian Andes since time immemorial as a raw material for the textile industry. However, in a globalized world, it needs an added value that allows it to compete with others raw materials such as cotton, silk, wool, among others. Nanotechnology allows changing the properties of materials by incorporating nanoparticles on their surface, a process known as functionalization. The investigative objective was to determine the antibacterial effect of alpaca fibers functionalized with chemically synthesized silver nanoparticles, with different concentrations of trisodium citrate. Using the modified AATCC 100 methodology, the effect on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* exposed to shiny dark brown fibers was evaluated. The qualitative and quantitative results indicate that the treatments of 6 and 10 mg of trisodium citrate are better than the others. Therefore, it is inferred that functionalized fibers have an adequate antibacterial effect, being a promising alternative for the Peruvian textile industry.

Keywords: AATCC 100, alpaca fibers, functionalization, nanotechnology, trisodium citrate.

* Autor para correspondencia: E. mail: jpedro@unitru.edu.pe

DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2022.42.01.04>

Citar como:

Pedro, J., Zavaleta, G., Félix, H., Jáuregui, S., Mejía, E., Saldaña, J., Tafur, K. & Soto, C. 2022. Efecto antimicrobiano de las fibras de *Vicugna pacos* “alpaca” funcionalizadas con nanopartículas de plata. (Perú) 2022. REBIOL, 42(1): 29-38.



1. Introducción

En la actualidad, la nanotecnología y la nanociencia se constituyen como campos de investigación multidisciplinarios de gran relevancia que proporciona una amplia variedad de tecnologías avanzadas que incluyen medicina, electrónica y medioambiental (Abdel-Mohsen et al., 2013; Ebrahimzadeh et al., 2019; Mortazavi-Derazkola et al., 2019).

La búsqueda de nuevas alternativas para el control de enfermedades causadas por agentes infecciosos como las bacterias se ha convertido en una de las principales metas de investigación en la actualidad debido al impacto que tienen sobre la salud dichos microorganismos (Ul et al., 2019). Adicionalmente, existen trabajos que se basan en la utilización de la síntesis química para la funcionalización de textiles, utilizando por ejemplo plantas, bacterias y otros microorganismos para reemplazar a los agentes reductores químicos usados de manera tradicional. Aunque el impacto que esto representaría en la industria, evaluado desde la perspectiva del medio ambiente, resulta bastante benéfico. La manipulación de las propiedades de las nanopartículas obtenidas mediante estos métodos resulta muy difícil debido a que los microorganismos, plantas entre otros, no se pueden manipular de la misma manera que se manipulan los factores que intervienen en una reacción, por lo cual a pesar de obtener nanopartículas estas no se pueden diseñar a la medida de nuestras necesidades. Debido a esto se debe seguir trabajando en métodos que permitan obtener una síntesis mucho más amigable con el medio ambiente, pero con las bondades de poder controlar el proceso en sí (Ballottin et al., 2017). Las fibras naturales son ampliamente utilizadas en la fabricación de telas, como los productos de seda. Sin embargo, las fibras textiles naturales son propensas al ataque microbiano (Jagajjani & Korumilli, 2020).

El interés por lograr un acabado antimicrobiano de materiales textiles que sea eficiente, no tóxico, duradero y rentable aumenta rápidamente. La reducción del crecimiento bacteriano en textiles es muy importante, puesto que las bacterias y otros microorganismos no únicamente dañan el material, sino que también pueden afectar el confort que brindan las vestimentas (Perera et al., 2013).

Las nanopartículas de oro, plata y platino tienen frecuentes aplicaciones medicinales (Küp et al., 2020). Las AgNPs tienen una amplia gama de aplicaciones en áreas de medicina, nanosensores, química de alimentos, agricultura, empaque de alimentos, cosméticos y textiles. Por lo cual, el uso de las AgNPs se está generalizando entre los productos de uso cotidiano (Ebrahimzadeh et al., 2019; Küp et al., 2020; Paździor et al., 2018; Srisod et al., 2018; Torbat & Javanbakht, 2019).

Se ha considerado el uso de compuestos de plata para conferir propiedades antibacterianas en superficies de textiles, aunque presenta una desventaja debido a que el recubrimiento de textiles con sales de plata los colorea a un tono marrón negruzco, debido a un proceso de reducción que no se puede evitar cuando entra en contacto con el aire o agua. Por lo tanto, utilizar nanopartículas de plata es más recomendable para revestimientos textiles puesto que son más estables y están recubiertas evitando así la reducción que cambia su color (Srisod et al., 2018). Las AgNPs tienen propiedades electrónicas, catalíticas y antibacterianas que las posicionan como las más usadas. Las microfibras recubiertas con nanopartículas muestran mayor acción antimicrobiana que las microfibras normales debido a su amplia área superficial (Aktürk et al., 2019).

El uso de la nanotecnología en un textil integra la multifuncionalidad al textil y crea nuevas propiedades del material como durabilidad, suavidad y resistencia a las arrugas, sin afectar los atributos textiles (Abid et al., 2017). Las aplicaciones de fibras funcionalizadas para la confección de ropas, cicatrización de heridas y médicas en hospitales, al igual que en otros lugares donde las bacterias presentan un peligro, son de relevante importancia.

El presente trabajo se realizó con la motivación de conferir actividad antimicrobiana a las fibras de *Vicugna pacos* "alpaca" mediante la funcionalización con AgNPs como alternativa para brindarle valor agregado a los textiles que se fabriquen con dichas fibras. El objetivo principal de la investigación es determinar el efecto antimicrobiano de las fibras de alpaca funcionalizadas con nanopartículas de plata.

