

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

Protocolo de investigación

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DEL EFECTO BACTERICIDA DE UN COMPOSITO DE
POLIURETANO TERMOPLÁSTICO Y NANOPARTÍCULAS DE PLATA PARA EL
RECUBRIMIENTO DE ALINEADORES ORTODÓNTICOS**

Que presenta su tesis:

Ing. Florencio Alberto Cabrera Morales

Asesores:

DR. JUAN CARLOS GARCÍA

GALLEGOS

DR. JULIO CÉSAR FLORES

PRECIADO

Mexicali, Baja California

Junio de 2025

Capítulo 1. Introducción

- 1.1 Las nanopartículas de plata
- 1.2 Justificación del proyecto
- 1.3 Planteamiento del problema
- 1.4 Objetivo general
- 1.5 Objetivos específicos
- 1.6 Hipótesis

Capítulo 2. Marco teórico

- 2.1 Métodos de síntesis de nanopartículas de plata
 - 2.1.1 Método físico
 - 2.1.2 Método químico
 - 2.1.3 Método verde
- 2.2 Método coloidal
- 2.3 Irradiación por microondas
- 2.4 Mecanismos de toxicidad de las AgNPs

Capítulo 3. Fundamento teórico y conceptual

- 3.1 Enfoque transdisciplinario en medicina y odontología
- 3.2 Ortodoncia
 - 3.2.1 Maloclusión
 - 3.2.2 Tipos de aparatología ortodóntica
- 3.3 Sistemas de alineación
- 3.4 Flujo digital
 - 3.4.1 Escáner intraoral
 - 3.4.2 Impresión 3D
- 3.5 Poliuretano termoplástico (TPU)
- 3.6 Clasificación estructural de los materiales
 - 3.6.1 Materiales cristalinos, policristalinos y amorfos
 - 3.6.2 Metales, cerámicos y polímeros
- 3.7 Nanomateriales
- 3.8 Aplicaciones clínicas de la funcionalización de alineadores ortodónticos
- 3.9 Beneficios del recubrimiento con AgNPs
- 3.10 Caracterización de nanopartículas de plata
 - 3.10.1 UV-Vis
 - 3.10.2 SEM

Capítulo 4. Metodología

- 4.1 Materiales utilizados
- 4.2 Síntesis química de nanopartículas de plata
- 4.3 Purificación y secado de nanopartículas
- 4.4 Redisposición en DMF
- 4.5 Análisis por DLS, UV-Vis y potencial Z
- 4.6 Preparación de películas delgadas con TPU-AgNPs
- 4.7 Análisis por SEM y EDS

Capítulo 5. Resultados esperados

Capítulo 6. Referencias bibliográficas

Capítulo 1

Introducción

La nanotecnología se ha consolidado en las últimas décadas como una herramienta transformadora en múltiples áreas del conocimiento, sobre todo en la medicina y la odontología. Aunque sus raíces conceptuales se remontan a la visión de Richard Feynman en 1959 –quien, en su célebre conferencia “There’s Plenty of Room at the Bottom”, anticipó la posibilidad de manipular la materia a escalas nanométricas–, la modernización y aplicación práctica de estos conceptos se ha intensificado en años recientes gracias al desarrollo de nuevas técnicas y materiales (Cheng et al., 2019).

La nanociencia se define como el estudio de la materia a escalas de entre 1 y 100 nanómetros, donde las propiedades físicas, químicas y biológicas difieren significativamente de aquellas observadas en escalas mayores (Smith et al., 2018). Esta diferencia se debe, en parte, a la alta relación superficie-volumen y a la aparición de efectos cuánticos que permiten propiedades y comportamientos únicos. Estas particularidades han permitido el desarrollo de la nanotecnología, la cual ha propiciado la creación de dispositivos, materiales y sistemas con aplicaciones innovadoras en sectores tan diversos como la electrónica, la energía y, especialmente, la medicina y la odontología.

En el ámbito de la salud, la aplicación de la nanotecnología se ha traducido en avances significativos en el diagnóstico, la terapia y la prevención de enfermedades. En medicina –área conocida como nanomedicina– se han desarrollado sistemas de administración de fármacos, agentes de imagen y terapias dirigidas a nivel celular, mientras que en odontología se han implementado nanocompuestos y recubrimientos antimicrobianos para mejorar la calidad y durabilidad de materiales dentales (García et al., 2016). Un elemento clave en estos avances es el uso de nanopartículas, que se definen como partículas con dimensiones en el rango nanométrico y que, debido a sus características, poseen propiedades físicas y químicas que potencializan su uso en aplicaciones biomédicas (Lee & Kim, 2017).

Entre las diferentes nanopartículas estudiadas, las nanopartículas de plata (AgNPs) destacan por sus probadas propiedades antimicrobianas y su amplia aplicación en el campo biomédico. Recientes investigaciones han evidenciado que las AgNPs actúan mediante la liberación de iones plata, los cuales interactúan con estructuras celulares esenciales de los microorganismos, generando estrés oxidativo y la consiguiente inhibición del crecimiento bacteriano (Rodríguez et al., 2019). Esta propiedad las convierte en un componente valioso en el diseño de nuevos biomateriales destinados a prevenir infecciones.

Un biomaterial se define como cualquier sustancia, natural o sintética, diseñada para interactuar con sistemas biológicos con fines terapéuticos o de diagnóstico (Martínez et al., 2020). La aplicación de biomateriales en las ciencias de la salud abarca desde implantes y prótesis hasta dispositivos médicos que mejoran la calidad de vida de los pacientes. Su función principal es la de integrar o reemplazar estructuras dañadas, ofreciendo soporte mecánico y, en algunos casos, propiedades bioactivas que estimulan la regeneración tisular. En este sentido, la incorporación de nanopartículas de plata en biomateriales ha sido objeto de interés, ya que permite conferir propiedades antimicrobianas sin comprometer la biocompatibilidad del material (Rodríguez et al., 2019).

El presente trabajo de tesis se enfoca en el desarrollo de un composite basado en poliuretano termoplástico incorporado con nanopartículas de plata, destinado a su futura aplicación en alineadores ortodónticos del tipo Invisalign. Los alineadores transparentes, si bien ofrecen ventajas estéticas y de comodidad, presentan desafíos relacionados con la acumulación de placa y la proliferación bacteriana durante su uso prolongado. En particular, bacterias periodontopatógenas como *Porphyromonas gingivalis* pueden establecerse en las superficies de estos dispositivos, incrementando el riesgo de enfermedades en las encías. La integración de AgNPs en la matriz polimérica del alineador se propone como una estrategia innovadora para aprovechar las propiedades bactericidas de la plata, contribuyendo a la reducción de infecciones y mejorando la salud periodontal durante el tratamiento ortodóntico (Santos et al., 2021).

Esta investigación, apoyada en estudios recientes y en el avance de la nanotecnología aplicada a la salud,

busca establecer las bases para el diseño de materiales compuestos que, sin comprometer las propiedades mecánicas y estéticas requeridas en un alineador, incorporen funciones antimicrobianas que beneficien la salud bucal del paciente. La sinergia entre la tecnología nanométrica y la ingeniería de biomateriales ofrece una perspectiva prometedora para el desarrollo de dispositivos médicos con capacidades mejoradas, alineándose con la tendencia hacia la medicina personalizada y la prevención proactiva de enfermedades.

Justificación

La transdisciplinariedad, como estrategia colaborativa, permite integrar perspectivas de disciplinas afines tales como la -bioingeniería y la odontología- mediante la sinergia de métodos y técnicas orientadas a abordar problemáticas tanto preclínicas como clínicas. Esta integración posibilita el desarrollo de un biopolímero funcionalizado con un agente bactericida, capaz de regular la proliferación de microorganismos presentes en la placa dental y en las zonas retentivas asociadas a las estructuras orales y a dispositivos terapéuticos, como los sistemas de alineación ortodóntica.

Las nanopartículas de plata (AgNPs) se destacan por sus excelentes propiedades antimicrobianas, alta estabilidad térmica y baja toxicidad, lo que las convierte en un componente potencial para optimizar los sistemas de alineación. Es factible desarrollar un sistema funcionalizado basado en un polímero de TPU combinado con AgNPs, utilizando flujos digitales e impresión 3D, que permita la fabricación de alineadores ortodónticos en un futuro. Este material no solo mantendría las propiedades biomecánicas esenciales para un tratamiento de ortodoncia, sino que también promovería el mantenimiento de la salud oral mediante su efecto bactericida.

Los resultados obtenidos a través de este proceso permitirán validar la hipótesis planteada. En caso de ser positivos, será posible escalar y estandarizar la síntesis del biopolímero, abriendo la posibilidad de patentar el proceso y de implementar esta tecnología en aplicaciones clínicas.

Planteamiento del problema

El microambiente de la cavidad oral se mantiene estable por el control adecuado de los microorganismos presentes, los hábitos y habilidades de higiene, la alimentación y otros factores, como lo es la generación y mantenimientos de zonas retentivas de alimentos que asociados a la placa dental son capaces de alterar los tejidos dentales de soporte y la mucosa oral, generando caries y enfermedades de las encías como la gingivitis y periodontitis. La retención de bacterias en dispositivos ortodónticos asociados a la aparatología fija durante los periodos de tratamiento de ortodoncia que varían de los 12 a 18 meses e inclusive los nuevos sistemas de tratamiento como lo son los alineadores a base de TPU que aunque son removible y por periodo de 14 a 21 días suelen promover de igual forma el efecto retentivo, debido a ello es promover una reducción de la población de bacterias evitando así el desarrollo de caries dental u otras condición periodontal asociada. Ante esta situación ¿la obtención de un compósito funcionalizado de TPU con AgNps permitirá establecer un efecto bactericida en los sistemas de alineadores ortodóntico promoviendo con ello el mantenimiento del microambiente de la cavidad oral?

Objetivos específicos

- Desarrollar el método de síntesis de nanopartículas de plata mediante la técnica de síntesis química asistida por microondas.
- Evaluar la morfología de las nanopartículas de plata para determinar su tamaño y su dispersión en la matriz polimérica.
- Evaluar mecánicamente la película de compósito de TPU con nanopartículas de plata.
- Estimar el efecto bactericida del compósito con base a la tasa de liberación de iones de plata.

Objetivo general

Desarrollar un composito basado en poliuretano termoplástico (TPU) y nanopartículas de plata para la elaboración de una película delgada que posea propiedades bactericidas que contribuya a mejorar la higiene y la salud oral en el tratamiento ortodóntico.

Hipótesis

La incorporación homogénea de nanopartículas de plata en una película de poliuretano termoplástico confiere un efecto bactericida.

Capítulo 2

Métodos de síntesis de nanopartículas

Top down y Bottom up

Existen dos enfoques generales para sintetizar nanopartículas: top-down (de arriba hacia abajo) y bottom-up (de abajo hacia arriba). En el enfoque top-down se parte de materiales a granel y se los fragmenta o reduce de tamaño hasta el rango nanométrico (García 2018 Nano Methods).

Este enfoque suele involucrar métodos físicos, también llamados métodos “de fabricación”, como la molienda mecánica, la litografía o la ablación láser, donde se requiere aplicar energía o usar equipos especializados para pulverizar el material (López 2017 Nano Synthesis). Por otro lado, el enfoque bottom-up consiste en construir las nanopartículas a partir de átomos o moléculas que reaccionan o se autoensamblan, típico de métodos químicos o biológicos (Kim 2019 Bottom Up). En estos métodos bottom-up (también conocidos como de condensación química), los átomos o iones se unen para formar nanocristales; ejemplos incluyen la deposición química de vapor (CVD), métodos sol-gel, coprecipitación y la síntesis coloidal en soluciones (Rodríguez2020Colloidal). En general, los métodos físicos/top-down requieren condiciones intensivas (equipos de alta energía, vacío, etc.), mientras que los métodos químicos/bottom-up ocurren típicamente en fase líquida o gaseosa a partir de precursores moleculares (Lopez2017NanoSynthesis).

Cada enfoque tiene sus ventajas: el top-down permite obtener nanomateriales a partir de materiales ya existentes con cierto control de forma (por ejemplo, nanofabricación por litografía), mientras que el bottom-up suele ofrecer un mejor control sobre el tamaño y composición a escala atómica al sintetizar directamente las nanoestructuras átomo por átomo (Kim 2019 Bottom Up).

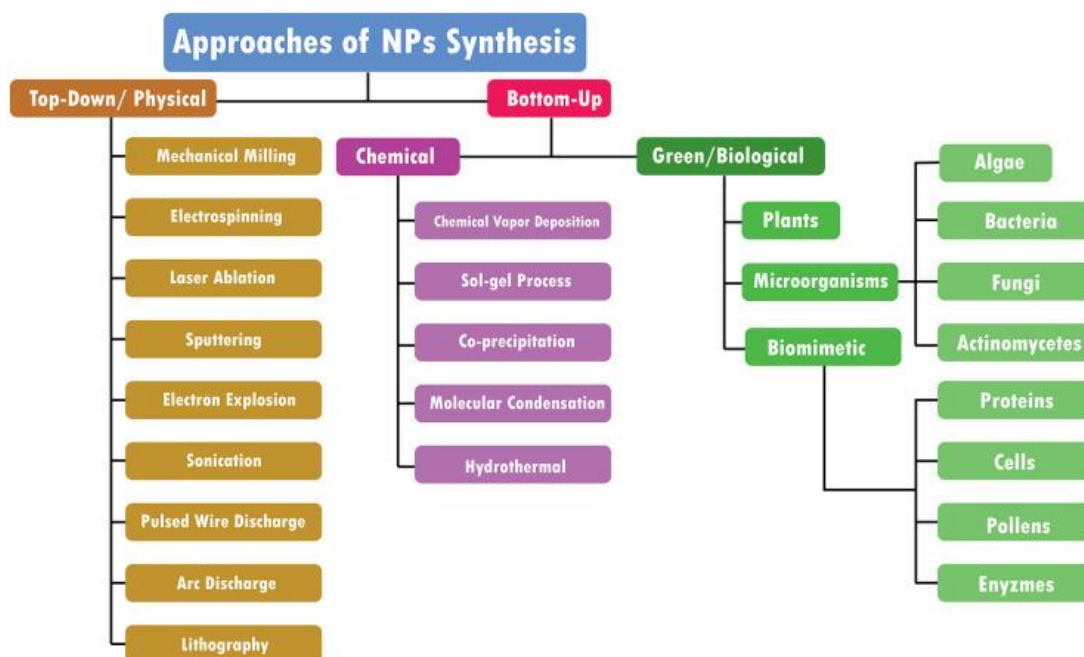


Figura 1. Mapa conceptual sobre los diferentes enfoques de la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs).

Realizar una nueva tabla traducida al español y colocar pie de pagina

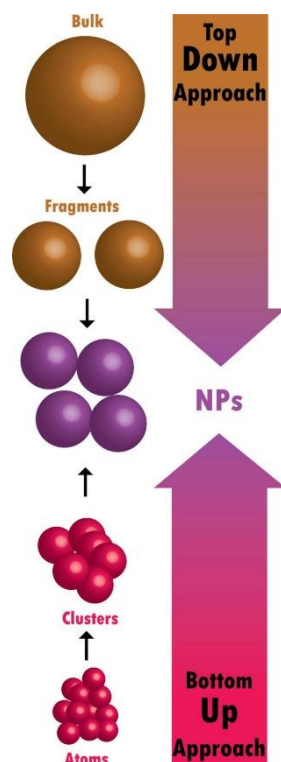


Figura 2. Imagen ilustrativa sobre los diferentes métodos de síntesis nanopartículas de plata (AgNPs).

Métodos físicos y químicos.

Los métodos físicos de síntesis de nanopartículas generalmente corresponden al enfoque top-down. Entre ellos se encuentran: la molienda mecánica de alta energía (ball milling) para pulverizar sólidos hasta el nanómetro, la ablación láser de un blanco sólido para vaporizar material y condensarlo como nanopartículas, la evaporación-condensación en gas inerte, la pulverización catódica (sputtering), entre otros (López 2017 Nano Synthesis), (Martínez 2018 Physical Methods). Estos métodos tienden a producir nanopartículas de materiales inorgánicos (metales, óxidos, etc.) de alta pureza y pueden requerir condiciones especiales (por ejemplo, atmósferas controladas o vacío) (López 2017 Nano Synthesis). Por otro lado, los métodos químicos corresponden típicamente al enfoque bottom-up, donde reacciones químicas forman las nanopartículas a partir de precursores. Ejemplos de métodos químicos incluyen la síntesis sol-gel (hidrólisis y policondensación de precursores metálicos seguida de calcinación), la coprecipitación (precipitación simultánea de compuestos que nuclean nanopartículas), la reducción química en solución (formación de nanopartículas metálicas coloidales a partir de sales metálicas reducidas por un agente químico), y métodos biológicos o “síntesis verde” que emplean extractos de plantas o microorganismos como agentes reductores y estabilizantes (Kim 2019 Chemical Methods), (Rodríguez 2020 Colloidal). En particular, la síntesis química coloidal se destaca por su simplicidad y versatilidad, permitiendo obtener nanopartículas con buen control de tamaño y forma bajo condiciones relativamente suaves (por ejemplo, en solución acuosa a temperaturas moderadas).

Método coloidal

El método coloidal es un método bottom-up químico muy difundido para la obtención de nanopartículas metálicas en solución. En este procedimiento, un precursor metálico (típicamente una sal metálica) se reduce químicamente en fase líquida para formar átomos metálicos que nuclearán las nanopartículas. Se emplea un agente reductor adecuado – por ejemplo, ácido ascórbico, borohidruro de sodio, citrato trisódico u otros alcoholes – el cual dona electrones al ion metálico para convertirlo en átomo neutro y así iniciar la formación de los nanocristales (Pekkari 2020). A menudo, el propio reductor o aditivos adicionales actúan también como

agentes estabilizantes (capping agents) que se adsorben en la superficie de las nanopartículas en formación, controlando su crecimiento y evitando su agregación. Comúnmente se usan estabilizantes como surfactantes, polímeros o tioles que recubren la nanopartícula, confiriéndole estabilidad coloidal. Siguiendo la clásica teoría de LaMer, durante la síntesis coloidal ocurre primero una etapa de nucleación rápida (un “estallido” de formación de núcleos cuando la concentración de átomos metálicos supera un umbral crítico) y luego una etapa de crecimiento sobre esos núcleos formados (Pekkari 2020). Controlando las condiciones de reacción (concentración de precursores, velocidad de adición, temperatura, etc.), es posible favorecer una nucleación breve e intensa seguida de un crecimiento lento, lo que produce nanopartículas de tamaño uniforme (distribución estrecha) en la solución (Pekkari 2020). Debido a su simplicidad, reproducibilidad y fineza de control, la síntesis coloidal se ha empleado ampliamente para fabricar nanopartículas de metales como oro, plata, cobre, óxidos y otros materiales a escala de laboratorio y también a nivel industrial (Pekkari 2020).