1. Materiales y Métodos

Material Biológico

Cepas de *Escherichia coli* ATCC 25922, *Staphylococcus aureus* ATCC 29523 certificadas y fibra café oscuro brillantes de *Vicugna pacos* "alpaca".

Nanomaterial

Fibras de alpaca café brillantes funcionalizadas con nanopartículas de plata sintetizadas mediante una ruta química basada en el uso de agentes reductores como el Citrato Trisódico (TSC).

Tamaño Muestral

El tamaño muestral fue calculado en base a los tratamientos y el número de repeticiones. En este experimento, se empleó 6 tratamientos en dos bloques formados por las diferentes bacterias. Cada tratamiento constó de 3 repeticiones dándonos un total de 36 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo compuesta por las bacterias que se han desarrollado en un tubo de ensayo. La asignación de los tratamientos se realizó de manera aleatoria dentro de los bloques.

Diseño de Investigación

Se realizó un estudio experimental tipo experimento puro puesto que se consideró el grupo control además de los tratamientos, así como una medida pre y postest. Se utilizó un diseño en bloques completamente al azar, donde los tratamientos consistieron en las variaciones de la concentración de citrato trisódico utilizado en la síntesis de nanopartículas de plata (6 niveles incluyendo un blanco con únicamente medio de cultivo, otro con bacteria y medio de cultivo, así como, un control negativo en base a únicamente fibras de alpaca) (Kelly & Johnston, 2011) y los bloques formados por las cepas bacterianas utilizadas *Escherichia coli* y *Staphylococcus aureus*, se realizaron tres repeticiones.

Procedimiento

El procedimiento utilizado para el desarrollo de la presente investigación consideró los siguientes pasos:

Reactivación de las cepas

Las cepas de bacterias estuvieron conservadas en caldo Nutritivo con glicerol a -80°C. Para la reactivación, se sacaron frascos con bacterias de la ultracongeladora, se tomó de cada una de ellas 100 µL y se agregaron en 10 mL

de caldo Infusión Cerebro Corazón (BHI) que fueron incubados a 37°C por 24 horas. A partir de estos tubos, se tomaron muestras al azar, se sembraron en placas Petri con agar nutritivo y se incubaron a 37°C por 1 día para que alcancen la dinámica de crecimiento.

Evaluación de actividad antimicrobiana

Se realizó una modificación del método de prueba estándar de la actividad antimicrobiana de textiles revestidos AATCC-100 (American Association of Textile Chemists and Colorists-100/Evaluación de la actividad antimicrobiana en tejidos) en este tipo de ensayos se utilizan pequeños cortes de tela o tejido funcionalizados a los cuales se les inocula con la cepa bacteriana a evaluar y luego se le agrega una sustancia neutralizante y se realiza la siembra para el posterior conteo de colonias (Pinho et al., 2010); a dicha prueba se le realizó una modificación para trabajar con fibras en lugar de tela. Fueron utilizadas dos cepas bacterianas: *Escherichia coli* ATCC 25922 y *Staphylococcus aureus* ATCC 29523 (American Type Culture Collection). La prueba inició con la reactivación y siembra de las cepas bacterianas en agar nutritivo por un período de 24 horas para que alcancen un estado de competencia. Posteriormente, en la cabina de bioseguridad se preparó un inóculo con las bacterias en solución salina fisiológica equivalente a la escala 0,5 de McFarland, correspondiente a una concentración de $1,5 \times 10^8$ UFC/mL que sirve como estándar para el ensayo, del cual se tomó 10 µL del inóculo y se combinaron con 990 µL de caldo Müller Hinton donde se agregaron las fibras de alpaca con y sin funcionalizar de acuerdo con el orden aleatorio asignado para los tratamientos. Luego se colocaron en incubación a 37°C por un período de 24 horas. A continuación, se realizó siembra por superficie en placas con agar nutritivo de diluciones en serie de cada repetición y se incubaron por un período de 24 horas. Finalmente, se aplicó la técnica de Recuento en placa y se calculó la reducción de crecimiento bacteriano de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Reducción (\%)} = (C_i - C_f / C_i) \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

Donde C_i son las colonias contadas antes de entrar en contacto con las fibras de alpaca y C_f son las colonias contadas con las fibras de alpaca funcionalizadas con AgNPs (El-Naggar et al., 2017; Ilić et al., 2009; Li et al., 2017; Noorian et al., 2019; Nourbakhsh et al., 2017; Rana et al., 2016).

3. Resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos se ordenaron en tablas y figuras para facilitar su visualización y mejorar su comprensión, los cuales fueron procesados con el software libre R versión 4.2.0. Las figuras 1 y 2 muestran los resultados del ensayo antibacteriano a nivel de tubos de ensayo, donde se pudo analizar de manera visual el crecimiento bacteriano mediante la turbidez, a mayor turbidez se tuvo un mayor crecimiento bacteriano, teniendo como referente el tubo blanco donde no hubo crecimiento. Adicionalmente, las figuras 3 y 4 presentan un gráfico de distribución de las medias de la reducción del crecimiento bacteriano causadas por los diferentes tratamientos para *E. coli* y *S. aureus* donde se puede apreciar adicionalmente el valor porcentual de dichas medias para las 3 diferentes concentraciones de TSC. Para *E. coli* observamos que el mayor valor de reducción de crecimiento se obtuvo para la concentración de 6 mg de TSC con 99,97% y el menor valor de 20,88% se obtuvo para la concentración de 2 mg de TSC. De igual forma, para *S. aureus* se tuvo el mayor porcentaje de reducción

de crecimiento para la concentración de 6 mg de TSC con un valor de 96,07% que resulto ser menor que el observado en *E. coli* y con el menor porcentaje para la concentración de 2 mg de TSC con un valor obtenido de 35,12%. La Tabla 1 nos presenta el análisis de varianza de las medias de los tratamientos aplicados a ambas cepas bacterianas, donde se determinó que existen diferencias significativas debido a los tratamientos ($p < 0,05$) mientras que no existe diferencias significativas entre los bloques. Por lo tanto, se realizó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey con un $p = 0,05$ donde se identificaron dos grupos significativos, uno formado por la fibra sin funcionalizar y con las fibras funcionalizadas con 2 mg de TSC y otro formado por las fibras funcionalizadas con 6 y 10 mg de TSC. Además, como se observa en la figura 5, existe diferencia apreciable en el recuento de colonias observado en placas de muestras expuestas a fibras funcionalizadas en comparación de las no expuestas a la misma dilución, esto permite evaluar la reducción de crecimiento bacteriano debida a las fibras que han sido funcionalizadas con AgNPs.

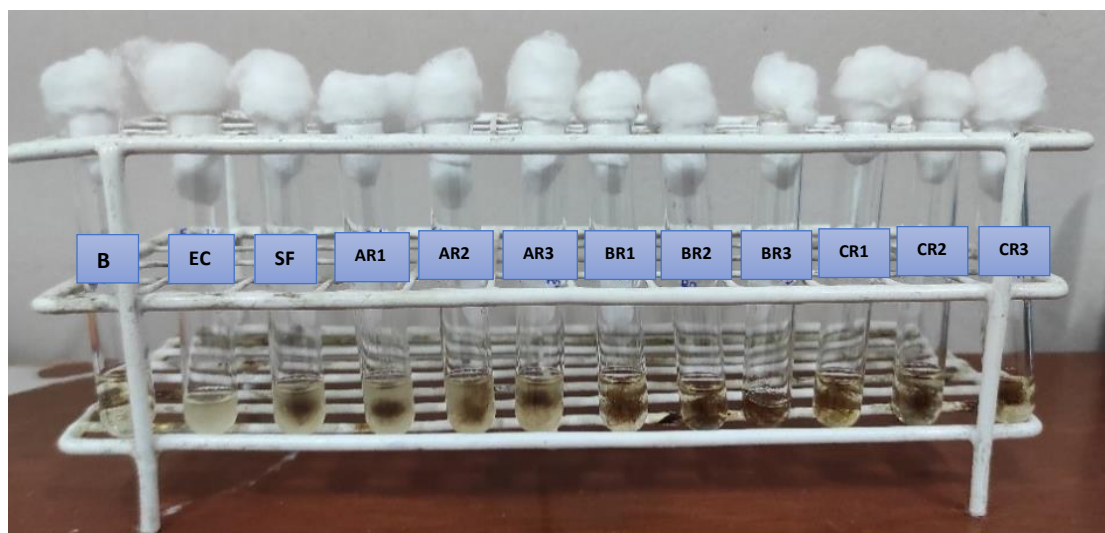


Figura 1. Efecto antibacteriano sobre *Escherichia coli* ATCC 25922 de fibras café oscuro brillantes funcionalizadas con AgNPs a nivel de tubos de ensayo luego de 24 horas de incubación.

Nota: B: Blanco, EC: *E. coli*, SF: Fibra de alpaca café oscuro brillante sin funcionalizar, A: Fibra de alpaca café oscuro brillante funcionalizada con 2 mg de TSC, B: Fibra de alpaca café oscuro brillante funcionalizada con 6 mg de TSC y C: Fibra de alpaca café oscuro brillante funcionalizada con 10 mg de TSC. R1: Repetición 1, R2: Repetición 2 y R3: repetición 3.

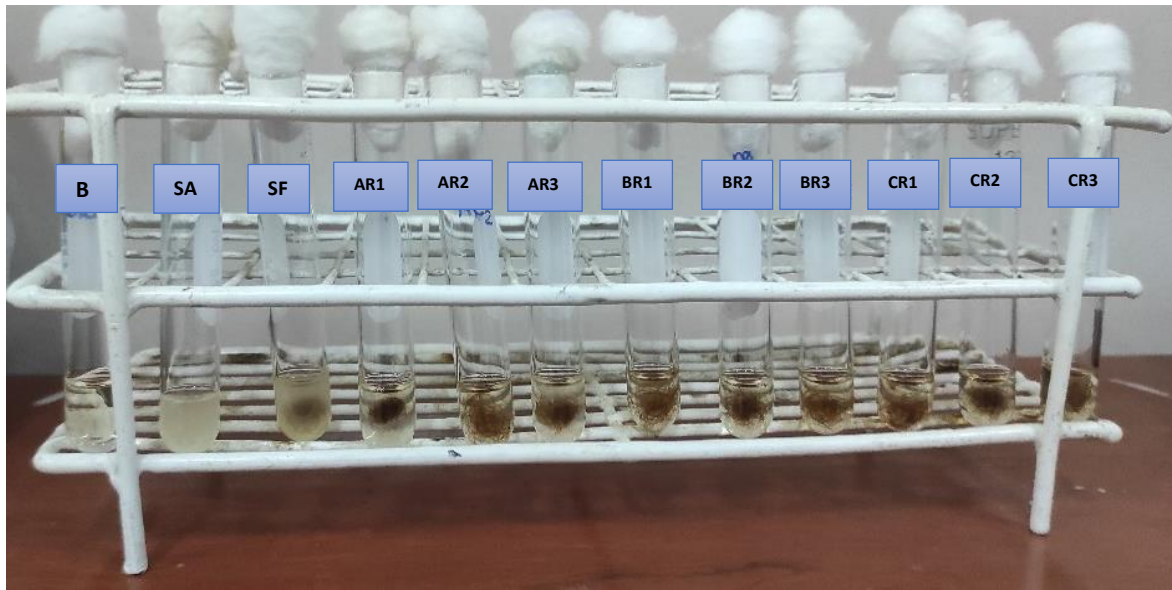


Figura 2. Efecto antibacteriano sobre *Staphylococcus aureus* ATCC 29523 de fibras café oscuros brillantes funcionalizadas con AgNPs a nivel de tubos de ensayo luego de 24 horas de incubación.