Irradiación por microondas en la síntesis de nanopartículas

La síntesis asistida por microondas consiste en utilizar radiación microondas como fuente de energía para llevar a cabo o acelerar las reacciones de formación de nanopartículas. En la última década, esta técnica ha cobrado relevancia por sus ventajas en términos de velocidad y eficiencia energética (Martínez 2018 *Microwave Synthesis*). A continuación, se describen sus principales ventajas, el efecto de las microondas en la nucleación de las nanopartículas, y algunos aspectos del mecanismo de calentamiento por microondas que explican su eficacia.

Algunas ventajas del método:

Calentamiento rápido y homogéneo

Las microondas transfieren energía rápidamente al medio de reacción mediante radiación electromagnética, a diferencia del calentamiento convencional por conducción o convección. Esto permite un aumento casi instantáneo de la temperatura de todo el volumen de la muestra, logrando un calentamiento uniforme del reactivo (Martínez 2018 *Microwave Synthesis*). Como resultado, la reacción alcanza las condiciones necesarias en mucho menos tiempo y de manera más homogénea que con métodos tradicionales.

Reducción drástica del tiempo de reacción

En comparación con métodos térmicos convencionales, la irradiación microondas puede acortar significativamente los tiempos de síntesis. Las oscilaciones del campo electromagnético (componentes eléctrico y magnético) interactúan con las moléculas del reactivo generando fricción y colisiones moleculares, lo que acelera la cinética de reacción (Martínez 2018 *Microwave Synthesis*). Estudios reportan que con microondas se logran las mismas reacciones en minutos u segundos, frente a horas mediante calentamiento convencional (Pérez 2020 *Microwave Mechanism*).

Alta tasa de nucleación y partículas más pequeñas

El calentamiento súbito y uniforme inducido por microondas produce una supersaturación rápida del precursor, detonando una nucleación abundante en poco tiempo (Pérez 2020 *Microwave Mechanism*). Esta alta tasa de nucleación inicial conduce a la formación de muchos núcleos de nanopartícula simultáneamente, lo que limita el crecimiento excesivo de cada partícula y resulta en tamaños más pequeños y distribuciones de tamaño más estrechas (nanopartículas más monodispersas) (Pérez 2020 *Microwave Mechanism*), (Martínez 2018 *Microwave Synthesis*). En otras palabras, las microondas favorecen la obtención de partículas uniformes gracias a ese nucleado masivo inicial.

Menor necesidad de agentes químicos externos

En algunos sistemas, la energía de microondas puede generar especies reactivas in situ capaces de reducir el precursor sin añadir reactivos reductores tradicionales. Por ejemplo, se ha observado que la irradiación

microondas de soluciones de precursores metálicos puede producir radicales o especies reductoras durante el proceso, haciendo innecesario agregar un agente reductor químico por separado. Esto simplifica la síntesis y elimina posibles fuentes de contaminación, y en ciertos casos también puede reducir la necesidad de surfactantes o agentes estabilizantes porque el crecimiento puede detenerse rápidamente al apagar la fuente de microondas (Pérez 2020 *Microwave Mechanism*).

Control y eficiencia energética: La calefacción por microondas responde casi instantáneamente a los ajustes de potencia, lo que permite un control fino de la temperatura de reacción. Una ventaja importante es la posibilidad de detener la reacción de inmediato simplemente apagando las microondas, provocando un enfriamiento muy rápido de la mezcla (Martínez 2018 *Microwave Synthesis*). Esto evita sobrecalentamientos prolongados, reacciones secundarias indeseadas o el sobrecrecimiento de los nanocristales una vez formados. Adicionalmente, la conversión directa de energía electromagnética en calor dentro del medio reacción hace un uso más eficiente de la energía, reduciendo pérdidas (no es necesario calentar las paredes del reactor ni el entorno). En conjunto, el método de microondas ofrece condiciones de reacción más suaves y eficientes, a menudo permitiendo síntesis a temperaturas más bajas o en menos tiempo que los métodos tradicionales.

Nucleación de nanopartículas bajo microondas

La etapa de nucleación es crítica en la formación de nanopartículas, ya que determina en gran medida el tamaño y la uniformidad del producto final. De acuerdo con la teoría de LaMer, para obtener nanopartículas monodispersas es deseable un breve período de nucleación explosiva seguido por una separación clara entre nucleación y crecimiento (Pekkari 2020). La irradiación por microondas tiende a propiciar justamente este escenario. Debido a la rápida elevación de la temperatura y a la distribución homogénea del calor, la solución precursora alcanza el punto de sobresaturación muy rápidamente, detonando una nucleación instantánea y masiva de nanocristales (Pekkari 2020), (Onwudiwe 2019). Una vez formados muchos núcleos a la vez, el consumo del precursor reduce la supersaturación, de modo que la nucleación cesa y las nanopartículas crecen sobre los núcleos existentes. Como el calentamiento por microondas puede ser detenido o modulado con precisión, es posible limitar el tiempo de crecimiento posterior, obteniendo partículas pequeñas antes de que coalescan o crezcan demasiado. En consecuencia, las nanopartículas sintetizadas con asistencia de microondas suelen presentar tamaños más uniformes y menores en comparación con métodos convencionales, precisamente por el mayor número de núcleos iniciales y el control temporal de la reacción (Onwudiwe 2019), (Kustov y Vikanova 2023). Diversos estudios han documentado que el uso de microondas produce nanopartículas de metales (Ag, Au, Pt, etc.) de ~10–30 nm donde los mismos sistemas bajo calentamiento lento daban partículas mucho más grandes y polidispersas (Kustov y Vikanova 2023). En resumen, la microonda favorece una nucleación eficiente que mejora la calidad de las nanopartículas obtenidas.

Mecanismo del calentamiento por microondas

El efecto de las microondas se basa en su interacción con la materia a nivel molecular. Las microondas son radiación electromagnética de frecuencias entre 0.3 y 300 GHz; típicamente se emplean 2.45GHz en los equipos de laboratorio de síntesis química (Kustov y Vikanova 2023). A esta frecuencia, las microondas hacen que las moléculas polares del medio (por ejemplo, disolventes como el agua, etilenglicol, dimetilformamida, etc., o los propios reactivos si son dipolares) intenten alinearse rápidamente con el campo eléctrico oscilante. Este movimiento de rotación y fricción molecular, junto con la migración de iones en el campo, genera un calentamiento volumétrico directo del material (Onwudiwe 2019). A diferencia del calentamiento convencional (donde el calor se transfiere desde una superficie caliente hacia el interior del recipiente por gradiente térmico), el calentamiento por microondas penetra en la muestra y deposita energía de forma más uniforme en todo el volumen, eliminando grandes gradientes de temperatura (Onwudiwe 2019). Por ello, se alcanzan temperaturas internas elevadas de forma homogénea y rápida.

Otro aspecto importante es que las microondas pueden producir condiciones de reacción únicas. En sistemas cerrados, los disolventes pueden sobrecalentarse por encima de su punto de ebullición normal bajo el efecto de microondas (debido a la ausencia de ebullición convectiva y a la absorción directa de energía), generando "hot spots" locales o zonas de alta temperatura (Kustov y Vikanova 2023), (Onwudiwe 2019). Este sobrecalentamiento controlado permite llevar a cabo reacciones a temperaturas efectivas más altas de las que

serían posibles en calentamiento convencional, acelerando la cinética sin necesidad de elevar excesivamente la temperatura global del sistema. Consecuentemente, se pueden obtener fases o morfologías que requieren condiciones lejos del equilibrio, e incluso fases metaestables que se forman gracias a calentamientos rápidos y/o uniformes a microescala (Kustov y Vikanova 2023).

Desde el punto de vista de control, el método por microondas ofrece gran sumabilidad. Parámetros como la potencia de microonda, el tiempo de irradiación, la temperatura objetivo (muchos equipos modernos de síntesis por microondas permiten controlar la temperatura por infrarrojos o fibra óptica), e incluso la modalidad de irradiación (continua o pulsada) pueden ajustarse para optimizar la reacción. Por ejemplo, la irradiación pulsada (encendidos y apagados cortos) puede ser útil para separar núcleos y crecimiento, aprovechando enfriamientos intermitentes. Asimismo, la capacidad de apagar instantáneamente la fuente de microondas permite un enfriamiento abrupto, “congelando” esencialmente el estado de la reacción en el punto deseado (Kustov y Vikanova 2023). Esto es especialmente ventajoso para evitar la sobre-reacción o la formación de subproductos una vez obtenidas las nanopartículas. Vale mencionar que se han discutido en la literatura posibles efectos no térmicos de las microondas (es decir, influencias directas del campo electromagnético sobre la química más allá del simple calentamiento). Sin embargo, la evidencia sugiere que muchas de las ventajas atribuidas a las microondas (mayor velocidad de reacción, rendimientos superiores, tamaños menores) pueden explicarse por sus efectos térmicos particulares, es decir, por la rápida y homogénea generación de calor y las condiciones de alta temperatura locales que este método proporciona. En resumen, el mecanismo de acción de las microondas se centra en un aporte energético eficiente y controlable que crea un entorno de reacción altamente activado, uniforme y ajustable, lo que se traduce en síntesis más rápidas y nanopartículas de mejor calidad.

Mecanismos de toxicidad de las nanopartículas de plata (AgNPs)

Las nanopartículas de plata (AgNPs) se utilizan extensamente por sus propiedades antimicrobianas, pero también se ha evidenciado que pueden inducir efectos tóxicos en organismos vivos. Diversos estudios recientes han investigado cómo estas nanopartículas interactúan a nivel celular y molecular, identificando varios mecanismos de toxicidad clave:

Estrés oxidativo

Una de las principales formas en que las AgNPs dañan a las células es mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Al entrar en contacto con componentes celulares, las nanopartículas de plata pueden catalizar la formación de radicales libres y otras ROS, lo que produce estrés oxidativo en la célula (Waktole 2023). El exceso de ROS daña lípidos de membranas, proteínas y material genético, alterando funciones vitales. Este estrés oxidativo puede desencadenar vías de señalización de inflamación (liberación de citocinas proinflamatorias) y activar mecanismos de muerte celular programada (apoptosis) si el daño es severo (Waktole 2023), (Zhang et al. 2022). De hecho, se ha observado que las AgNPs elevan marcadores de peroxidación lipídica y disminuyen las defensas antioxidantes en células expuestas, confirmando el desequilibrio redox inducido. El estrés oxidativo resultante es un denominador común de la toxicidad de la plata nano, contribuyendo tanto a la muerte celular directa como a efectos inflamatorios en tejidos expuestos.

Liberación de iones plata (Ag^+)

Otro mecanismo importante es la liberación disolutiva de iones Ag^+ desde la superficie de las nanopartículas. En medios biológicos, especialmente a valores de pH fisiológicos o ligeramente ácidos, las AgNPs pueden ionizarse parcialmente liberando Ag^+ . Estos iones de plata son altamente reactivos y tóxicos por sí mismos, y pueden unirse a grupos tiol en proteínas, desactivando enzimas y alterando la función de proteínas estructurales (Waktole 2023). Asimismo, los iones Ag^+ pueden interactuar con el ADN y otras biomoléculas, provocando daños genéticos o inhibiendo la replicación celular (Waktole 2023). Se considera que muchas de las propiedades bactericidas de las AgNPs provienen de los iones liberados, los cuales penetran en las bacterias y desestabilizan sus procesos metabólicos. En células humanas, esta liberación iónica contribuye a la citotoxicidad y explica efectos que a veces son proporcionales a la cantidad de plata disuelta más que al número de nanopartículas en sí. Por tanto, la disolución iónica actúa en sinergia con el estrés oxidativo: la

oxidación superficial de las AgNPs genera iones Ag^+ y ROS simultáneamente, amplificando el daño celular (Zhang et al. 2022).

Daño a membranas celulares

Las nanopartículas de plata pueden adherirse y perturbar directamente las membranas celulares debido a su pequeña escala y alta reactividad superficial. En el caso de bacterias, por ejemplo, las AgNPs se adhieren a la pared celular y membrana citoplasmática, alterando su integridad; esto puede conducir a fugas de componentes intracelulares y finalmente a la muerte de la bacteria (Ferdous y Nemmar 2020). En células eucariotas (como las células humanas), las AgNPs interactúan con la bicapa lipídica de la membrana plasmática y orgánulos, causando alteraciones estructurales. Estudios espectroscópicos han evidenciado cambios en las proteínas de membrana, fosfolípidos y carbohidratos de la superficie celular tras la exposición a AgNPs, indicando una disrupción fisicoquímica de la membrana (Zhang et al. 2022). Esta perturbación puede aumentar la permeabilidad de la membrana, permitiendo la entrada descontrolada de iones o la salida de moléculas esenciales, desequilibrando la homeostasis celular. Además, la interacción con membranas mitocondriales puede colapsar el potencial mitocondrial, contribuyendo a la liberación de factores proapoptóticos. En resumen, el daño físico a las membranas es otro mecanismo tóxico por el cual las AgNPs comprometen la viabilidad celular.

Daño genético y apoptosis

Como consecuencia de los mecanismos anteriores, las células expuestas a nanopartículas de plata pueden sufrir daño al ADN y activación de vías de muerte celular. El estrés oxidativo y los iones Ag^+ pueden inducir lesiones en el material genético, tales como rupturas de cadena de ADN o alteraciones en bases nitrogenadas, lo cual puede resultar en mutaciones o activar respuestas de reparación de ADN. Diversos estudios han reportado que las AgNPs aumentan los marcadores de daño genotóxico (por ejemplo, ensayos comet y micronúcleo muestran roturas en el ADN) en células humanas expuestas crónicamente a bajas concentraciones de nano-plata (Kim et al. 2011), (Zhang et al. 2022). Frente a daños irreparables, las células inician programas de apoptosis: las AgNPs han demostrado desencadenar apoptosis vía la ruta mitocondrial, asociada a la liberación de citocromo c y activación de caspasas, en distintos tipos celulares (Zhang et al. 2022). También se ha observado necrosis celular a dosis más altas o exposiciones prolongadas, donde el daño excede la capacidad de la célula para morir ordenadamente. Adicionalmente, la liberación de citocinas inflamatorias por células estresadas puede reclutar células inmunitarias, exacerbando el daño tisular a través de inflamación. En modelos in vivo, la acumulación de AgNPs en órganos como hígado, pulmón, riñones y cerebro se ha correlacionado con estrés oxidativo, inflamación y apoptosis en esos tejidos (Waktole 2023). Esto sugiere que los efectos tóxicos a nivel celular (ROS, daño de membrana, daño de ADN) escalan a respuestas orgánicas, pudiendo ocasionar disfunción de órganos si la exposición es lo suficientemente alta.

Los mecanismos de toxicidad de las nanopartículas de plata involucran una combinación de efectos fisicoquímicos (generación de ROS, liberación de Ag^+ , interacción con membranas) que convergen en daño molecular y activación de vías de muerte celular. La toxicidad efectiva de las AgNPs dependerá de factores como su tamaño (las más pequeñas tienden a ser más reactivas y liberan más iones), su revestimiento o recubrimiento superficial (que puede mitigar o agravar estas interacciones), la dosis y ruta de exposición, entre otros. Por ello, comprender estos mecanismos es crucial para evaluar la seguridad de las AgNPs en aplicaciones biomédicas y ambientales, y para diseñar nanopartículas más seguras que minimicen efectos adversos mientras se aprovechan sus propiedades útiles (Waktole 2023).

Capítulo 3

3.1. Antecedentes

3.1.1. El ejercicio clínico inter, multi y transdisciplinario de la medicina y la odontología.

En el campo de la salud, la constante búsqueda de nuevos tratamientos y terapias clínicas ha impulsado la innovación en la aplicación de tecnologías avanzadas. En este contexto, la bioingeniería se ha posicionado como una disciplina clave que aporta soluciones y avances significativos a las ciencias de la salud. Esta sinergia entre la ingeniería y la biología ha permitido el desarrollo de terapias personalizadas y la creación de dispositivos médicos y odontológicos innovadores, que abordan las necesidades terapéuticas actuales. Actualmente, la medicina y odontología personalizada y las nuevas tecnologías están revolucionando el enfoque hacia el cuidado del paciente, brindando opciones de tratamiento más eficaces y adaptadas a las particularidades de cada individuo. Es necesario explorar cómo la innovación en la terapia clínica, el campo de la bioingeniería y las necesidades terapéuticas asociadas a las nuevas tecnologías están moldeando el futuro de las ciencias de la salud y como la ingeniería potencializa tales cambios.

3.1.2. Antecedentes de la transdisciplina con enfoque a la perspectiva ingeniería y bioingeniería, así como su impacto en las ciencias de la salud y la odontología.

La inter, multi y transdisciplina clínica relacionada con la medicina y odontología personalizada promueve la colaboración y la integración de diferentes disciplinas y especialidades para ofrecer una atención más completa, personalizada y centrada en el paciente. Esto permite abordar los problemas de salud desde múltiples perspectivas y garantizar una atención de calidad y eficacia óptimas.