Nota: B: Blanco, SA: *S. aureus*, SF: Fibra de alpaca café oscuro brillante sin funcionalizar, A: Fibra de alpaca café oscuro brillante funcionalizada con 2 mg de TSC, B: Fibra de alpaca café oscuro brillante funcionalizada con 6 mg de TSC y C: Fibra de alpaca café oscuro brillante funcionalizada con 10 mg de TSC. R1: Repetición 1, R2: Repetición 2 y R3: repetición 3.

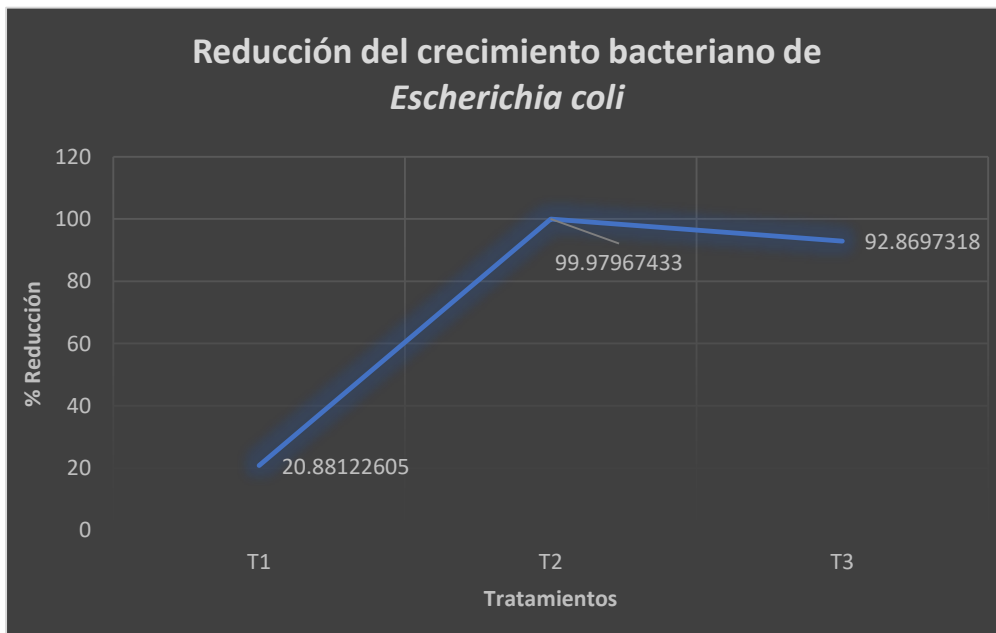


Figura N° 3. Porcentaje de reducción del crecimiento bacteriano de *Escherichia coli* ATCC 25922 expuesto a fibras funcionalizadas con AgNPs.

Nota: T1: fibra funcionalizada con 2 mg de Citrato Trisódico (TSC) y 6 mg de Nitrato de Plata, T2: fibra funcionalizada con 6 mg de TSC y 6 mg de Nitrato de Plata y T3: fibra funcionalizada con 10 mg de TSC y 6 mg de Nitrato de Plata.

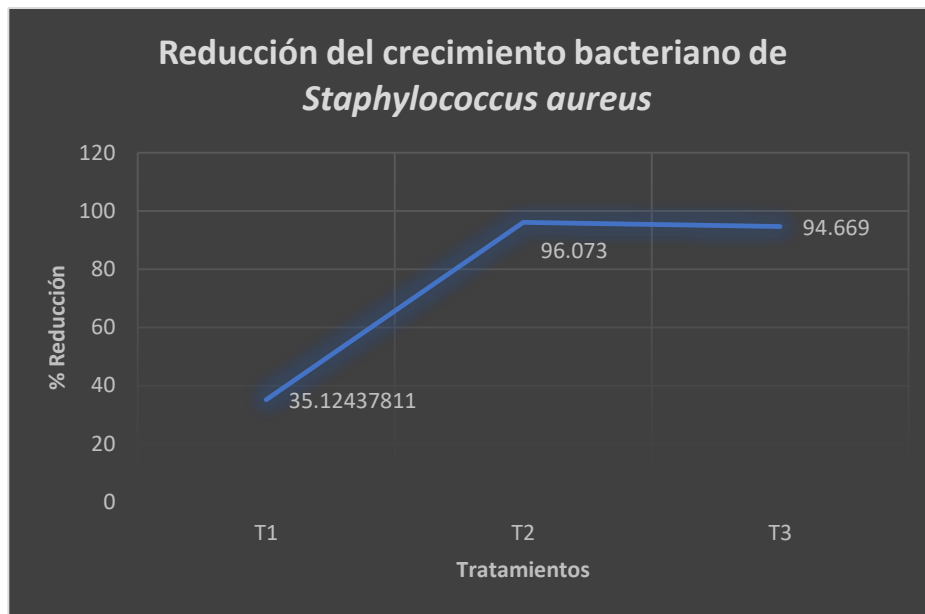


Figura Nº 4. Porcentaje de reducción del crecimiento bacteriano de *Staphylococcus aureus* ATCC 29523 expuesto a fibras funcionalizadas con AgNPs.

Nota: T1: fibra funcionalizada con 2 mg de Citrato Trisódico (TSC) y 6 mg de Nitrato de Plata, T2: fibra funcionalizada con 6 mg de TSC y 6 mg de Nitrato de Plata y T3: fibra funcionalizada con 10 mg de TSC y 6 mg. de Nitrato de Plata.

Tabla Nº 1. Análisis de varianza para el porcentaje de reducción del crecimiento de *Escherichia coli* ATCC 25922 y *Staphylococcus aureus* ATCC 29523 expuesta por 24 horas a fibras de alpaca *Vicugna pacos* funcionalizadas con AgNPs.

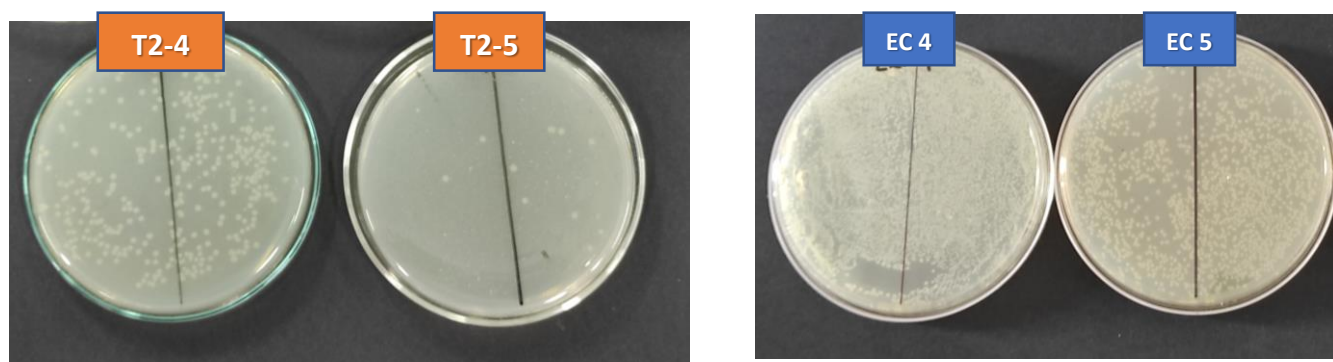
Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fc	Valor p
Tratamientos	3	25197	8399	124,182	$8,16 \times 10^{-11*}$
Bloques	1	183	183	2,711	0,12
Error experimental	15	1015	68		

Tabla Nº 2. Comparación de medias aplicando el Test de Tukey para el porcentaje de reducción del crecimiento bacteriano de *Escherichia coli* ATCC 25922 y *Staphylococcus aureus* ATCC 29523 expuesta por 24 horas a fibras de alpaca *Vicugna pacos* funcionalizadas con AgNPs. Nota: S.F.: fibra de alpaca sin funcionalizar, T1: fibra funcionalizada con 2 mg de Citrato Trisódico (TSC) y 6 mg de Nitrato de Plata, T2: fibra funcionalizada con 6 mg de TSC y 6 mg de Nitrato de Plata y T3: fibra funcionalizada con 10 mg de TSC y 6 mg de Nitrato de Plata.

Tratamientos	Medias	Grupos Homogéneos
S.F.	12,39000	a
T1 (2 mg)	28,00283	a
T2 (6 mg)	98,2800	b
T3 (10 mg)	93,87233	b

Figura Nº 5. Ensayo de la actividad antimicrobial en placa de las fibras CO brillante de alpaca funcionalizadas con nanopartículas de plata sobre *Escherichia coli*.

Nota: EC: Tratamiento formado únicamente por el inóculo bacteriano, T2: fibra funcionalizada con 6 mg de TSC y 6 mg de Nitrato de Plata, 4: dilución 10^{-4} y 5: dilución 10^{-5} .



4. Discusión

El efecto antibacteriano de la funcionalización de las fibras de alpaca *Vicugna pacos* con nanopartículas de plata se ha comprobado de forma cualitativa, tal como se puede observar en las Figuras 3 y 4 donde notamos una marcada diferencia en la turbidez que presentan los tubos de ensayo que tienen las fibras funcionalizadas con respecto a los que tienen las fibras no funcionalizadas o prístinas. En el análisis visual podemos observar mayor turbidez lo que sugiere un mayor número de microorganismos que impide el paso de la luz de manera más directa. De esta forma, se prueba que las fibras de alpaca funcionalizadas presentan una marcada actividad antibacteriana, aunque es necesario medir de

manera cuantitativa la magnitud del efecto antibacteriano. Se logró cuantificar el efecto antibacteriano como se puede observar en las Tablas 1 y 2, donde se evidencia que existen diferencias significativas debido a los tratamientos, lo cual nos permite inferir que existe un marcado efecto antibacteriano debido a la funcionalización con nanopartículas de plata (Kelly & Johnston, 2011; El-Naggar et al., 2017; Ilić et al., 2009; Li et al., 2017; Noorian et al., 2019; Nourbakhsh et al., 2017; Rana et al., 2016). De las bacterias empleadas en la presente investigación, podemos considerar que las que presentaba potencialmente mayor resistencia basándonos en ensayos previos fue *Staphylococcus aureus*, resulta tener una gran gama de mecanismos para evadir los antibióticos por lo cual se esperaba que tuviera una mayor resistencia a los

tratamientos. Las nanopartículas han demostrado ser una alternativa viable para el control de esos patógenos, aunque no todas las AgNPs lograron mostrar diferencias estadísticamente significativas en comparación con el grupo control. Esto se podría deber a las características que determinan la capacidad antibacteriana, como el tamaño y forma de las nanopartículas, que influyen sobre los mecanismos responsables de la actividad bactericida. Adicionalmente, podemos señalar que se recomienda utilizar nanopartículas de pequeño tamaño porque resultan más eficaces para ingresar al interior de las bacterias resistentes (Bharti & Mathur, 2017).