Hoy en día la transdisciplina en la odontología y la ingeniería es un campo emergente que combina los conocimientos y enfoques de la ingeniería con la odontología para mejorar los resultados y la eficiencia en el cuidado oral. Aplicando conocimientos de ingeniería de materiales ha sido fundamental para el desarrollo de nuevos materiales dentales, como cerámicas, compuestos y biomateriales con propiedades mejoradas en términos de resistencia, durabilidad y biocompatibilidad. Estos avances han permitido la creación de restauraciones dentales más efectivas y estéticas, así como de implantes dentales de alta calidad. Por otra parte, la bioingeniería aplicada en prótesis dentales la cual ha permitido el diseño y producción de prótesis

personalizadas y precisas. Mediante técnicas como la escaneo 3D, la modelación computacional y la fabricación asistida por ordenador, los ingenieros y los odontólogos pueden trabajar en conjunto para desarrollar prótesis dentales a medida que se ajusten perfectamente a las necesidades del paciente. Aunado a eso, la ingeniería de imágenes médicas ha desempeñado un papel importante en el campo de la odontología al permitir la obtención de imágenes detalladas de los dientes y las estructuras orales.

Técnicas como la tomografía computarizada (TC), la resonancia magnética (RM) y la radiografía digital han facilitado el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades dentales y maxilofaciales de manera más precisa y eficiente.

3.1.3. La bioingeniería y la odontología.

3.1.3.1. La ortodoncia.

La bioingeniería como disciplina asociada a la ingeniería con fundamentos de injerencia en las ciencias de la salud promueve y permite la articulación de conocimientos en ciencias afines específicas como la odontología. La aplicación de estos conocimientos asociados a métodos, técnicas y propuestas de intervención clínica establecen nuevos campos de intervención, tal es el caso de la bioingeniería dental que abre paso a nuevos horizontes esperando obtener mejores alcances en beneficio de la salud de la población.

En las ciencias odontológicas, la Ortodoncia es el área específica que tiene como responsabilidad el estudio y la supervisión del crecimiento y desarrollo de la dentición y sus estructuras anatómicas relacionadas, desde el nacimiento a la madurez dentaria, incluyendo todos los procedimientos preventivos y correctivos de las

irregularidades que requieren la reposición dentaria por medios funcionales y mecánicos para el establecimiento de una oclusión normal y de contornos faciales armonizados.

Desde tiempo atrás aparecen alusiones a la importancia de la posición de los dientes en la estética de la boca, aunque el único objetivo se centraba en alineamiento dentario a costa de los procedimientos más mecanicistas y cruentos. Inicialmente, se mediaba el cambio en la posición dentaria luxando la pieza y llevarla de forma forzada a su posición correcta, aunque pronto se comprendió la peligrosidad de la operación y la ventaja de desplazar el diente lentamente por procedimientos mecánicos. Así Fauchard en su libro Tratamiento de las irregularidades dentarias recoge los primeros aparatos ortodónticos que perseguían mejorar la estética de los dientes. Esto contribuyó a que, en la actualidad, la ortodoncia clínica cuyas bases y fundamentos científicos serían definidos por John Hunter en su obra Tratado práctico de las enfermedades de los dientes.

La ortodoncia establece tres modelos de atención en el paciente, la ortodoncia preventiva que generalmente puede establecerse por el odontólogo de práctica general, la ortodoncia interceptiva que debe de ser abordada por un odontólogo especialista en odontopediatría y la ortodoncia correctiva que deberá ser atendida por un odontólogo especialista en ortodoncia y ortopedia maxilofacial (figuras. 3, 4, 5).



Figura 3. Ortodoncia preventiva



Figura 4. Ortodoncia interceptiva



Figura 5. Ortodoncia correctiva

Son numerosos los factores etiopatogénicos asociados al crecimiento y desarrollo, dentro de los que destacan:

- La herencia, los factores raciales, factores faciales, factores dentarios, las deficiencias congénitas, las anomalías óseas y los problemas patológicos locales o generales.
- Las anomalías de forma y tamaño que pueden ser del tipo congénita, hereditaria, traumática, infecciosa, patología de la erupción, erupción precoz, erupción tardía, erupción ectópica, tumores, traumatismos, entre otros.

3.1.3.2. Maloclusión.

La maloclusión se refiere a cualquier grado de contacto irregular entre los dientes agonistas y antagonistas del maxilar y la mandíbula. Esto incluiría sobremordidas, sobremordidas, mordidas abiertas y mordidas cruzadas. Salzmann (1950) clasificó la estructura esquelética subyacente, generando un sistema de clasificación universal.

Clase esquelética I: Exclusivamente dental, con los huesos de la cara y la mandíbula en armonía entre sí y con el resto de la cabeza, siendo el perfil es ortognático (recto).

- División 1: Mal relación local de incisivos, caninos y premolares.
- División 2: Protrusión de incisivos maxilares.
- División 3: Retrusión de incisivos maxilares.
- División 4: Protrusión bimaxilar.

Clase esquelética II: Desarrollo mandibular distal en relación con la maxila, siendo el perfil es prognático (convexo).

- Clase II/1: Arco maxilar estrecho con apiñamiento en la región de los caninos.

- Clase II/2: Incisivos maxilares inclinados hacia lingual, los laterales pueden ser normales o protruidos.
- Clase esquelética III: Crecimiento excesivo de la mandíbula con un ángulo mandibular obtuso, siendo el perfil es retrognático (cóncavo).

3.1.3.3. El objeto del tratamiento de ortodoncia y tipos de aparatología.

La terapia clínica y biomecánica ortodóncica tiene como fundamento el de corregir las maloclusiones en cualquiera de sus clasificaciones y lograr una alineación adecuada de los dientes y una correcta relación entre las arcadas dentales. Esto se logra mediante el uso de diferentes tipos de aparatología, que pueden ser fijos o removibles, dependiendo de las necesidades del paciente. Algunos de los tipos de aparatología utilizados en ortodoncia son:

- **Brackets:** son pequeñas piezas metálicas o estéticas que se adhieren a la superficie de los dientes. Los brackets están unidos por alambres y el ortodoncista los ajusta regularmente para aplicar fuerzas controladas que guían los dientes hacia su posición deseada.
- **Arco lingual:** es un alambre metálico que se coloca en la parte posterior de los dientes para mantener la posición de los molares y prevenir movimientos indeseados.
- **Expansores palatinos:** son dispositivos que se utilizan para ensanchar el paladar en pacientes con maxilares estrechos. Se colocan en el paladar y se ajustan gradualmente para lograr una expansión controlada.
- **Máscaras faciales:** se utilizan en casos de problemas esqueléticos, como una mandíbula subdesarrollada. La máscara facial se sujeta a los brackets y se utiliza para aplicar fuerzas externas que estimulan el crecimiento de la mandíbula.
- **Aparatos funcionales:** son dispositivos que se utilizan para corregir problemas de mordida y alineación de los maxilares. Estos aparatos ayudan a mejorar la función de la mandíbula y estimulan su crecimiento en una posición más favorable.
- **Aparatos removibles:** son dispositivos de plástico que se pueden quitar y volver a colocar en la boca. Los aparatos removibles, como los alineadores transparentes, se utilizan para corregir problemas menos complejos y permiten una mayor comodidad y facilidad de limpieza.

En la actualidad, el tratamiento de ortodoncia ha experimentado una transformación significativa, ofreciendo diversas alternativas para corregir maloclusiones y discrepancias esqueléticas. A pesar de los éxitos demostrados por la aparatología fija a lo largo del tiempo, se ha observado un creciente interés en explorar métodos más innovadores y cómodos para los pacientes. Un cambio notable se ha producido con la introducción de alineadores removibles, como Invisalign®, que han ganado terreno como una opción atractiva en comparación con la aparatología fija convencional. Este cambio ha sido respaldado por investigaciones que destacan los beneficios de los alineadores removibles en términos de salud periodontal y comodidad del paciente, marcando así una transición hacia enfoques más personalizados y eficientes en el campo de la ortodoncia.

En 2019 se realizó un estudio estadístico sobre los tipos de ortodoncias preferidas a nivel mundial, En la actualidad, el tratamiento de ortodoncia ha experimentado una transformación significativa, ofreciendo diversas alternativas para corregir maloclusiones y discrepancias esqueléticas. A pesar de los éxitos demostrados por la aparatología fija a lo largo del tiempo, se ha observado un creciente interés en explorar métodos más innovadores y cómodos para los pacientes. Un cambio notable se ha producido con la introducción de alineadores removibles, como Invisalign®, que han ganado terreno como una opción atractiva en comparación con la aparatología fija convencional. Este cambio ha sido respaldado por investigaciones que destacan los beneficios de los alineadores removibles en términos de salud periodontal y comodidad del paciente, marcando así una transición hacia enfoques más personalizados y eficientes en el campo de la ortodoncia.

Actualmente el tratamiento de ortodoncia se ha vuelto de mayor accesibilidad en el mercado, el cual se ofrece como varios métodos o técnicas para solucionar maloclusiones y discrepancias esqueléticas,

tanto así que ha aumentado la demanda en todos los grupos etarios. (Avilés Beltetón et al., 2011) La aparatología fija o convencionalmente conocida por años ha dado buenos resultados y son el método de tratamiento más usado. Sin embargo, al colocar la aparatología fija que incluye: brackets, bandas, tubos y aditamentos extras dentro de la cavidad oral, suelen dificultar la eliminación adecuada de la placa y tener la facilidad de retención del biofilm en el sistema estomatognático. (Darque & Paz Cortés, 2020). Al tener un mayor índice de la placa dental llega a provocar desmineralización del esmalte y posterior la inflamación gingival, por lo que depende el cuidado y autolimpieza de los pacientes para mantener una buena higiene bucal, la deficiencia de salud bucal, pueden desencadenar en enfermedad periodontal (Tufekci et al., 2011).

En otro estudio se determina que la ortodoncia con placas termoformadas removibles dio resultados positivos en cuanto al estado periodontal versus brackets convencionales fijos dentro de la cavidad oral. Rossini realizó un Meta análisis en el cual determina que la salud periodontal, revisando parámetros tanto en la cantidad y calidad de la placa, fueron mejores con los con placas termoformadas removibles versus a los tratamientos con aparatología fija convencional (Rossini et al., 2015b). Azaripour et al., observaron en 100 pacientes (50 con aparatología fija y 50 con alineadores tipo Invisalign®) en el periodo de 6 meses. Se pudo apreciar que la aparatología fija convencional de los pacientes interfiere directamente en la salud periodontal debido a que esta empeoraba el estado de higiene oral en dichos pacientes. Sin embargo, el acúmulo de placa era prácticamente el mismo en los dos grupos tanto en el tratado con Invisalign® como en el grupo tratado con aparatología fija. Se concluyó que los pacientes con Invisalign® gozaban de una salud periodontal mucho mejor, mientras que las técnicas de higienización no tuvieron diferencias en los dos grupos mencionados (Azaripour et al., 2015).

Levrini et al., con una muestra de 77 pacientes que los cuales agruparon en tres grupos (grupo Invisalign®, otro con aparatología fija y otro constituía el grupo control). En los cuales se evaluó parámetros como la profundidad de sondaje, índice de placa y el sangrado al sondaje. Dando como producto, datos similares a los obtenidos por Azaripour, que los alineadores con Invisalign® demuestran tener menores efectos adversos periodontales versus el grupo de aparatología fija ortodóntica. Concluyendo así que las placas termoformadas representarían la primera opción terapéutica en pacientes periodontalmente comprometidos (Azaripour et al., 2015; Levrini et al., 2015).

3.2. Innovación en terapia ortodóntica.

3.2.1. Sistemas de alineación.

La innovación en la terapia ortodóntica ha llevado a avances significativos en los últimos años, mejorando tanto los resultados de tratamiento como la experiencia del paciente. El primer alineador estético fue introducido por Kesling a principios de 1940. En 1964 el Dr. Nahoum fue el primero en desarrollar un plástico biológicamente compatible, afirmando que el material ideal debe ser inerte, no tóxico, sin olor e insípido y no siendo afectado por el ambiente bucal. En 1997 otros sistemas basados en las propuestas del Dr. Sheridan, establecieron que para que acontezca el movimiento de ortodoncia por medio de alineadores, deberían ser considerados tres componentes básicos, la fuerza, el espacio y el tiempo.

Desde su desarrollo en 1997, la tecnología Invisalign® se ha establecido en todo el mundo como una alternativa estética a los aparatos fijos convencionales. La tecnología CAD / CAM (por sus siglas en inglés, Computer-Aided Design (CAD) y Computer-Aided Manufacturing (CAM)) ha sido utilizada para pronosticar el tratamiento, los resultados y fabricar una serie de alineadores a medida, utilizando una sola silicona o impresión digital.

La estética juega un papel significativo en las decisiones de los pacientes para recibir tratamiento de ortodoncia, la preferencia de los alineadores estéticos se extiende a los adolescentes y adultos, esta demanda probablemente continuará aumentando, a pesar de las limitaciones con ciertos tipos de movimientos dentales. La principal ventaja de los sistemas de alineación, en comparación con los dispositivos tradicionales de ortodoncia, es la mejora en la estética y comodidad para el paciente. Por estas razones, los pacientes que se preocupan por su apariencia o su forma de hablar son buenos candidatos para el tratamiento con alineadores estéticos (Figura 4). Sin embargo, los alineadores estéticos tienen algunas desventajas, incluyendo mayores costos y la limitación para tratar ciertos tipos de maloclusiones. Dentro de la gama de sistemas de alineación ortodóntica, destacan:

- **Alineadores transparentes convencionales:** son los alineadores tradicionales utilizados en ortodoncia. Están fabricados con un material plástico transparente o translúcido y se utilizan para corregir problemas de alineación dental.
- **Alineadores de baja fricción:** estos alineadores están diseñados para reducir la fricción entre los alineadores y los dientes, lo que permite un movimiento dental más suave y eficiente. La baja fricción puede acelerar el proceso de tratamiento y mejorar la comodidad del paciente.
- **Alineadores termoplásticos:** estos alineadores están fabricados con un material termoplástico que se vuelve flexible cuando se calienta y se adapta a la forma de los dientes. Este tipo de alineadores puede proporcionar un ajuste más preciso y cómodo.
- **Alineadores elásticos:** tienen inserciones elásticas en áreas específicas para aplicar fuerzas direccionales adicionales a los dientes. Estas inserciones elásticas ayudan a corregir problemas específicos de maloclusión y pueden mejorar los resultados del tratamiento.
- **Alineadores híbridos:** combinan características de los alineadores transparentes con otros tipos de aparatología ortodóncica, como brackets o bandas, para abordar casos más complejos. Estos alineadores ofrecen una mayor versatilidad en el tratamiento y permiten la combinación de diferentes enfoques ortodóncicos.



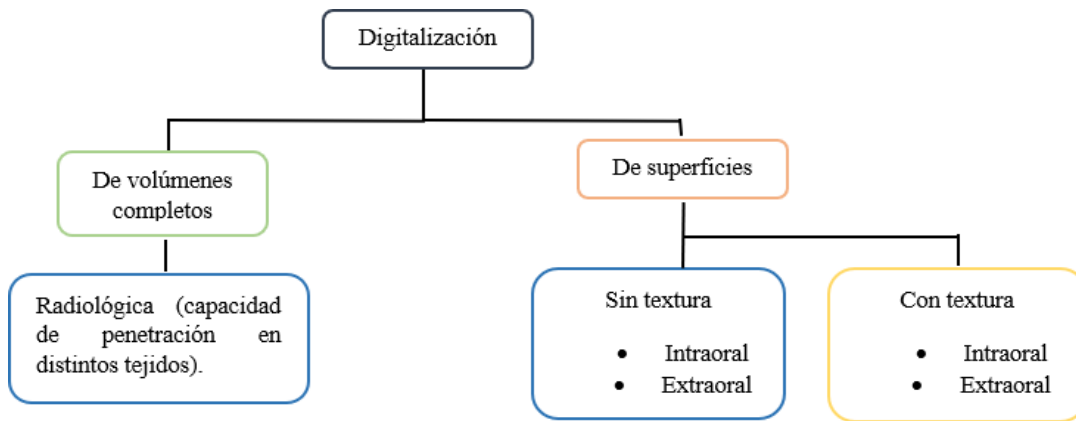
Figura 6. Alineador ortodóncico Invisalign.

3.2.2. Flujo digital

El flujo digital ha tenido un impacto significativo en la odontología personalizada, mejorando la precisión, eficiencia y experiencia del paciente. Desde el escaneo intraoral hasta el diseño y fabricación asistidos por computadora, estas tecnologías digitales revolucionan la forma en que se planifican y realizan los tratamientos, ofreciendo resultados más precisos y satisfactorios para los pacientes.

3.2.3. Escáner intraoral

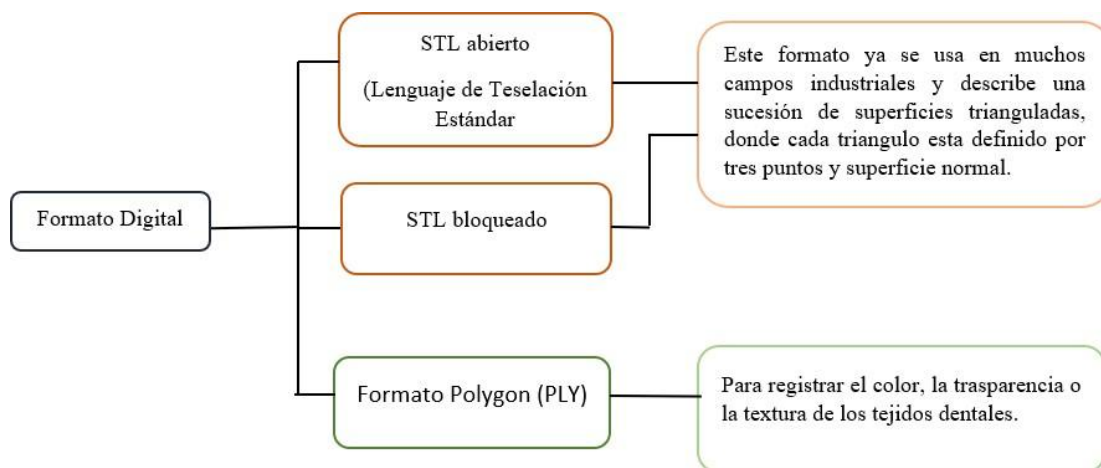
Los escáneres intraorales son dispositivos para capturar impresiones ópticas directas en odontología. Al igual que otros escáneres tridimensionales, proyectan una fuente, luz estructurada sobre el objeto a escanear, en este caso los arcos dentales, incluidos los dientes preparados y los cuerpos de escaneo de implantes, utilizados para transferir la posición del implante dental. Las imágenes de los tejidos dentogingivales, así como los cuerpos de exploración del implante capturados por los sensores de imagen se procesan mediante el software de exploración, que genera nubes de puntos. Estas nubes de puntos son luego trianguladas por el mismo software, creando un modelo de superficie 3D. Los modelos de superficie en 3D de los tejidos dentogingivales son el resultado de la impresión óptica y son la alternativa digital a los modelos de yeso tradicionales o analógicos (Esquema 1).