Respecto a la funcionalización de textiles con nanopartículas de plata, generalmente se ha trabajado con fibras textiles de celulosa como el algodón debido a su amplio uso para la industria del vestuario e indumentaria, así como su amplia producción a nivel mundial. Además, se ha trabajado con otras fibras como la seda y lana, en dichos casos se ha modificado la superficie de dichos textiles otorgándoles propiedades antimicrobianas para utilizarse en salud para la producción de vendajes y apósitos para evitar infecciones mientras se recuperan de lesiones. Basándonos en las figuras 1, 2, 3 y 4 podemos inferir que existe una marcada diferencia entre el porcentaje de reducción del crecimiento bacteriano entre las fibras de alpaca funcionalizadas con respecto a las sin funcionalizar, estos resultados coinciden con los reportados en algodón por investigadores como Barud et al, 2008. Asimismo, los resultados observados en las tablas 1 y 2 nos indican que no existieron diferencias significativas en la reducción del crecimiento bacteriano sobre *Escherichia coli* con respecto a *Staphylococcus aureus*; la primera es una bacteria gram negativa mientras que la segunda es gram positiva teniendo diferencias a nivel del grosor de la pared celular (la primera tiene una pared más delgada que la segunda). Esto coincide con lo informado por El Rafie et al. en 2010, quienes funcionalizaron textiles y evaluaron en las mismas cepas bacterianas, luego de más de 20 lavados se mantenía todavía una actividad cercana al 50% para ambas bacterias sin distinción (El-Rafie et al., 2010, 2014), de igual forma se ha encontrado resultados similares en otros estudios donde se han empleado fibras basadas en celulosa a las cuales se les ha incorporado nanopartículas por crecimiento *in situ* usando un agente reductor y logrando una adecuada

actividad antibacteriana (Emam et al., 2021; Hammal & Alhamed, 2022; Thi Thu Ha et al., 2021).

En las tablas 1 y 2 se puede corroborar que la concentración de citrato trisódico causa diferencias significativas en el porcentaje de reducción de crecimiento de las cepas de *E. coli* y *S. aureus*, lo que se puede deber a que el citrato trisódico juega un papel importante durante la síntesis de las nanopartículas como un agente reductor convirtiendo al Nitrato de plata en plata elemental la cual posteriormente irá agregándose hasta formar las nanopartículas, las cuales serán recubiertas por el citrato que a la vez funciona como agente estabilizante de bajo costo, el manejo de la concentración de TSC puede permitir controlar aspectos como el tamaño y la forma de las nanopartículas obtenidas, dichas características son importantes en la determinación de su capacidad antibacteriana entre otras propiedades de interés (Dong et al., 2009; La Spina et al., 2020; Le Ouay & Stellacci, 2015; Pillai & Kamat, 2004; Ranoszek-Soliwoda et al., 2017).

Los mecanismos detrás de la actividad antimicrobiana de las nanopartículas de plata se siguen estudiando; sin embargo, se conoce que las nanopartículas de plata para poder realizar su actividad bactericida necesitan interferir con el metabolismo básico de las bacterias ya sea ingresando la nanopartícula completa o mediante el ingreso de los iones de plata que se desprenden de ellas, estas características dependen a su vez de la forma, tamaño, superficie, estado y carga que presenten las nanopartículas. Se asume que uno de los principales mecanismos de actividad antimicrobiana consiste en el ingreso de los iones de plata al interior de las bacterias formando especies reactivas de oxígeno que van a interferir con procesos vitales en la bacteria como la síntesis transcripción y traducción de la información genética, así como con la cadena respiratoria lo cual ocasiona la muerte de dichos microorganismos (Dakal et al., 2016; Durán et al., 2016).

De otra manera, aunque inicialmente el incremento de la concentración de citrato trisódico a 6 mg es capaz de aumentar la media del porcentaje de reducción de crecimiento bacteriano de 28,00% de 98,02% (Véase Tabla N° 2), cuando aumentamos la concentración de TSC a 10mg se observa que el valor de la reducción de crecimiento disminuye a 93,27%. Esto nos indica que no existe una relación directa entre la concentración de TSC y el porcentaje de reducción de crecimiento bacteriano, sino

que más bien existe una aparente saturación de la influencia del TSC en la variable de estudio. Esto se puede deber a un fenómeno conocido como la pasivación que pueden sufrir materiales como las nanopartículas. La pasivación se genera cuando las nanopartículas son recubiertas con capas de mayor densidad de agentes estabilizantes, esto normalmente se puede promover durante la síntesis con el objetivo de evitar la agregación innecesaria de las mismas, así como su deterioro al estar expuestas a las condiciones ambientales (He et al., 2001; Ogura et al., 2010; Paramelle et al., 2014; Thiele et al., 2015; Valenti & Giacomelli, 2017). No obstante, la capa densa puede impedir la liberación de los iones de plata o la plata neutra que se presume son responsables de la actividad antibacteriana de las nanopartículas y esta podría ser la causa de la disminución de la actividad antibacteriana observada en la presente investigación (Mirzajani et al., 2011).

5. Conclusiones

Se logró obtener fibras funcionalizadas de *Vicugna pacos* "alpaca" con nanopartículas de plata utilizando como agente reductor al citrato trisódico con un marcado efecto antibacteriano.

Se dedujo que el citrato trisódico tiene una relación directa con el efecto antibacteriano de las fibras funcionalizadas, aunque faltan más estudios para identificar el papel y modo en que opera para mejorar la actividad antibacteriana.