Esquema 1. Digitalización de volúmenes 3D o estructuras en odontología.

En la actualidad existen diferentes escáneres digitales intraorales, que se dividen en dos grandes grupos, directos (in office) e indirectos (out office). Los primeros son aquellos que permiten no sólo escanear en boca, sino también diseñar y fabricar la restauración en la consulta, como son los sistemas CEREC AC (Sirona Dental Systems), E4D (D4D Technologies) y el sistema de Carestream.

En el funcionamiento del escáner intraoral, el sistema IOS es un dispositivo médico compuesto por una cámara de mano (hardware), una computadora y un software, teniendo como objetivo registrar con precisión la geometría tridimensional de un objeto (Esquema 2).



Esquema 2. Formato digital en escáneres intraorales.

Las marcas comerciales más destacadas en la tecnología de escáner intraoral son el sistema Cerec Omnicam, el sistema Carestream, el sistema Trios 3Shape y de mayor uso actualmente en alineadores de ortodoncia, el sistema iTero. El escáner por sistema iTero permite visualizar una simulación del resultado a establecer tras el tratamiento de ortodoncia invisible (Invisalign), pronosticando el tipo de mordida y analizando en profundidad la estética de la sonrisa, ofrece un registro detallado, dentro de sus características destacan el que es completamente indoloro, es un sistema seguro, no emite ningún tipo de radiación perjudicial para la salud del paciente, la toma de registros se realiza de manera cómoda y ofrece imágenes de alta calidad, haciendo el tratamiento mucho más preciso.

3.2.4. Impresión 3D.

La fabricación aditiva o impresión 3D, es un proceso que crea objetos físicos a partir de un modelo digital. Hay diferentes tecnologías de impresión 3D y materiales con los que imprimir, pero todas están basadas en el mismo principio, un modelo digital es convertido en un objeto sólido físico tridimensional a base de añadir material capa a capa.

Dentro de los modelos de impresión 3D, el modelado por deposición fundida (FDM) es una tecnología de impresión que trabaja extruyendo un polímero termoplástico a través de una boquilla caliente, que se va depositando en una plataforma de construcción, considerado como una forma de fabricación aditiva además de un proceso de unión de materiales para crear objetos a partir de datos de un modelo 3D, normalmente capa sobre capa.

Para la impresión 3D bajo los fundamentos de la tecnología FDM es posible el uso polímeros a base de ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el PLA (Ácido Poliláctico) y el Nylon (Poliamida), pero otras variedades más exóticas de materiales pueden usarse también, como una mezcla de plástico y madera o carbón.

3.3. Propiedades de los materiales

3.3.1. Polímero (TPU)

En el ámbito de los materiales plásticos, las principales tecnologías y los tipos de materiales aptos para la impresión 3D incluyen termoplásticos (amorfos y semicristalinos), materiales plásticos termoestables, elastómeros termoestables y elastómeros termoplásticos (TPE). Los polímeros termoestables, como el poliuretano (PU), fueron los primeros en utilizarse para la fabricación aditiva mediante la técnica de la fotopolimerización, como la Stereolithography (SLA) o el Direct Light Processing (DLP).

Las tres técnicas principales de impresión 3D, FDM, SLS y la impresión 3D de resina utilizan diferentes polímeros. FDM es ampliamente utilizado y compatible con una gama de filamentos termoplásticos. PLA y ABS son los más utilizados y los más fáciles de imprimir. En otros casos es posible el uso de TPU o Poliuretano Termoplástico.

La mayoría de los termoplásticos de grado de ingeniería requieren una máquina más profesional, por ejemplo, con una cámara calentada. Las propiedades de estos materiales son ampliamente conocidas y aceptadas en la industria del moldeo por inyección. Sin embargo, debido a la impresión 3D y su estructura en capas, las propiedades dependen en gran medida de la orientación.

El monómero comúnmente utilizado para la síntesis del TPU (poliuretano termoplástico) es el diisocianato de difenilmetano (MDI) o el diisocianato de tolueno (TDI) en combinación con polioles. Estos monómeros reaccionan con los polioles para formar una estructura de uretano, que es la base del TPU. El MDI es uno de los monómeros más utilizados en la producción de TPUs debido a su baja toxicidad y baja volatilidad. El TDI también se utiliza en menor medida, pero tiene una mayor tendencia a la volatilización y puede ser más irritante para la piel y las vías respiratorias.

El poliuretano termoplástico (TPU) se compone de segmentos duros y blandos cuya proporción y naturaleza determinan sus propiedades finales. La estructura en bloques, resultado de la reacción entre diisocianatos (como MDI o TDI) y polioles (como polietér o poliéster), permite al TPU combinar alta elasticidad con resistencia mecánica y química. En la siguiente imagen se ilustra esquemáticamente la arquitectura molecular del TPU, así como sus principales características y aplicaciones industriales, lo que permite visualizar su versatilidad como material polimérico funcional, véase en la figura #

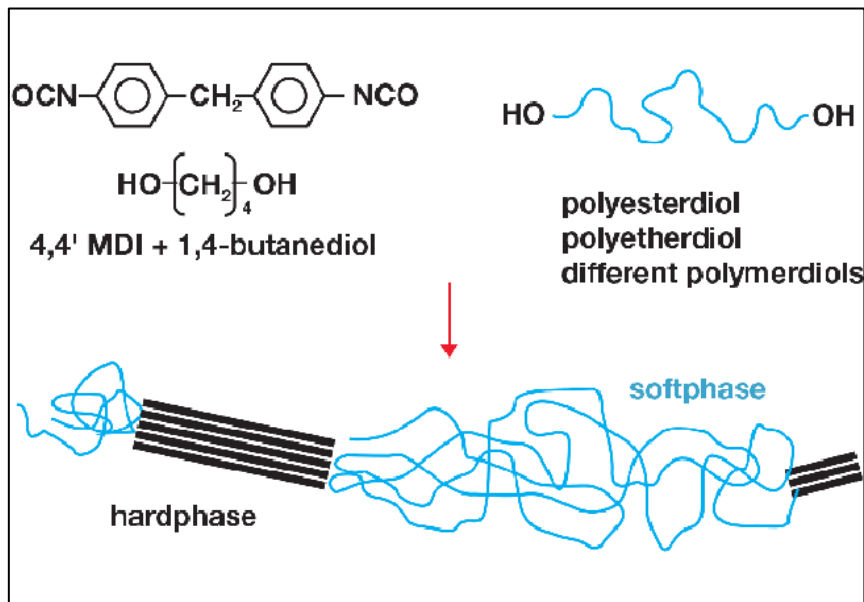


Figura 7. Representación esquemática de la estructura segmentada del poliuretano termoplástico (TPU), compuesta por bloques duros (producto de diisocianatos) y bloques blandos (polioles).

En la síntesis del TPU, los monómeros de diisocianato se combinan con polioles, que pueden ser poliéteres o poliésteres, para formar la cadena polimérica. La cantidad y la naturaleza de los polioles utilizados pueden variar según las propiedades deseadas del TPU final, como su dureza, flexibilidad y resistencia. Es importante tener en cuenta que existen diferentes formulaciones y variantes de TPU disponibles en el mercado, y pueden utilizarse diferentes monómeros y polioles en su fabricación para obtener distintas propiedades y aplicaciones específicas.

El poliuretano termoplástico (TPU) exhibe propiedades mecánicas y físicas excepcionales que lo distinguen como un material polimérico versátil. En cuanto a sus propiedades mecánicas, el TPU destaca por su notable flexibilidad y elasticidad, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren resistencia al impacto y resiliencia. También es altamente resistente al desgaste, duradero y capaz de mantener sus propiedades incluso en condiciones adversas. Químicamente, el TPU muestra buena resistencia a diversos productos químicos, aceites y solventes, lo que lo convierte en una opción robusta en entornos industriales.

En cuanto a sus propiedades físicas (ver Tabla 1), el TPU puede ofrecer transparencia, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren claridad visual, como películas protectoras. Además, presenta resistencia a las condiciones meteorológicas, asegurando que mantenga sus propiedades físicas bajo diferentes condiciones ambientales. La baja densidad del TPU contribuye a su ligereza. Su estabilidad dimensional es destacada, manteniendo su forma y dimensiones en diversas condiciones.

En general, el TPU muestra buena resistencia a la absorción de agua, favoreciendo su rendimiento en entornos húmedos. Estas propiedades hacen del TPU un material de elección para múltiples aplicaciones, demostrando su versatilidad y adaptabilidad en diversos sectores industriales.

3.4. Cristalinos, policristalinos, amorfos.

En ciencia de materiales, los sólidos pueden clasificarse según la regularidad de su estructura atómica en cristalinos, policristalinos o amorfos. En un material cristalino, los átomos se disponen de forma periódica en tres dimensiones, repitiendo un patrón ordenado en toda su estructura. Esta periodicidad define una red cristalina caracterizada por celdas unitarias que se repiten, lo que confiere propiedades anisotrópicas en muchos casos (diferencias de propiedades según la dirección cristalográfica). Por el contrario, en un sólido amorfo la disposición de los átomos carece de orden periódico de largo alcance.

El término “amorfo” típicamente implica una estructura vítrea, semejante a la del vidrio, donde existe cierto orden de corto alcance (los átomos vecinos inmediatos mantienen distancias definidas) pero no hay un patrón

que se repita regularmente más allá de unas pocas dimensiones atómicas. Entre estos extremos se encuentran los materiales policristalinos, que están formados por una multitud de pequeñas regiones cristalinas (cristalitos o granos) unidas entre sí. Cada grano individual es un cristal orientado al azar respecto a sus vecinos, y la interfase entre granos (los límites de grano) rompe la continuidad de la red periódica. La mayoría de los metales y cerámicos de uso ingenieril son policristalinos en la práctica, presentando así un comportamiento macroscópicamente isotrópico si sus granos están distribuidos aleatoriamente.

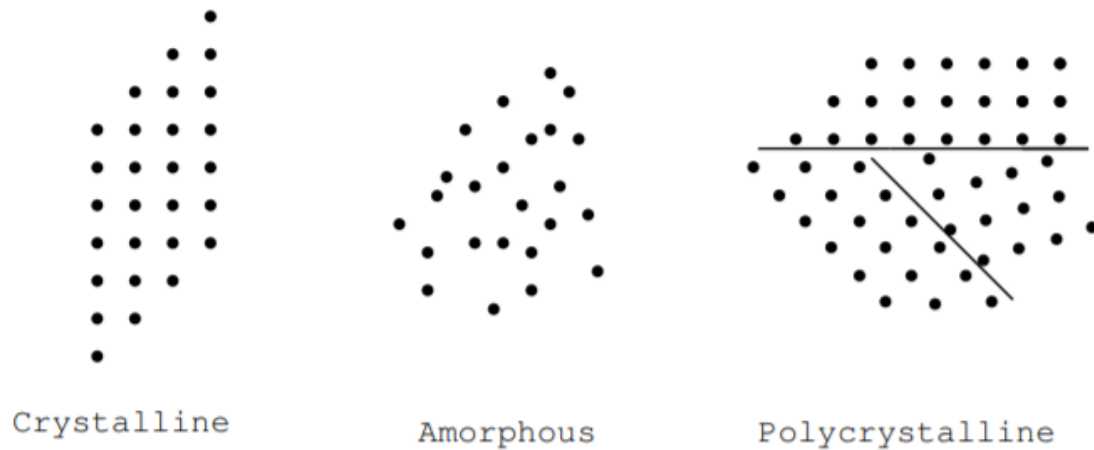


Figura 8. Ilustración de la estructura atómica cristalina, amorfa y policristalina.

Un mismo material puede existir en forma cristalina, policristalina o amorfa dependiendo de las condiciones de formación. Por ejemplo, el silicio y el dióxido de silicio (sílice) pueden encontrarse en las tres formas a temperatura ambiente. En el silicio cristalino, cada átomo ocupa posiciones bien ordenadas dentro de una red (estructura diamantina), mientras que el silicio amorfo presenta la misma composición y densidad aproximada, e incluso un número similar de vecinos más cercanos, pero carece de orden a mediano y largo alcance. Estas diferencias estructurales tienen un impacto notable en las propiedades físicas. Por ejemplo, las propiedades eléctricas de un material pueden variar según su grado de cristalinidad.

En un cristal puro y bien ordenado, los electrones pueden fluir con facilidad a través de la estructura, lo que suele traducirse en mayor conductividad eléctrica. En cambio, en un sólido amorfo (o en un cristal con abundantes defectos o impurezas), la falta de orden prolongado provoca que los electrones se dispersen o sean más propensos a ser atrapados, reduciendo la conductividad.

De igual modo, las propiedades mecánicas pueden diferir: los cristales individuales pueden ser anisótropos (sus propiedades mecánicas dependen de la dirección, debido a la orientación de los planos atómicos), mientras que un material policristalino tiende a comportarse isotrópicamente si la orientación de sus numerosos granos es aleatoria. En los amorfos, la ausencia de planos de deslizamiento definidos implica que bajo estrés mecánico pueden deformarse de manera diferente (p.ej., mediante flujo viscoso en vidrios). En resumen, cristalino implica orden y repetición tridimensional en la estructura; policristalino implica múltiples dominios cristalinos orientados al azar; y amorfo implica desorden de largo alcance. Cada tipo de estructura aporta propiedades particulares que son fundamentales en la ingeniería de materiales.

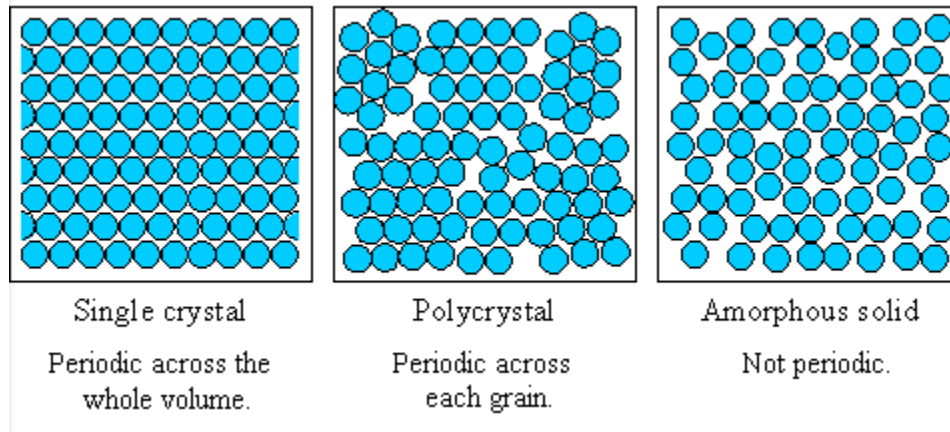


Figura 9. Representación de la estructura atómica en sólidos: cristal único, policristalino y amorfo..

3.5. Metales, Cerámicos y polímeros.

Los materiales de uso tecnológico se agrupan clásicamente en tres grandes familias según su composición química y tipo de enlace predominante: metales, cerámicos y polímeros. Cada categoría exhibe estructuras internas y tipos de enlace químicos distintos, lo cual da lugar a propiedades características en cada caso. A continuación, se describen las particularidades de cada familia:

Metales

Están formados por elementos metálicos (por ejemplo, hierro, cobre, oro) o por aleaciones de varios metales. Los átomos metálicos se unen mediante enlace metálico, el cual se caracteriza por una nube de electrones de valencia deslocalizados que se comparten entre muchos núcleos positivos. Este “mar de electrones” confiere a los metales varias de sus propiedades típicas: alta conductividad eléctrica y térmica, brillo o lustre característico, y buena capacidad de deformación plástica.

Debido a que los electrones son libres de moverse a través de la estructura metálica, los metales pueden transportar calor y electricidad de manera eficiente. Asimismo, bajo la aplicación de una fuerza, los iones metálicos (núcleos) pueden desplazarse uno respecto a otro permitiendo que el material se deforme sin fracturarse, ya que la nube electrónica actúa como lubricante que mantiene la cohesión. Por ello, la mayoría de los metales son dúctiles y maleables, capaces de estirarse en alambres o laminarse en láminas delgadas sin romperse. Los metales generalmente presentan resistencia mecánica elevada, especialmente bajo cargas de compresión o tensión moderada, y una tenacidad notable (resisten la propagación de grietas). Sin embargo, pueden ser susceptibles a la corrosión (oxidación) en ambientes reactivos y su resistencia tiende a disminuir a altas temperaturas (cercanas a su punto de fusión).

Cerámicos

Bajo este término se agrupa una amplia variedad de sólidos inorgánicos no metálicos, típicamente óxidos, nitruros, carburos, silicatos u otros compuestos entre elementos metálicos y no metálicos. Los cerámicos suelen estar dominados por enlaces iónicos y/o covalentes en su estructura. Estos enlaces son fuertes (más fuertes que el metálico en general) y a menudo direccionales, y no generan electrones libres. En consecuencia, los materiales cerámicos tienden a ser aislantes eléctricos y térmicos – es decir, no conducen bien la electricidad ni el calor – puesto que carecen de portadores de carga móviles. La fortaleza de los enlaces iónicos/covalentes también les confiere elevadas temperaturas de fusión, gran estabilidad química y alta dureza (resistencia a la deformación permanente). De hecho, muchos cerámicos son extremadamente resistentes al desgaste y pueden soportar ambientes corrosivos o temperaturas donde los metales fallarían.