6. Agradecimientos

A Universidad Nacional de Trujillo.

A la Universidad Nacional de Huancavelica.

Se agradece el apoyo financiero del Proyecto CONCYTEC-Banco Mundial "Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica" 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia: Contrato Número 048-2019-FONDECYT-BM-INC.IN, así como a todas las personas que han apoyado en el desarrollo de esta investigación.

7. Contribución de los autores

JP, G.Z.: Concepción, diseño, revisión crítica del artículo y aprobación de la versión final. **J.P., H.F., K.T., C.S.:**

Recopilación de resultados, resumen de la información, redacción del resumen, elaboración de las conclusiones y consignación de citas y referencias bibliográficas. **S.J., J.S. y E.M.:** Revisión del manuscrito y correcciones de forma y fondo, así como apoyo en el análisis y concepción de los resultados y su respectiva discusión. Todos los autores han leído el manuscrito final y aprobado la versión.

8. Referencias Bibliográficas

- Abdel-Mohsen, A. M., Hrdina, R., Burgert, L., Abdel-Rahman, R. M., Hašová, M., Šmejkalová, D., Kolář, M., Pekar, M., & Aly, A. S. (2013). Antibacterial activity and cell viability of hyaluronan fiber with silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1177–1187.
- Abid, M., Bouattour, S., Ferraria, A. M., Conceição, D. S., Carapeto, A. P., Vieira Ferreira, L. F., Botelho do Rego, A. M., Chehimi, M. M., Rei Vilar, M., & Boufi, S. (2017). Facile functionalization of cotton with nanostructured silver/titania for visible-light plasmonic photocatalysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, 507, 83–94.
- Aktürk, A., Erol Taygun, M., Karbancıoğlu Güler, F., Goller, G., & Küçükbayrak, S. (2019). Fabrication of antibacterial polyvinylalcohol nanocomposite mats with soluble starch coated silver nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 562, 255–262.
- Ballottin, D., Fulaz, S., Cabrini, F., Tsukamoto, J., Durán, N., Alves, O. L., & Tasic, L. (2017). Antimicrobial textiles: Biogenic silver nanoparticles against *Candida* and *Xanthomonas*. *Materials Science and Engineering C*, 75, 582–589.
- Barud, H. S., Barrios, C., Regiani, T., Marques, R. F. C., Verelst, M., Dexpert-Ghys, J., Messaddeq, Y., & Ribeiro, S. J. L. (2008). Self-supported silver nanoparticles containing bacterial cellulose membranes. *Materials Science and Engineering C*, 28(4), 515–518.
- Bharti, J., & Mathur, A. (2017). Study of the antimicrobial effect of the silver nanoparticles against biofilm producing *Staphylococcus aureus* strains. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 7(3), 153–163.
- Dakal, T. C., Kumar, A., Majumdar, R. S., & Yadav, V. (2016). Mechanistic basis of antimicrobial actions of silver nanoparticles. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1–17.
- Dong, X., Ji, X., Wu, H., Zhao, L., Li, J., & Yang, W. (2009). Shape control of silver nanoparticles by stepwise citrate reduction. *Journal of Physical Chemistry C*, 113(16), 6573–6576.
- Durán, N., Durán, M., De Jesus, M. B., Seabra, A. B., Fávoro, W. J., & Nakazato, G. (2016). Silver nanoparticles: A new view on mechanistic aspects on antimicrobial activity. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 12(3), 789–799.
- Ebrahimzadeh, M. A., Naghizadeh, A., Amiri, O., Shirzadi-Ahodshti, M., & Mortazavi-Derazkola, S. (2019). Green and facile synthesis of Ag nanoparticles using *Crataegus pentagyna* fruit extract (CP-AgNPs) for organic pollution dyes degradation and antibacterial application. *Bioorganic Chemistry*, 103425.
- El-Naggar, M. E., Hassabo, A. G., Mohamed, A. L., & Shaheen, T. I. (2017). Surface modification of SiO₂ coated ZnO nanoparticles for multifunctional cotton fabrics. *Journal of Colloid and Interface Science*, 498, 413–422.
- El-Rafie, M. H., Ahmed, H. B., & Zahran, M. K. (2014). Characterization of nanosilver coated cotton fabrics and evaluation of its antibacterial efficacy. *Carbohydrate Polymers*, 107(1), 174–181.
- El-Rafie, M. H., Mohamed, A. A., Shaheen, T. I., & Hebeish, A. (2010). Antimicrobial effect of silver nanoparticles produced by fungal process on cotton fabrics. *Carbohydrate Polymers*, 80(3), 779–782.
- Emam, H. E., El-Rafie, M. H., & Rehan, M. (2021). Functionalization of Unbleached Flax Fibers by Direct Integration of Nano-silver through