Un claro ejemplo es la alúmina (Al_2O_3) o la zirconia (ZrO_2), empleadas en implantología dental y ortodoncia, las cuales mantienen su integridad en el ambiente bucal y frente a la carga mecánica. Sin embargo, la desventaja principal de los cerámicos es su fragilidad: al tener una estructura rígida donde el movimiento de dislocaciones (defectos lineales) está muy impedido, estos materiales toleran muy poca deformación plástica antes de fracturarse. Bajo esfuerzo, si se llega a romper la disposición de iones (haciendo que cargas iguales se enfrenten), no hay un mecanismo equivalente al “deslizamiento lubricado” de los metales; en su lugar, la grieta propaga rápidamente y el material se quiebra de forma brusca. Por ello, aunque poseen alta resistencia, su tenacidad (capacidad de absorber energía sin romper) es baja comparada con metales. En resumen, los cerámicos son materiales rígidos, duros y resistentes al calor y la corrosión, pero quebradizos, debido a la naturaleza de sus enlaces iónico-covalentes. Ejemplos en ortodoncia incluyen brackets cerámicos de alúmina policristalina, que ofrecen estética y dureza, aunque con mayor riesgo de fractura que los metálicos.

Polímeros

Los polímeros son materiales constituidos por macromoléculas orgánicas de alto peso molecular, formadas por la repetición de unidades más simples (monómeros) unidas por enlaces covalentes. Ejemplos incluyen los plásticos, las resinas sintéticas y biopolímeros naturales. En general, los polímeros tienen una estructura basada en cadenas de átomos (principalmente carbono e hidrógeno en polímeros orgánicos) unidas covalentemente, con fuerzas secundarias relativamente débiles (van der Waals, enlaces de hidrógeno) entre esas cadenas. Esta estructura les confiere propiedades muy distintas a las de metales o cerámicos. Por lo común, los polímeros presentan baja densidad (son livianos) y su resistencia mecánica es moderada a baja en comparación con metales o cerámicos. [Aduarte. \(2018, 19 de junio\). Propiedades de los materiales \[PDF\]. Recuperado de \[https://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/3_propiedades_de_los_materiales.pdf\]\(https://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/3_propiedades_de_los_materiales.pdf\)](https://aducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/3_propiedades_de_los_materiales.pdf)

Son materiales típicamente aislantes eléctricos y térmicos, similares a los cerámicos en este aspecto, porque no tienen electrones libres; de hecho, muchos se utilizan como dieléctricos o aislantes en dispositivos. Una característica sobresaliente es su alta flexibilidad y capacidad de deformación elástica: los polímeros pueden ser blandos o gomosos, y algunos exhiben gran elongación antes de romper debido a que sus cadenas pueden rotar y deslizarse parcialmente. Sin embargo, su comportamiento mecánico varía ampliamente según el tipo: existen polímeros termoplásticos (que se reblandecen con el calor y pueden moldearse repetidamente), termoestables (que una vez endurecidos no se funden, sino que se descomponen con el calor) y elastómeros (gomos con gran elasticidad). Los termoplásticos suelen ser dúctiles (deformables) y tenaces, mientras que los termoestables tienden a ser más rígidos y frágiles. En general, los polímeros no resisten temperaturas muy altas – se degradan o funden a temperaturas relativamente bajas comparadas con metales/cerámicos, pero resisten bien la corrosión química (no sufren oxidación galvánica, por ejemplo) y pueden resultar biocompatibles dependiendo de su composición (razón por la cual muchos polímeros se usan en dispositivos médicos y odontológicos). Por ejemplo, el poliuretano termoplástico (TPU) empleado en alineadores ortodónticos es un polímero que combina segmentos duros y blandos en su cadena, otorgándole elasticidad, transparencia y resistencia al desgaste. En síntesis, los polímeros aportan baja densidad, procesabilidad y flexibilidad, a costa de menor resistencia y estabilidad térmica. Son indispensables en aplicaciones donde se requieren materiales ligeros o con geometrías complejas, y en el campo biomédico se valoran por su compatibilidad y capacidad de ser funcionalizado (por ejemplo, incorporando nanopartículas en su matriz).

3.6. Nanomateriales.

Los nanomateriales son materiales cuyas dimensiones estructurales básicas se encuentran en la nano escala (usualmente entre 1 y 100 nm). En este rango de tamaño tan reducido, los materiales exhiben propiedades fisicoquímicas únicas que pueden diferir drásticamente de las que presentan en escala macroscópica (bulk). Entre las características sobresalientes de los nanomateriales se incluyen: una enorme relación superficie/volumen (al disminuir el tamaño de partícula, una mayor fracción de sus átomos está expuesta en la superficie), lo que conlleva alta reactividad y capacidad de absorción; también pueden mostrar efectos cuánticos o discretización de niveles de energía que no se observan en partículas grandes, dando lugar a

propiedades ópticas, magnéticas y eléctricas novedosas. Por ejemplo, nanopartículas de oro exhiben colores distintos (rojizos o azulados) debido a resonancias plasmónicas que dependen del tamaño y forma, y nanopartículas semiconductoras (puntos cuánticos) emiten fluorescencia de longitudes de onda específicas según su tamaño. En general, a escala nano es posible sintonizar (ajustar) las propiedades variando dimensiones o forma: los coeficientes de absorción óptica, la cataliticidad de una superficie, la resistencia mecánica o la temperatura de fusión pueden alterarse significativamente a medida que las partículas se hacen más pequeñas.

Aflori, M. (2021). Smart nanomaterials for biomedical applications – A review. *Nanomaterials*, 11(2), 396. <https://doi.org/10.3390/nano11020396>

Dadas estas singulares propiedades, en las últimas décadas los nanomateriales han emergido como herramientas transformadoras en múltiples campos, incluyendo la medicina y la biotecnología. En el ámbito biomédico, los nanomateriales se investigan y aplican en administración de fármacos (drug delivery), imagen médica (bioimagen), diagnóstico y terapias avanzadas, aprovechando su capacidad para interactuar con sistemas biológicos a nivel molecular y celular. Por ejemplo, nanopartículas poliméricas o liposomas se usan para transportar fármacos de manera dirigida, atravesando barreras biológicas; nanopartículas de óxido de hierro de ~10 nm sirven como agentes de contraste mejorados en imágenes por resonancia magnética; nanosistemas de oro o sílica dopados con compuestos fluorescentes permiten diagnóstico óptico y seguimiento de procesos celulares; y nanomateriales foto-térmicos (como nanorods de oro) se emplean en terapias contra el cáncer mediante hipertermia localizada inducida por láser.

Yaqoob, A. A., Ahmad, H., Parveen, T., Ahmad, A., Oves, M., Ismail, I. M., Qari, H. A., Umar, K., Ibrahim, M. N. M. (2020, 19 de mayo). Recent advances in metal decorated nanomaterials and their various biological applications: A review. *Frontiers in Chemistry*, 8, 341. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00341>

Un beneficio clave de los nanomateriales en biomedicina es que su tamaño comparable al de biomoléculas (proteínas, ADN, etc.) les permite interactuar íntimamente con células y microorganismos, pudiendo, por ejemplo, penetrar biofilms bacterianos o la membrana celular y liberar agentes activos. Adicionalmente, la gran superficie específica de las nanopartículas permite funcionalizarlas con diversos ligandos (anticuerpos, péptidos, etc.) para dirigirlas a blancos específicos, incrementando la eficacia terapéutica o diagnóstica.

Dentro de las aplicaciones biomédicas relevantes de los nanomateriales, destaca su uso como agentes antimicrobianos. Numerosos nanomateriales (metálicos, óxidos o compuestos) exhiben potentes propiedades bactericidas y fungicidas, generalmente superiores a las de partículas más grandes, debido a mecanismos como la liberación acelerada de iones tóxicos para los microbios, la generación de especies reactivas de oxígeno en superficies nanoestructuradas, o la fácil penetración en las membranas celulares microbianas. Un ejemplo prominente son las nanopartículas de plata (AgNPs), conocidas por su amplio espectro antimicrobiano. Las AgNPs, en particular, se han convertido en materiales comunes en odontología y ortodoncia gracias a su elevada actividad bactericida, efectiva contra bacterias Grampositivas y Gramnegativas. Estas nanopartículas liberan lentamente iones plata (Ag^{+}) que interfieren con procesos vitales de las bacterias (como la función de enzimas, integridad de la membrana y replicación del ADN), conduciendo a la inactivación de patógenos. Por ello, se han incorporado AgNPs en diversos productos médicos: recubrimientos de instrumental quirúrgico, apósitos para heridas para prevenir infecciones, materiales dentales (resinas de relleno, cementos) y dispositivos ortodónticos, como se detallará más adelante. Otros nanomateriales metálicos utilizados en biomedicina incluyen las nanopartículas de oro (AuNPs), que son inertes y biocompatibles, aprovechadas tanto para vehicular fármacos como para terapia fototérmica; y nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) o dióxido de titanio (TiO_2), que poseen actividad antimicrobiana y se emplean en recubrimientos dentales y ortopédicos, a veces en combinación con la plata para potenciar su efecto.

Yun, Z., Qin, D., Wei, F., & Li, X. (2022). Application of antibacterial nanoparticles in orthodontic materials. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 2433–2450. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0137>

Existen también nanomateriales carbonosos (fullerenos, nanotubos de carbono, grafeno) con aplicaciones biomédicas en sensores, andamiajes para ingeniería de tejidos y sistemas de liberación controlada.

No obstante, pese a los enormes beneficios potenciales de los nanomateriales, su incorporación en entornos clínicos debe considerar desafíos importantes. Entre ellos se encuentran la biocompatibilidad y toxicidad: a escala nano, algunas partículas pueden interactuar no solo con células diana sino también acumularse en órganos no deseados, generar respuestas inmunológicas o estrés oxidativo, etc. Por ejemplo, ciertas nanopartículas metálicas en altas concentraciones pueden ser citotóxicas o genotóxicas. Asimismo, aspectos de regulación y bioética surgen en torno al uso de nanomateriales en humanos, y se requieren estándares para asegurar su seguridad. La investigación actual se orienta al desarrollo de “nanomateriales inteligentes” o funcionalizado, que respondan a estímulos y puedan controlar mejor su acción, así como a estudiar su degradación o eliminación del cuerpo.

Aflori, M. (2021, febrero 4). Smart nanomaterials for biomedical applications – A review. *Nanomaterials*, 11(2), 396. <https://doi.org/10.3390/nano11020396>

Durmuş, H. O. (2024). Biomedical applications of nanomaterials: A short review. *Nano and Medical Materials*, 4(1), Article 2044. <https://doi.org/10.59400/nmm2044>

A pesar de estos retos, el progreso en nanotecnología sugiere que los nanomateriales continuarán revolucionando la medicina, ofreciendo soluciones innovadoras – por ejemplo, en odontología ya se exploran resinas compuestas con nanopartículas antimicrobianas para prevenir caries, y superficies nano-texturizadas para mejorar la integración de implantes. En el siguiente apartado, nos enfocaremos en una aplicación particular: la funcionalización de alineadores ortodónticos mediante nanopartículas, específicamente de plata, para conferirles propiedades bactericidas sin detrimento de su desempeño mecánico.

4. Aplicaciones clínicas de la funcionalización de alineadores en la ortodoncia.

En la ortodoncia contemporánea, los alineadores transparentes se han posicionado como una alternativa estética y confortable a la aparatología fija tradicional. Estos alineadores – típicamente fabricados con polímeros transparentes como poliuretano termoplástico (TPU) o poli (tereftalato de etileno glicol) (PETG) – se usan para ejercer fuerzas suaves y controladas que corrigen la posición dentaria. Una ventaja percibida de los alineadores removibles sobre los brackets convencionales es la mejora en la higiene oral: al poder retirarse para comer y cepillarse, tienden a acumular menos placa dental. Sin embargo, durante el uso diario los alineadores cubren en gran medida la superficie de los dientes y encías por tiempos prolongados (≈22 horas al día), creando un microambiente donde puede incrementarse la colonización bacteriana si no se toman precauciones adecuadas

Yun, Z., Qin, D., Wei, F., & Li, X. (2022). Application of antibacterial nanoparticles in orthodontic materials. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 2433 – 2450. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0137>

Estudios clínicos han observado que, aunque los pacientes con alineadores suelen presentar menores índices de desmineralización del esmalte que aquellos con brackets (debido a la ausencia de aditamentos pegados que retengan placa), sí puede ocurrir acumulación de biofilm en la cara interna del alineador y en las superficies dentales cubiertas, lo que conlleva riesgo de caries incipientes o gingivitis si la higiene es deficiente. Además, el alineador en sí puede desarrollar un biofilm en su superficie (con bacterias y hongos como *Candida* spp.), generando mal olor o pigmentación.

Frente a esta problemática, ha surgido en años recientes la iniciativa de funcionalizar los alineadores ortodónticos para que, además de su función mecánica de mover dientes, aporten beneficios terapéuticos adicionales, principalmente en el control antimicrobiano. La funcionalización se refiere a modificar la superficie o la composición del alineador para dotarlo de nuevas propiedades, como actividad bactericida,

antifúngica, liberación de fármacos o mejora en la resistencia al desgaste. En el contexto clínico, esto implica desarrollar recubrimientos o aditivos para los alineadores que inhiban la colonización bacteriana sin comprometer las características originales del dispositivo (transparencia, biocompatibilidad, precisión en el ajuste). Los alineadores podrían así servir no solo como medio de corrección ortodóntica, sino también actuar como dispositivos “activos” de liberación continua de agentes terapéuticos en la cavidad oral.

Yun, Z., Qin, D., Wei, F., & Li, X. (2022). Application of antibacterial nanoparticles in orthodontic materials. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 2433 – 2450. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0137>

Por ejemplo, se ha propuesto que un alineador recubierto con sustancias antimicrobianas podría ayudar a prevenir la gingivitis en pacientes susceptibles, liberando pequeñas dosis constantes de antiséptico en el entorno gingival durante su uso. De hecho, con la modificación apropiada, un alineador puede concebirse como un sistema de liberación prolongada (tipo drug-delivery) para ciertas condiciones orales. Esto es especialmente prometedor en periodoncia: se ha demostrado en un estudio que alineadores impregnados con compuestos antimicrobianos pueden reducir significativamente *P. gingivalis* en pacientes con periodontitis leve, actuando como férulas terapéuticas de uso extendido (24/7).

En la literatura científica reciente se han explorado diversas estrategias de recubrimientos antibacterianos para alineadores transparentes. Entre las aproximaciones probadas se encuentran recubrimientos con sustancias orgánicas de efecto bactericida, como quitosano modificado o polímeros con amonio cuaternario, y recubrimientos con nanopartículas inorgánicas con acción antimicrobiana (oro, zinc, etc.). Por ejemplo, Park et al. (2018) desarrollaron un recubrimiento a base de quitosano y carboximetilcelulosa sobre la superficie de alineadores de PETG, logrando crear una capa superhidrófila que dificultó significativamente la adhesión de bacterias en comparación con alineadores sin recubrimiento. Este tipo de recubrimiento polimérico, además de ser transparente, reduce la formación de placa bacteriana simplemente por propiedades físicas (hidrofilicidad y lisura superficial) combinadas con la conocida actividad antibacteriana del quitosano. En otro estudio, Park et al. (2022) cubrieron alineadores con una película de polisilsesquioxano (PSQ) que contenía grupos de amonio cuaternario en su estructura – agentes antibacterianos de amplio espectro – y cadenas hidrofóbicas largas. Los alineadores funcionalizados con este material demostraron inhibir eficazmente el crecimiento de *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* en pruebas *in vitro*, además de reducir la formación de placa en un modelo *in vivo* con perros beagle, no se observaron efectos adversos en los tejidos orales, indicando buena biocompatibilidad de este recubrimiento.

Wang, N., Yu, J., Yan, J., & Hua, F. (2023, 1 de febrero). Recent advances in antibacterial coatings for orthodontic appliances. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, artículo 1093926. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1093926>

De manera análoga, se han investigado nanopartículas con capacidad antimicrobiana como recubrimiento de alineadores. Xie et al. (2020) incorporaron nanoclústeres de oro modificados con amonio cuaternario (QA-GNCs) sobre la superficie de alineadores y observaron que estos eran capaces de prevenir la adhesión de *Streptococcus mutans* (bacteria clave en caries dental) y la formación de biofilm en el alineador, manteniendo dicho efecto antibacterial durante al menos 3 meses de uso simulado. Del mismo modo, Zhang et al. (2020) reportaron el uso de nanopartículas de oro funcionalizadas con 4,6-diamino-2-pirimidinotiol (AuDAPT) para recubrir alineadores, logrando alta efectividad contra *Porphyromonas gingivalis* (patógeno asociado a enfermedad periodontal) y comprobando que estos alineadores modificados no afectaban la viabilidad de células gingivales, es decir, mantenían una adecuada biocompatibilidad. Estos ejemplos ilustran que es factible dotar a los alineadores de una acción antibacteriana sostenida mediante recubrimientos nanoestructurados, abriendo la puerta a aplicaciones clínicas duales: corregir la posición de los dientes mientras se protege activamente la salud bucal del paciente.

A pesar de los avances iniciales, es importante señalar que la investigación en alineadores funcionalizados apenas comienza. En comparación con la larga trayectoria de estudios sobre brackets y alambres ortodónticos con propiedades antimicrobianas, los alineadores transparentes han recibido menos atención en este aspecto. Prácticamente solo unos pocos estudios recientes han abordado la incorporación de nanopartículas u otros agentes en alineadores para inhibir microbios. Por tanto, existe una gran oportunidad de innovación en este

campo. La motivación es clara: un alineador con propiedades bactericidas podría mejorar la experiencia del paciente, reduciendo el riesgo de caries y problemas gingivales durante el tratamiento ortodóntico, y simplificar el mantenimiento de la higiene, complementando (aunque no reemplazando) las rutinas de cepillado y enjuague. Además, podría alargar la vida útil de cada alineador al minimizar la formación de películas malolientes o pigmentadas que obliguen a sustituirlo prematuramente. En síntesis, la funcionalización clínica de alineadores mediante agentes activos persigue optimizar la terapéutica ortodóntica integrando enfoques de liberación de fármacos y control de infecciones en un mismo dispositivo. En el apartado siguiente se profundiza en una estrategia particular: el recubrimiento del material polimérico del alineador (TPU) con nanopartículas de plata, destacando sus beneficios potenciales.

4.1. Beneficios de cubrir el TPU con AgNPs, permitiendo que el alineador mantenga su estructura y obtenga una propiedad bactericida.