- Internal and External Reduction. *Fibers and Polymers*, 22(11), 3014–3024.
- Hammal, A., & Alhamed ALduihi, H. (2022). A New Medical Dressing with Silver Nanoparticles to Treat Diabetic Foot Patient. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*, 33(1), 1–5.
- He, S., Yao, J., Xie, S., Pang, S., & Gao, H. (2001). Investigation of passivated silver nanoparticles. *Chemical Physics Letters*, 343(1–2), 28–32.
- Ilić, V., Šaponjić, Z., Vodnik, V., Potkonjak, B., Jovančić, P., Nedeljković, J., & Radetić, M. (2009). The influence of silver content on antimicrobial activity and color of cotton fabrics functionalized with Ag nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 78(3), 564–569.
- Jagajjani, K., & Korumilli, T. (2020). Instant Synthesis of Silver Particles on Silk Fibres: Characterization and Antimicrobial Study. *Composites Communications*.
- Kelly, F. M., & Johnston, J. H. (2011). Colored and functional silver nanoparticle-wool fiber composites. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 3(4), 1083–1092.
- Küp, F. Ö., Çoşkunçay, S., & Duman, F. (2020). Biosynthesis of silver nanoparticles using leaf extract of *Aesculus hippocastanum* (horse chestnut): Evaluation of their antibacterial, antioxidant and drug release system activities. *Materials Science and Engineering C*, 107, 110207.
- La Spina, R., Mehn, D., Fumagalli, F., Rossi, F., Gilliland, D., Holland, M., & Reniero, F. (2020). Synthesis of citrate-stabilized silver nanoparticles modified by thermal and pH preconditioned tannic acid. *Nanomaterials*, 10(10), 1–16.
- Le Ouay, B., & Stellacci, F. (2015). Antibacterial activity of silver nanoparticles: A surface science insight. *Nano Today*, 10(3), 339–354.
- Li, Z., Meng, J., Wang, W., Wang, Z., Li, M., Chen, T., & Liu, C. J. (2017). The room temperature electron reduction for the preparation of silver nanoparticles on cotton with high antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers*, 161(17), 270–276.
- Mirzajani, F., Ghassempour, A., Aliahmadi, A., & Esmaeili, M. A. (2011). Antibacterial effect of silver nanoparticles on *Staphylococcus aureus*. *Research in Microbiology*, 162(5), 542–549.
- Mortazavi-Derazkola, S., Ebrahimzadeh, M. A., Amiri, O., Goli, H. R., Rafiei, A., Paździor, K., Bilińska, L., & Ledakowicz, S. (2019). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 376.
- Noorian, S. A., Hemmatinejad, N., & Navarro, J. A. R. (2019). Ligand modified cellulose fabrics as support of zinc oxide nanoparticles for UV protection and antimicrobial activities. *International Journal of Biological Macromolecules*.
- Nourbakhsh, S., Habibi, S., & Rahimzadeh, M. (2017). Copper nano-particles for antibacterial properties of wrinkle resistant cotton fabric. *Materials Today: Proceedings*, 4(7), 7032–7037.
- Ogura, H., Maruyama, M., Matsubayashi, R., Ogawa, T., Nakamura, S., Komatsu, T., Nagasawa, H., Ichimura, A., & Isoda, S. (2010). Carboxylate-passivated silver nanoparticles and their application to sintered interconnection: A replacement for high temperature lead-rich solders. *Journal of Electronic Materials*, 39(8), 1233–1240.
- Paramelle, D., Sadvoy, A., Gorelik, S., Free, P., Hopley, J., & Fernig, D. G. (2014). A rapid method to estimate the concentration of citrate capped silver nanoparticles from UV-visible light spectra. *Analyst*, 139(19), 4855–4861.
- Paździor, K., Bilińska, L., & Ledakowicz, S. (2018). A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 376, S1385894718325294.
- Perera, S., Bhushan, B., Bandara, R., Rajapakse, G., Rajapakse, S., & Bandara, C. (2013). Morphological, antimicrobial, durability, and physical properties of untreated and treated textiles using silver-nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 436, 975–989.
- Pillai, Z. S., & Kamat, P. V. (2004). What factors control the size and shape of silver nanoparticles in the citrate ion reduction method? *Journal of Physical Chemistry B*, 108(3), 945–951.
- Pinho, E., Magalhães, L., Henriques, M., & Oliveira, R. (2010). Antimicrobial activity assessment of textiles: standard methods comparison. *Annals of Microbiology*, 61(3), 493–498.
- Rana, M., Hao, B., Mu, L., Chen, L., & Ma, P. C. (2016). Development of multi-functional cotton fabrics with Ag/AgBr-TiO₂ nanocomposite coating. *Composites Science and Technology*, 122, 104–112.
- Ranoszek-Soliwoda, K., Tomaszewska, E., Socha, E., Krzyczmonik, P., Ignaczak, A., Orłowski, P., Krzyżowska, M., Celichowski, G., & Grobelny, J. (2017). The role of tannic acid and sodium citrate in the synthesis of silver nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 19(8).
- Srisod, S., Motina, K., Inprasit, T., & Pisitsak, P. (2018). A green and facile approach to durable antimicrobial coating of cotton with silver nanoparticles, whey protein, and natural tannin. *Progress in Organic Coatings*, 120(March), 123–131.
- Torbat, T. V., & Javanbakht, V. (2019). Fabrication of TiO₂/Zn₂TiO₄/Ag nanocomposite for synergic effects of UV radiation protection and antibacterial activity in sunscreen. In *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*.
- Thi Thu Ha, P., Xuan Hoa, V., Kha, T. D., Dien, N. D., Thanh, L. D., Hung, N. Q., & Van Luyen, L. (2021). Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles for Antibacterial Application against *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa*. *VNU Journal of Science: Mathematics - Physics*, 37(2), 77–83.
- Thiele, M., Götz, I., Trautmann, S., Müller, R., Csáki, A., Henkel, T., & Fritzsche, W. (2015). Wet-chemical Passivation of Anisotropic Plasmonic Nanoparticles for LSPR-sensing by a Silica Shell. *Materials Today: Proceedings*, 2(1), 33–40.
- Ul, S., Khan, H., Khan, S. M., & Majeed, A. (2019). Antimicrobial effect of colloidal argentine colloid on ampicillin resistant *Staphylococcus aureus*. *J Entomol Zool Stud*, 7(1), 181–183.
- Valenti, L. E., & Giacomelli, C. E. (2017). Stability of silver nanoparticles: agglomeration and oxidation in biological relevant conditions. *Journal of Nanoparticle Research*, 19(5).