El recubrimiento de alineadores ortodónticos de poliuretano termoplástico (TPU) con nanopartículas de plata (AgNPs) representa una estrategia prometedora para conferirles propiedades bactericidas sin alterar su desempeño mecánico ni estético. Diversos beneficios funcionales pueden derivarse de esta modificación de superficie:

Propiedad antimicrobiana de amplio espectro

La plata es reconocida por su potente acción antimicrobiana contra una amplia gama de bacterias Grampositivas, Gramnegativas e incluso hongos. Al cubrir el TPU con AgNPs, el alineador adquiere una superficie bactericida capaz de eliminar o inhibir los microorganismos que entren en contacto con él. Esto es sumamente ventajoso en la cavidad oral, donde coexisten especies implicadas en caries dental (*S. mutans*, *Lactobacillus spp.*), enfermedades periodontales (*P. gingivalis*, *Aggregatibacter spp.*) y candidiasis (*Candida albicans*, en casos de aparatología removible). Las AgNPs liberan continuamente iones plata (Ag^{+}) en el medio bucal, los cuales interfieren con múltiples procesos biológicos de las bacterias: dañan la pared celular y la membrana citoplásmica, se unen a enzimas y proteínas vitales desactivándolas, y pueden inducir estrés oxidativo en la célula microbiana.

Wang, N., Yu, J., Yan, J., & Hua, F. (2023, 1 de febrero). Recent advances in antibacterial coatings for orthodontic appliances. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, artículo 1093926. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1093926>

De esta forma, el alineador recubierto con AgNPs podría mantener baja la carga bacteriana en las superficies dentales cubiertas y en el propio aparato. Esto contribuiría a prevenir la formación de placa dental y la desmineralización del esmalte subyacente. Cabe destacar que estudios en ortodoncia han mostrado que el uso de recubrimientos de nano-plata en brackets y alambres consigue reducciones significativas de *S. mutans* y *S. aureus* sin alterar las propiedades del aparato. Incluso se observó que brackets con nano-plata producen un efecto de “inhibición de contacto” que reduce la incidencia de caries incipientes alrededor de los brackets durante tratamientos prolongados. Por analogía, un alineador con AgNPs podría proteger las superficies lisas del diente (habitualmente propensas a manchas blancas de descalcificación en ortodoncia) gracias a esa acción antibacteriana de proximidad.

Mantenimiento de la integridad estructural y propiedades del alineador

Un requisito fundamental de cualquier recubrimiento en alineadores es que no comprometa la función principal del dispositivo. En este sentido, las AgNPs ofrecen la ventaja de poder aplicarse como una capa ultradelgada o incorporarse en bajas concentraciones, de modo que no alteran significativamente la transparencia, flexibilidad ni ajuste del alineador. Estudios previos con alambres ortodónticos han demostrado que es posible depositar nanopartículas de plata sobre su superficie sin modificar sus propiedades mecánicas o físicas de forma apreciable. En el caso del TPU, material relativamente flexible y transparente, un recubrimiento nanoestructurado de plata (por ejemplo, obtenido por deposición en fase vapor o inmersión) sería prácticamente invisible al ojo humano – conservando la estética cristalina del alineador – y añadiría una cantidad de masa despreciable (nanogramos), por lo que no aumentaría el espesor perceptible ni afectaría la

comodidad. Asimismo, el TPU recubierto mantendría su comportamiento elástico necesario para aplicar fuerzas a los dientes, ya que las AgNPs forman un film discontinuo a escala nanométrica que no rigidiza significativamente la superficie polimérica. En pocas palabras, se espera que el alineador conserve su forma, claridad y flexibilidad originales tras la funcionalización con plata. Esto cumple con la premisa de “mantener su estructura”, es decir, no sacrificar las cualidades intrínsecas del alineador ortodóntico.

Efecto prolongado y autónomo

A diferencia de los enjuagues bucales o geles antibacterianos, cuyo efecto depende de la disciplina del paciente y solo dura un corto periodo tras la aplicación, el recubrimiento de AgNPs proporcionaría una protección constante mientras el alineador esté en uso. Las nanopartículas actúan de forma continua y espontánea, liberando iones y eliminando bacterias sin necesidad de intervención activa del paciente. Dado que los alineadores se usan prácticamente todo el día, esto significa que el efecto bactericida está presente de manera permanente en boca. Estudios han indicado que los recubrimientos de nano-plata en aparatos ortodónticos pueden mantener actividad antimicrobiana sostenida en el tiempo; por ejemplo, brackets con recubrimientos de AgNPs y otros nanocompuestos han mostrado que su eficacia antibacterial persiste durante semanas de uso simulado. En el caso de alineadores, que típicamente se reemplazan cada 1–2 semanas por uno nuevo en el curso del tratamiento, un recubrimiento de AgNPs tendría una duración más que suficiente para ejercer su función durante la vida útil de cada alineador. Esto asegura que cada nuevo alineador entregado al paciente actúe también como un “agente terapéutico” temporario. La ventaja de este enfoque autónomo es clara: se reduce la dependencia de la cooperación del paciente para mantener la asepsia (por ejemplo, si un paciente olvida enjuagarse con un colutorio antibacteriano, el alineador recubierto aún está trabajando contra las bacterias). En adolescentes, que constituyen buena parte de la población ortodóntica y en quienes la higiene puede ser inconsistente, este beneficio podría marcar una diferencia en los resultados finales, evitando complicaciones.

Prevención de complicaciones y mejora de la salud oral durante el tratamiento

Al integrar la actividad antibacteriana en el alineador, se espera disminuir la incidencia de lesiones cariosas y inflamación gingival asociadas al tratamiento ortodóntico. Un alineador recubierto con AgNPs podría minimizar la proliferación de *S. mutans* en las superficies dentales cubiertas, dificultando la formación de ácido y placa, protegiendo así el esmalte de la desmineralización. Igualmente, al liberar iones plata en el entorno subgingival inmediato, podría controlar poblaciones bacterianas peri-gingivales, reduciendo el riesgo de gingivitis o periodontitis incipiente durante la ortodoncia. Esto es particularmente beneficioso dado que durante la ortodoncia suele haber una tendencia a la inflamación gingival por la dificultad añadida de higiene; con un alineador bactericida, se contrarrestaría parcialmente este efecto. Incluso se ha sugerido que los alineadores podrían servir para administrar iones remineralizantes (como fluoruro o calcio) junto con agentes antibacterianos, para simultáneamente reforzar el esmalte – en el caso de la plata, algunos estudios señalan que las AgNPs pueden favorecer la remineralización al eliminar bacterias competitivas y liberar trazas de compuestos de plata que interactúan con la hidroxiapatita. En suma, la cobertura con AgNPs añadiría una capa de protección para el paciente, convirtiendo el alineador en un dispositivo terapéutico multifuncional: corrige la maloclusión a la vez que protege la integridad dentogingival.

Compatibilidad con otras estrategias y consideraciones de seguridad

El enfoque de AgNPs es complementario a otras medidas de higiene y a otros posibles recubrimientos funcionales. Por ejemplo, podría combinarse con materiales que liberen fluoruro para potenciar el efecto anticaries, o con agentes antiadherentes que dificulten aún más la formación de biofilm. En cuanto a la seguridad, aunque la liberación de iones de plata en grandes cantidades podría ser citotóxica, las dosis implicadas en un alineador recubierto son muy bajas. Las evaluaciones *in vitro* y *in vivo* de dispositivos con nano-plata (como brackets recubiertos) han mostrado toxicidad insignificante en células humanas y tejidos orales, especialmente cuando las partículas están bien fijadas a la matriz (minimizando la ingestión accidental). Es importante optimizar el tamaño de partícula (idealmente entre 10–50 nm para equilibrio óptimo entre efectividad y liberación controlada) y el método de anclaje de las AgNPs al TPU, para evitar una liberación

explosiva inicial. Con un diseño adecuado, la tasa de liberación de iones Ag^+ puede mantenerse dentro de rangos seguros pero efectivos, asegurando la biocompatibilidad del alineador funcionalizado. Además, la cantidad total de plata por alineador sería muy pequeña (del orden de microgramos), por lo que la exposición sistémica para el paciente sería despreciable.

5. Metodología.

Síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs)

Se prepararon soluciones por separado de nitrato de plata (AgNO_3 , 99.9%, 0.77 g) y polivinilpirrolidona (PVP, M_w 40,000, $(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$, 99%, 0.5 g), disolviendo cada precursor en 50 mL de etanol anhidro ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 99.8%). La mezcla de reacción se mantuvo bajo condiciones de reflujo y agitación constante durante 10 minutos a una temperatura de 80 °C. Esta modificación en el tiempo de síntesis y en la concentración del agente estabilizante tuvo como objetivo obtener nanopartículas de plata con un tamaño máximo de 20 nm y una distribución de tamaño estrecha.

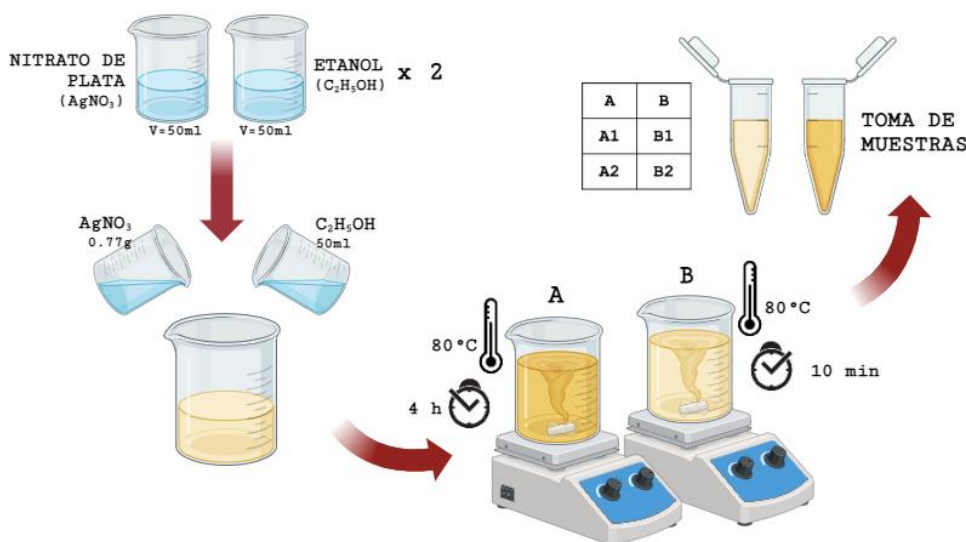


Figura 10. Esquema del proceso de síntesis química de nanopartículas de plata, solución A 4h de exposición y solución B 10 min de exposición, posterior a eso se tomaron 3 muestras de cada solución.

Caracterización de las nanopartículas de plata (AgNPs).

Análisis UV-Vis

Tras la síntesis de las nanopartículas de plata, se llevó a cabo un análisis espectroscópico en el rango UV-Vis con el fin de evaluar el plasmón de resonancia superficial (SPR) característico de estas estructuras metálicas. Las mediciones se realizaron en el intervalo de 300 a 700 nm, utilizando etanol como blanco. Se analizaron 2 muestras identificadas como A y A2. Los resultados muestran picos de absorbancia bien definidos en la región comprendida entre 424.01 y 425.02 nm. En particular, la muestra A presentó un máximo de absorbancia a 424.01 nm con una intensidad de 2.22 unidades, mientras que la muestra A2 mostró un pico similar a 424.01 nm con una absorbancia ligeramente mayor (2.24).

Estos valores se encuentran dentro del rango característico de nanopartículas de plata esféricas dispersas (390–450 nm). El desplazamiento del pico SPR hacia longitudes de onda ligeramente mayores a 420 nm indica que las nanopartículas tienen un tamaño promedio estimado entre 15 y 25 nm. Este comportamiento es consistente con el objetivo experimental de obtener nanopartículas con un tamaño inferior a 20 nm. Además, la alta intensidad de absorbancia observada en las muestras A y A2 sugiere una buena eficiencia en la síntesis y una

elevada concentración coloidal.

En conjunto, los espectros UV-Vis confirman la formación efectiva de nanopartículas de plata con propiedades ópticas acordes a su tamaño y morfología, aportando evidencia preliminar que complementa el análisis de dispersión de tamaño por DLS.

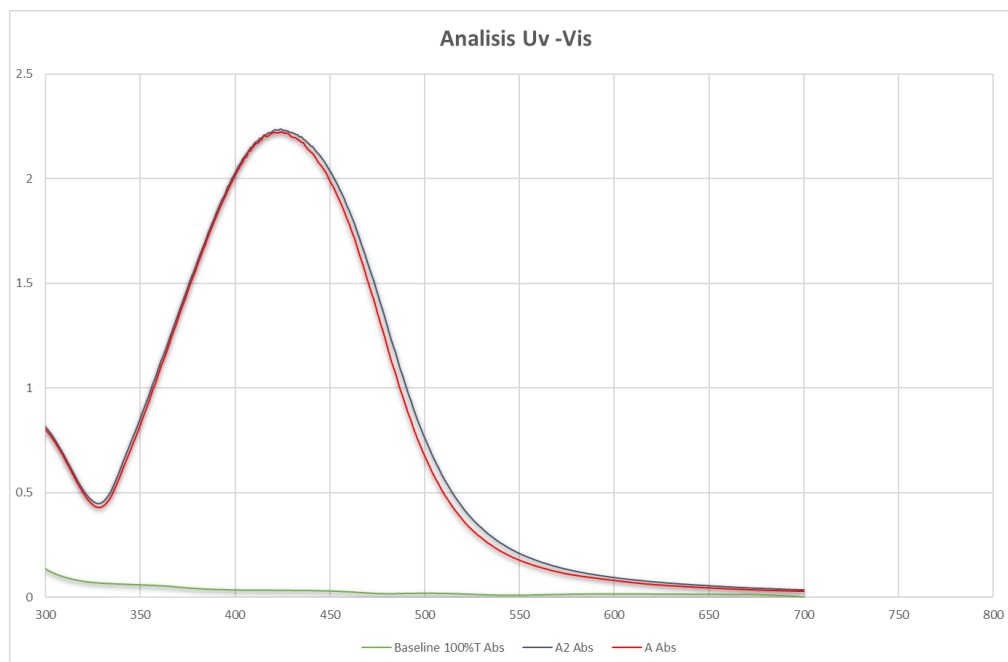


Figura 11 Espectros UV-Vis de nanopartículas de plata sintetizadas. Se observa un pico de absorbancia alrededor de 424 nm, característico del plasmón de resonancia superficial de AgNPs esféricas.

Análisis DLS

Durante el análisis por dispersión dinámica de luz (DLS), se realizaron más de 40 corridas con el objetivo de confirmar la reproducibilidad del experimento. A continuación, se presentan cuatro ejemplos representativos de síntesis de nanopartículas de plata. El primer conjunto corresponde a nanopartículas sintetizadas en etanol, posteriormente redispersadas en dimetilformamida (DMF); el segundo corresponde a síntesis directa en DMF empleando irradiación por microondas como método de activación química.

Los parámetros evaluados incluyeron:

- Distribución de tamaño por volumen, considerando un volumen total de 1 mL en la celda de medición.
- Intensidad de dispersión de luz, la cual refleja el tamaño y concentración de las nanopartículas.
- Potencial Z, utilizado para estimar la estabilidad coloidal y correlacionarlo con la actividad bactericida de las nanopartículas sintetizadas.

Escenario 1

Se llevó a cabo la síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) utilizando etanol anhidro como medio de dispersión, nitrato de plata como agente reductor y polivinilpirrolidona (PVP) como agente estabilizante. El volumen total obtenido fue de 100 mL de suspensión coloidal.

Posteriormente, se tomaron dos alícuotas de 10 mL cada una y se sometieron a centrifugación a 5,000 RPM durante 40 minutos. Una vez separado el sobrenadante, se realizaron cinco ciclos de lavado para eliminar

impurezas, utilizando centrifugación a 5,000 RPM durante 10 minutos en cada ciclo. El lavado se efectuó empleando agua desionizada tal y como se muestra en las figuras 12 y 13.

El sobrenadante limpio fue recuperado y colocado en una mufla a 60 °C para eliminar completamente los restos de etanol y agua. Una vez seco, parte del material se reservó para análisis en estado sólido mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), dispersión dinámica de luz (DLS) y espectroscopía UV-Vis.

El remanente del material seco fue redispersado en dimetilformamida (DMF) con el fin de incorporarlo en una matriz polimérica de poliuretano termoplástico (TPU), con la cual se fabricaron películas delgadas destinadas a caracterización morfológica posterior por SEM.

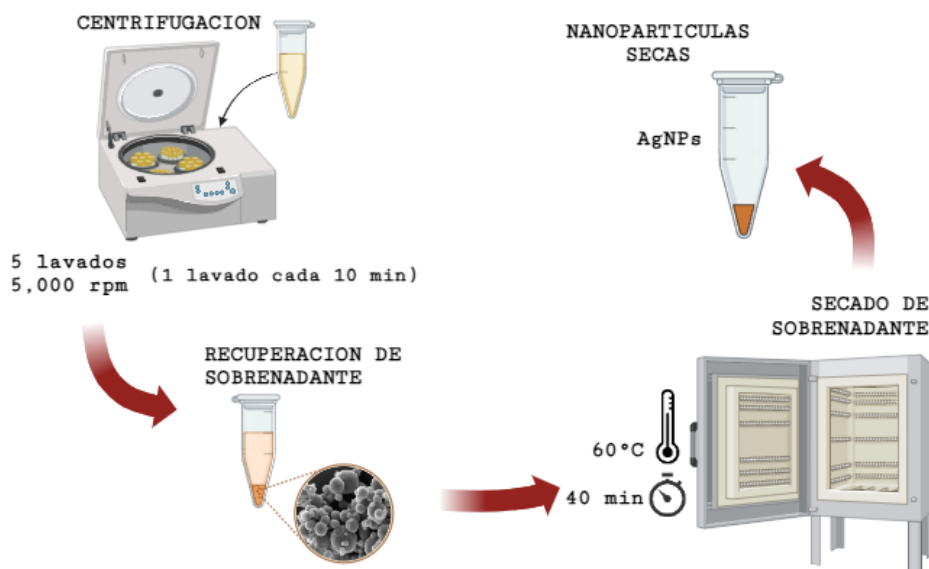


Figura 12. Esquema del proceso de purificación de nanopartículas de plata (AgNPs) mediante centrifugación, recuperación del sobrenadante y secado a 60 °C durante 40 minutos..

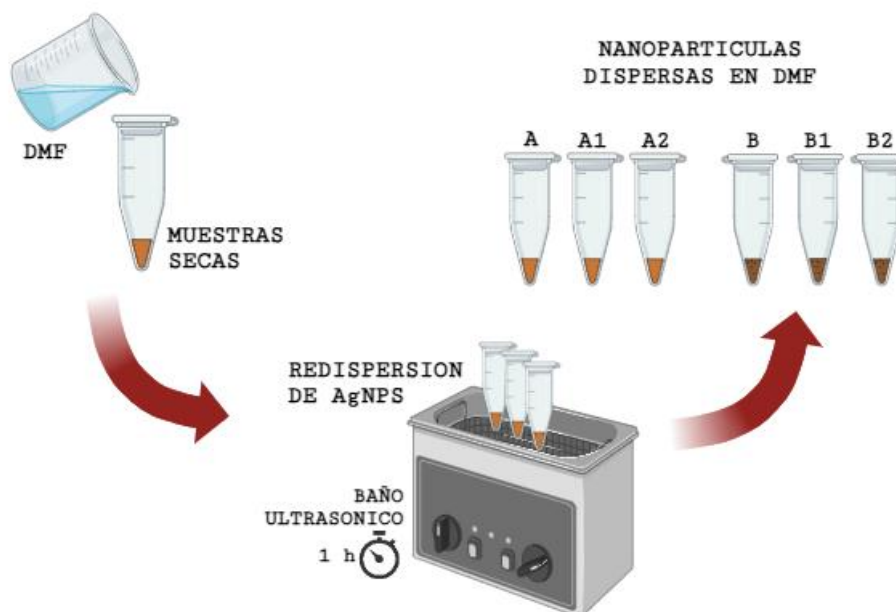


Figura 13. Esquema del proceso de redispersión de nanopartículas de plata (AgNPs) secas en dimetilformamida (DMF) mediante baño ultrasónico durante 1 hora..

Resultados del análisis DLS

Se llevó a cabo un análisis de dispersión dinámica de luz (DLS) con el objetivo de determinar la distribución de tamaño por volumen de nanopartículas de plata previamente sintetizadas y purificadas. El análisis reveló una distribución bimodal, con un pico principal en 18.57 nm correspondiente al 94.6 % del volumen total, lo que indica una población dominante de nanopartículas pequeñas. Se registró un valor de Z-Average de 87.06 nm y un índice de polidispersidad (Pdl) de 0.516, lo cual sugiere una dispersión moderadamente ancha en la muestra. Estos resultados son consistentes con la formación efectiva de AgNPs con tendencia a aglomeración secundaria en menor proporción.

	Size (d.nm):	% Volume:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 87.06	Peak 1: 217.0	5.4	95.75
Pdl: 0.516	Peak 2: 18.57	94.6	4.552
Intercept: 0.941	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

Result quality Refer to quality report

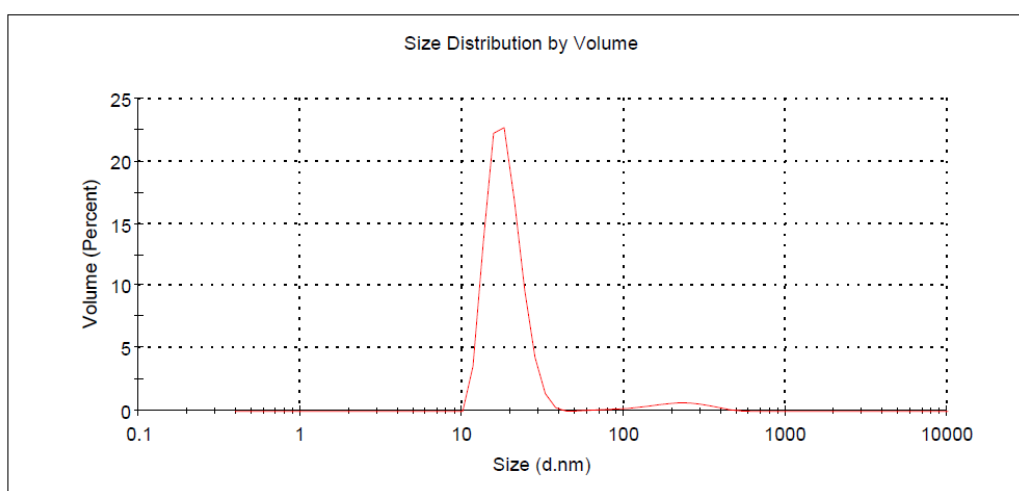


Figura 14. Análisis DLS de nanopartículas de plata. Se observa una distribución principal centrada en 18.57 nm con el 94.6 % del volumen, indicando una población mayoritaria monodispersa. El valor de Z-Average fue de 87.06 nm y el índice de polidispersidad (PdI) de 0.516.

A continuación, se presenta el análisis de distribución de tamaño de nanopartículas de plata (AgNPs) mediante dispersión dinámica de luz (DLS), específicamente evaluando la intensidad de luz dispersada por la muestra. La gráfica muestra dos poblaciones claramente diferenciadas: una con un diámetro promedio de 173.4 nm, responsable del 84.2 % de la intensidad dispersada, y una segunda población de 21.69 nm que aporta el 15.8 % restante. Este resultado es coherente con el comportamiento óptico de las nanopartículas: las partículas de mayor tamaño dispersan más luz debido a su mayor sección transversal, lo que explica su predominancia en la señal. No obstante, la presencia clara de una población en el rango de 20 nm confirma que el proceso de síntesis logró generar nanopartículas de plata de tamaño nanométrico, aunque con cierta aglomeración secundaria. Estos datos complementan la distribución por volumen y ayudan a evaluar tanto la eficiencia del

proceso como la estabilidad coloidal de la muestra.

	Size (d.n...	% Intensity:	St Dev (d.n...
Z-Average (d.nm): 87.06	Peak 1: 173.4	84.2	75.20
Pdl: 0.516	Peak 2: 21.69	15.8	5.174
Intercept: 0.941	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

Result quality Refer to quality report

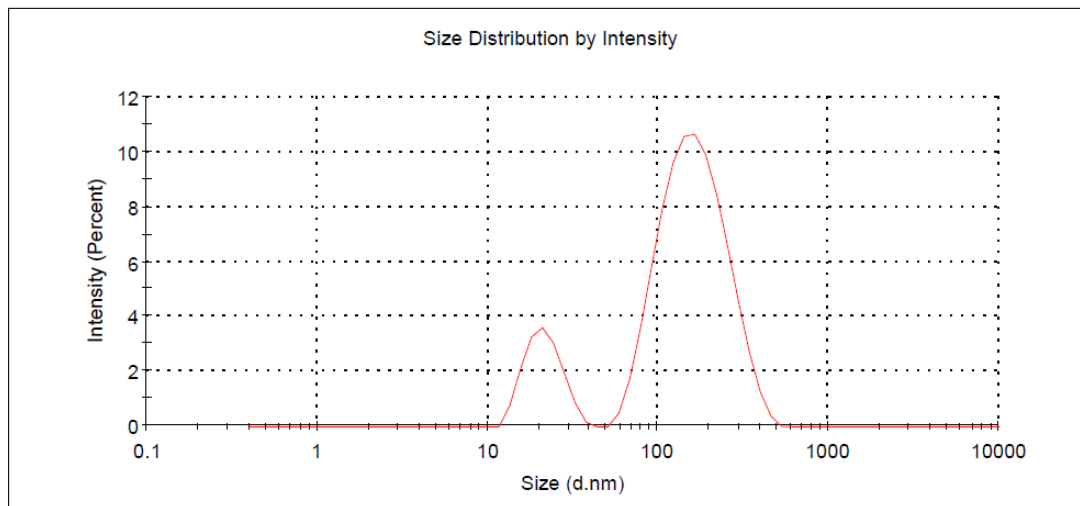


Figura 15. Distribución de tamaño de nanopartículas de plata por intensidad de luz dispersada. Se identifican dos poblaciones: una mayoritaria de 173.4 nm (84.2 % de intensidad) y otra menor de 21.69 nm (15.8 %), evidenciando la presencia de AgNPs de tamaño nanométrico junto con posibles aglomerados.

Se evaluó el potencial Z de las nanopartículas de plata con el fin de determinar la estabilidad coloidal de la suspensión. Un valor de +200.0 mV indica una alta repulsión electrostática entre partículas, lo cual sugiere una buena estabilidad y baja tendencia a la agregación. Estos resultados refuerzan la efectividad del agente estabilizante utilizado durante la síntesis.

Measured Data	
Zeta Potential	200.0 mv
Polarity	Positive
Mobility@25C	12.75u/s/V/cm
Conductivity	649 uS/cm
Field Strength (Req/Act)	10 / 9.5 kV/m
SOP	
Zeta Run Time	30 sec

Figura 15. Resultados del análisis de potencial Z de AgNPs. Se obtuvo un valor de +200.0 mV, indicando excelente estabilidad coloidal en medio dispersante.

Se realizó un análisis por DLS para evaluar la distribución de tamaño por volumen de nanopartículas de plata. El resultado mostró una distribución bimodal, con una población mayoritaria de partículas en el rango de 18.42 nm representando el 94.0 % del volumen, y una fracción minoritaria de 231.6 nm correspondiente al 6.0 %. El valor promedio de dispersión (Z-Average) fue de 87.29 nm, y el índice de polidispersidad (PDI) de 0.516, lo cual indica una dispersión moderadamente amplia. El análisis fue clasificado con una calidad de resultado buena.

	Size (d.nm):	% Volume:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 87.29	Peak 1: 231.6	6.0	106.5
Pdi: 0.516	Peak 2: 18.42	94.0	5.820
Intercept: 0.939	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

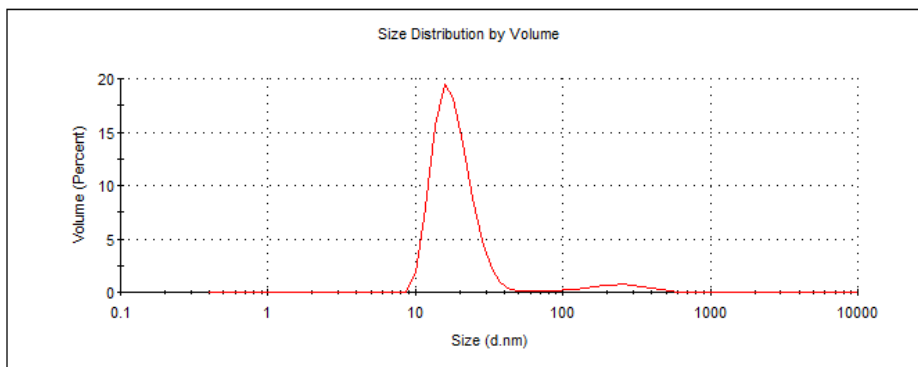


Figura 16. Distribución de tamaño por volumen de nanopartículas de plata obtenida por DLS. Se observó un pico principal de 18.42 nm (94 %) y uno secundario de 231.6 nm (6 %), indicando presencia predominante de AgNPs de pequeño tamaño junto con una mínima fracción aglomerada.

El análisis de dispersión de tamaño por intensidad, obtenido mediante DLS, revela dos poblaciones de nanopartículas de plata. La señal predominante corresponde a partículas de 180.7 nm, que representan el 83.1 % de la intensidad total dispersada, mientras que una segunda población de 24.52 nm contribuye con el 16.9 % restante. El valor de Z-Average fue de 87.29 nm y el índice de polidispersidad (PDI) se mantuvo en 0.516, lo que indica una dispersión con cierta heterogeneidad, aunque el sistema fue evaluado con una calidad buena.

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 87.29	Peak 1: 180.7	83.1	83.82
Pdi: 0.516	Peak 2: 24.52	16.9	8.421
Intercept: 0.939	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

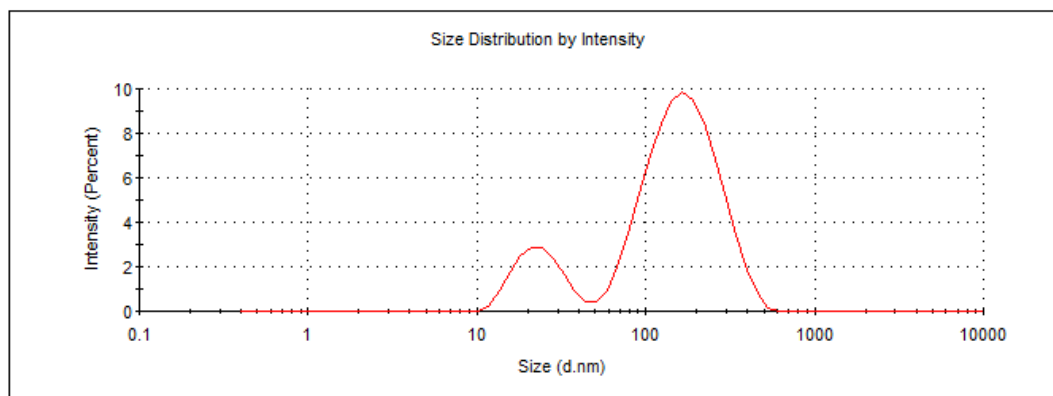


Figura 17. Distribución de tamaño de nanopartículas de plata por intensidad. Se observan dos poblaciones con diámetros de 180.7 nm (83.1 %) y 24.52 nm (16.9 %), reflejando la presencia de nanopartículas pequeñas junto con una fracción de mayor tamaño posiblemente asociada a aglomerados.

Se llevó a cabo una medición del potencial Z para evaluar la estabilidad coloidal de una segunda muestra de nanopartículas de plata. El análisis arrojó un valor de -108.2 mV, indicando una alta estabilidad electrostática debido a la fuerte repulsión entre partículas con carga negativa. Este resultado se complementa con una movilidad electroforética de $6.90 \mu\text{m}\cdot\text{cm}/\text{V}\cdot\text{s}$, confirmando la dispersión eficiente del sistema en el medio. La conductividad registrada fue de $684 \mu\text{S}/\text{cm}$, dentro del rango esperado para sistemas estabilizados en medios polares.

Measured Data	
Zeta Potential	108.2 mv
Polarity	Negative
Mobility@25C	6.90u/s/V/cm
Conductivity	684 uS/cm
Field Strength (Req/Act)	10 / 9.4 kV/m
SOP	
Zeta Run Time	30 sec

Figura 18. Resultados de potencial Z de nanopartículas de plata con carga superficial negativa (-108.2 mV), lo que indica excelente estabilidad coloidal y buena dispersión en medio líquido.

Escenario 2

Síntesis de nanopartículas con DMF como medio y microondas como catalizador de la reacción. El análisis por DLS presentado a continuación corresponde a la evaluación de la distribución de tamaño por volumen de nanopartículas de plata sintetizadas. Se identificaron tres poblaciones distintas, siendo la fracción predominante la de 9.72 nm, que representa el 92.6% del volumen total, indicando una síntesis altamente efectiva de nanopartículas pequeñas. Las poblaciones secundarias, con diámetros de 29.62 nm (5.9%) y 213.1 nm (1.5%), sugieren la presencia mínima de agregados o partículas en crecimiento. El valor de Z-Average fue de 585.5 nm, influenciado por los pocos eventos de gran tamaño, y el PDI fue de 0.563 , lo que indica una dispersión moderadamente polidispersa. A pesar de la desviación en el promedio hidrodinámico, el perfil general revela una buena proporción de partículas en el rango nanométrico deseado.

	Size (d.nm):	% Volume:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 585.5	Peak 1: 213.1	1.5	38.25
PdI: 0.563	Peak 2: 29.62	5.9	6.035
Intercept: 0.973	Peak 3: 9.719	92.6	1.837

Result quality : Refer to quality report

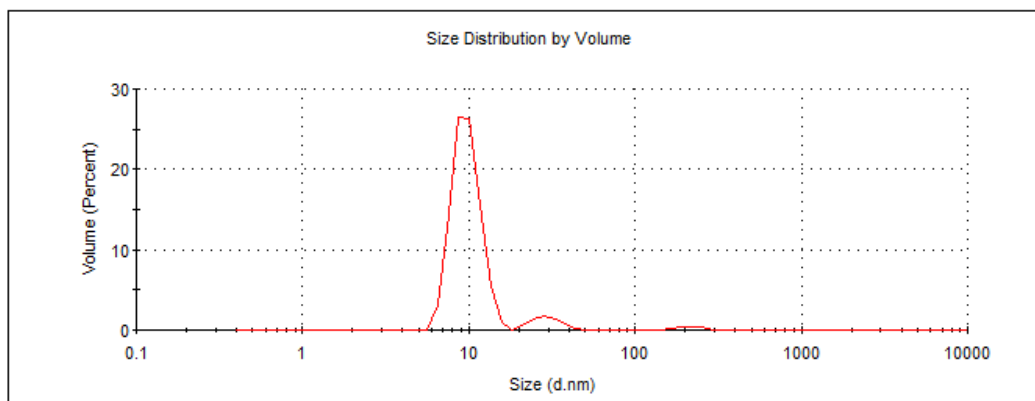


Figura 19. Distribución de tamaño por volumen de nanopartículas de plata. El 92.6% del volumen corresponde a partículas de 9.72 nm, con poblaciones menores en 29.62 y 213.1 nm, indicando una síntesis efectiva con baja presencia de agregados.

El análisis de dispersión por intensidad muestra la presencia de tres poblaciones distintas de nanopartículas de plata. La señal dominante proviene de partículas con un tamaño promedio de 204.2 nm, que representan el 77.3 % de la intensidad dispersada, lo cual puede atribuirse a una fracción minoritaria de agregados que dispersan más luz debido a su mayor tamaño. Las poblaciones restantes corresponden a tamaños de 32.61 nm (15.6 %) y 10.40 nm (7.2 %), evidenciando la existencia de nanopartículas pequeñas sintetizadas de manera efectiva. El valor de Z-Average fue de 585.5 nm y el PDI de 0.563, lo que sugiere una distribución polidispersa con tendencia a la agregación secundaria. Estos resultados deben ser considerados al evaluar la estabilidad y uniformidad del sistema coloidal.

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 585.5	Peak 1: 204.2	77.3	31.20
Pdi: 0.563	Peak 2: 32.61	15.6	5.683
Intercept: 0.973	Peak 3: 10.40	7.2	1.629

Result quality : Refer to quality report

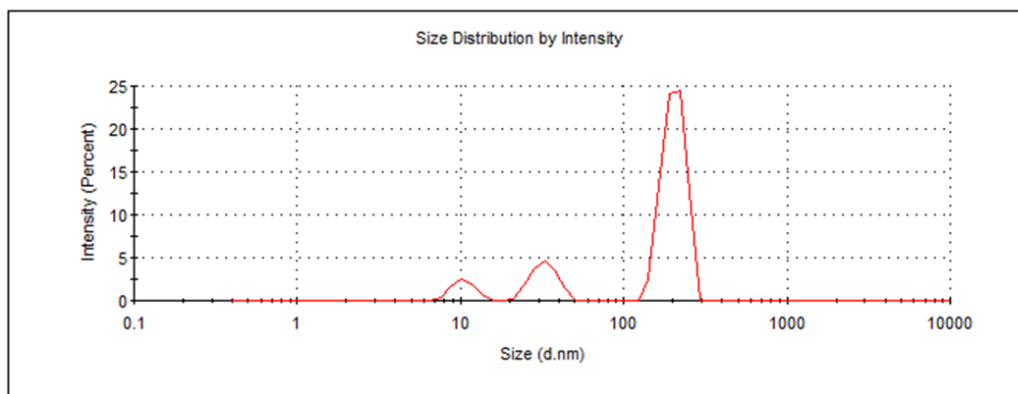


Figura 20. Distribución de tamaño de nanopartículas de plata por intensidad. La mayor dispersión corresponde a partículas de 204.2 nm (77.3 %), seguidas por poblaciones de 32.61 y 10.40 nm, indicando coexistencia de nanopartículas pequeñas con agregados dispersantes de mayor intensidad.

Se analizó el potencial Z de una muestra coloidal de nanopartículas de plata para evaluar su estabilidad electrocinética. El valor obtenido fue de +38.2 mV, lo que indica una estabilidad coloidal moderada, suficiente para evitar la aglomeración inmediata de las partículas. La movilidad electroforética a 25 °C fue de 2.44 $\mu\text{m}\cdot\text{cm}/\text{V}\cdot\text{s}$, con una conductividad del sistema de 767 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sugiriendo una buena dispersión en el medio utilizado.

Measured Data	
Zeta Potential	38.2 mv
Polarity	Positive
Mobility@25C	2.44u/s/V/cm
Conductivity	767 uS/cm
Strength (Req/Act)	10 / 9.4 kV/m
SOP	
Zeta Run Time	30 sec

Figura 21. Resultados de potencial Z de nanopartículas de plata. El valor de +38.2 mV sugiere estabilidad coloidal moderada con carga superficial positiva.

Resultados de análisis de microscopía electrónica (SEM)

Durante el análisis de microscopía electrónica evaluaron varias muestras con diferentes objetivos, en primera instancia se observaron películas de TPU a diferentes porcentajes 30, 20 y 10% del polímero concentrado, todas las películas evaluadas fueron de 0.01g, también del sobrenadante lavado y seco se evaluaron las nanopartículas de plata sintetizadas de manera individual, posterior a eso se evaluaron películas de TPU con nanopartículas superficiales, y otras con nanopartículas embebidas en la matriz polimérica, también se tomaron dos muestras de alineadores comerciales Invisalign con nanopartículas en superficie para obtener resultados de la dispersión de las nanopartículas en una película elaborada bajo nuestras condiciones y nanopartículas dispersas en alineadores elaborados por una empresa comercial con estándares altamente rigurosos.

Como análisis complementario se elaboró un análisis elemental de cada una de las películas para observar mediante un mapeo 2D del área la cantidad de plata depositada en la matriz polimérica, los elementos analizados en este análisis elemental fueron Oxígeno, nitrógeno y carbono pertenecientes a la composición química del polímero y plata la cual es proveniente de las nanopartículas sintetizadas.

Análisis individual de las muestras

En primera instancia se analizó el polímero a diferentes porcentajes de TPU, los siguientes resultados muestran la superficie del polímero a diferentes aumentos, cabe resaltar que al ser un material no conductor se puede observar cierta opacidad en la imagen sin embargo se alcanza a visualizar la irregularidad de la matriz polimérica tal y como se esperaría, al ser un análisis SEM no se puede realizar un aumento mayor al evaluado ya que el haz de electrones tiende a fundir la muestra.

Posterior a la visualización de la superficie del polímero se procedió a hacer un análisis complementario, un análisis elemental para corroborar que la muestra es pura y solo contiene elementos pertenecientes a su composición química.

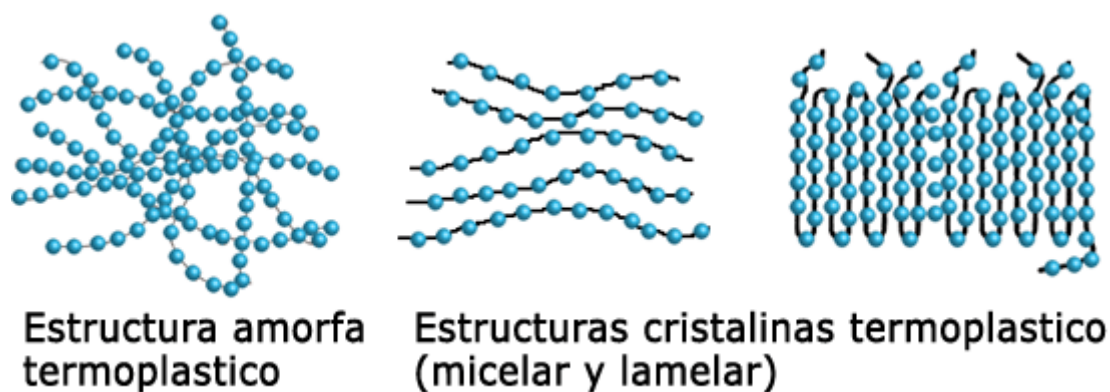


Figura 22. Representación esquemática de la estructura molecular en termoplásticos: estructura amorfa (izquierda) y estructuras cristalinas micelar y lamelar (centro y derecha), que determinan las propiedades mecánicas y térmicas del material.

Micrografías de muestra de poliuretano termoplástico (TPU) 10%

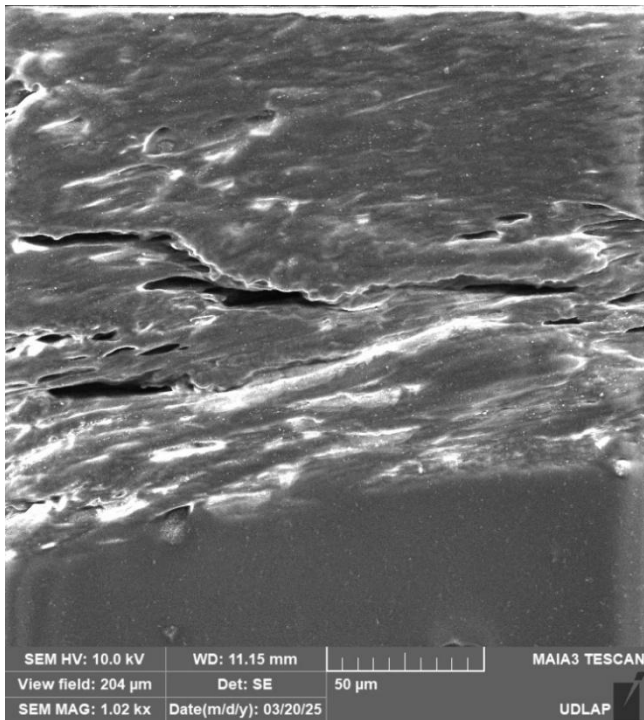


Figura 23. Micrografía SEM – 1.02k \times (campo de visión \approx 204 μm)
La imagen muestra una superficie polimérica relativamente lisa, con presencia de canales longitudinales y algunas depresiones que podrían asociarse a líneas de flujo o tensiones de solidificación. La textura general es amorfa, sin patrones cristalinos visibles, lo cual concuerda con la naturaleza del TPU. La opacidad observada es común en materiales no conductores bajo condiciones de alto vacío sin recubrimiento metálico.

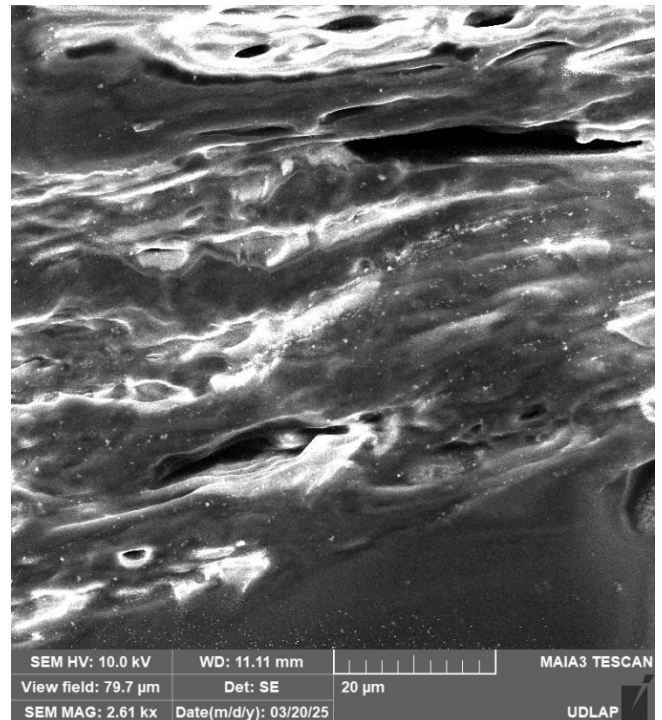


Figura 24. Micrografía SEM – 2.61k \times (campo de visión \approx 79.7 μm)
A este aumento, se aprecian con mayor claridad las ondas superficiales y zonas de microfractura que podrían relacionarse con tensiones internas del material o efectos de corte. No se observan partículas externas ni contaminantes. La homogeneidad de la superficie indica un proceso de preparación adecuado y una mezcla polimérica sin inclusiones visibles.

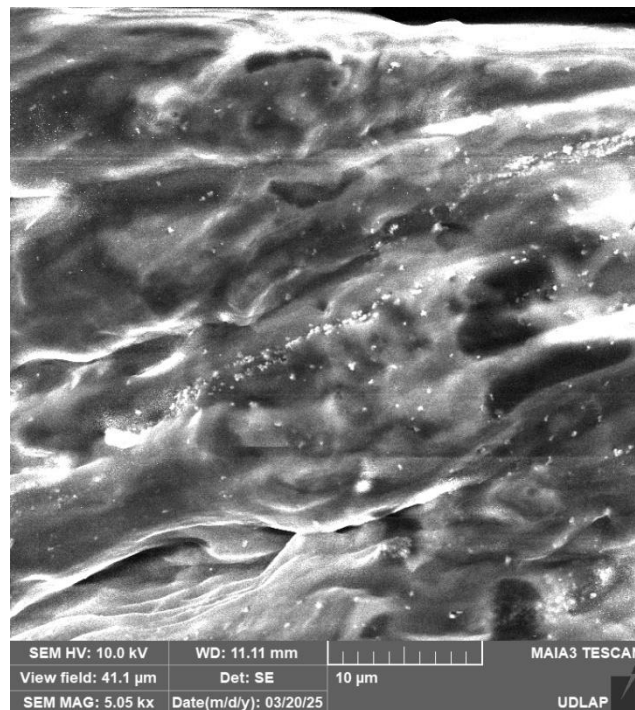


Figura 25. Micrografía SEM – 5.05k \times (campo de visión \approx 41.1 μm)
A este nivel de aumento se revelan detalles más finos de la textura superficial, donde se identifican pequeñas irregularidades topográficas con relieves suaves. La ausencia de porosidad significativa o rugosidad extrema sugiere que el TPU al 10% tiene una estructura bastante compacta, aunque presenta algunos microdominios que podrían indicar zonas de orientación de cadenas poliméricas.

Micrografías de muestra de poliuretano termoplástico (TPU) 20%

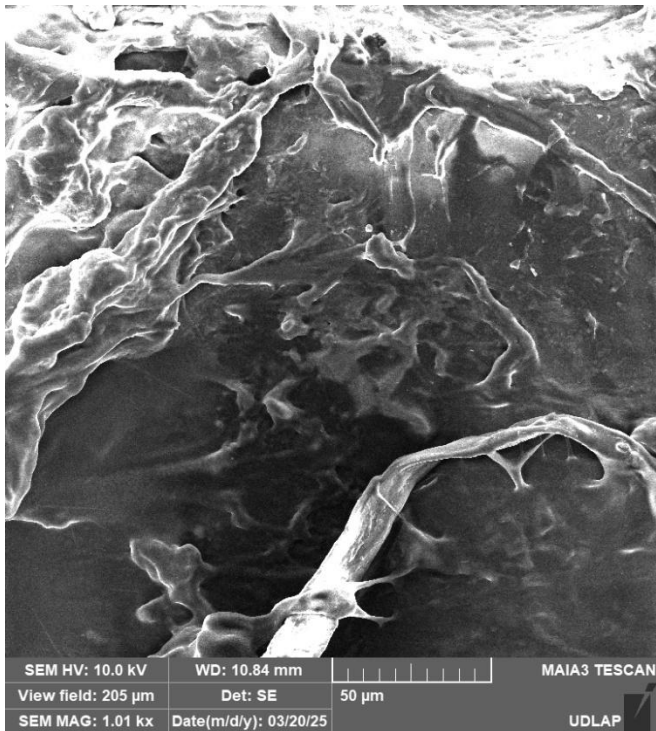


Figura 26. Micrografía SEM – 1.01k \times (campo de visión \approx 205 μ m)
 Con mayor aumento se evidencia una textura menos uniforme en comparación con la muestra al 10%. Se observan relieves ondulados, formaciones tipo “burbujas colapsadas” y estrías, lo que sugiere una estructura interna con mayor movilidad de cadenas o posibles microdefectos asociados al procesamiento del polímero.

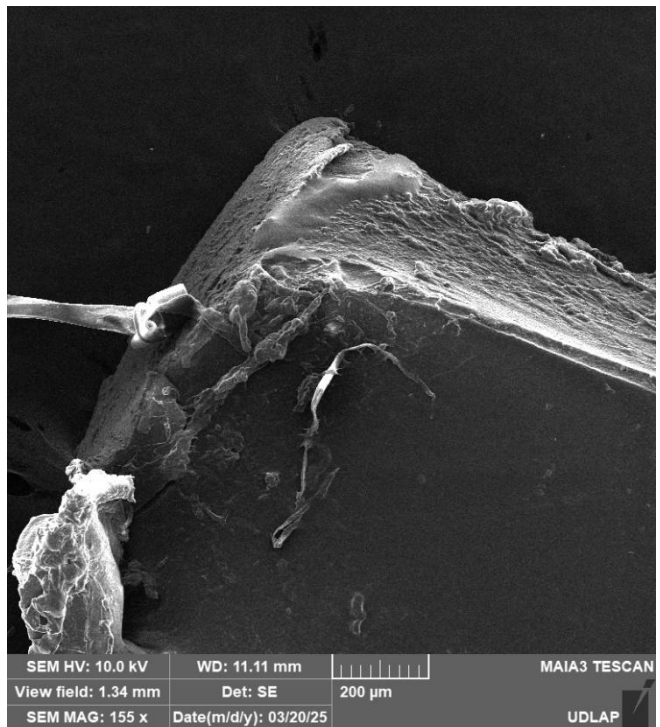


Figura 27. Micrografía SEM – 155 \times (campo de visión \approx 1.34 mm)
 En este aumento bajo se observa una estructura global más heterogénea, con la presencia de fragmentos o residuos laminares grandes posiblemente originados por fractura mecánica o manipulación del material durante el montaje. Hay sectores con superficie lisa, pero también regiones rugosas y deformadas que denotan zonas de tensión superficial.

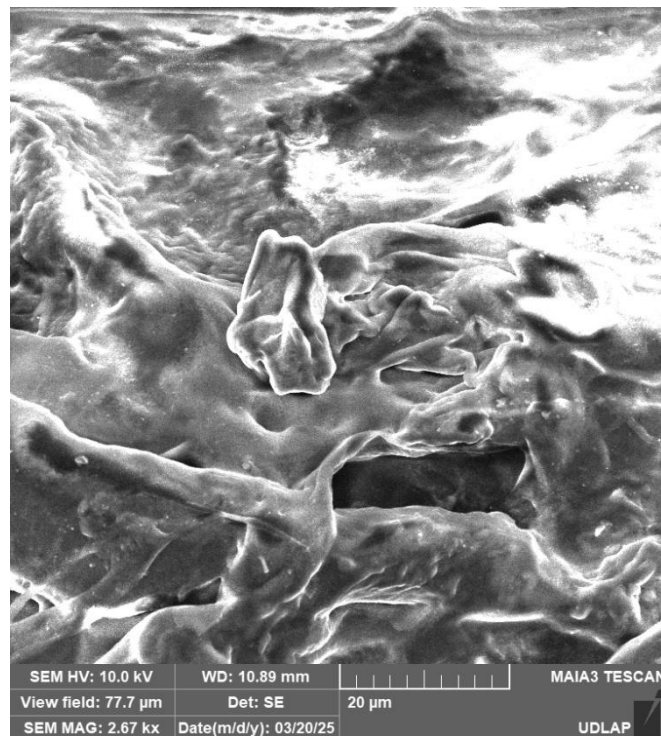


Figura 28. Micrografía SEM – 2.67k \times (campo de visión \approx 77.7 μ m)
 La imagen a mayor resolución revela una superficie con zonas colapsadas, cavidades y partículas incrustadas, lo que puede deberse a inestabilidad superficial o tensiones de solidificación. Se identifican estructuras amorfas e irregularidades prominentes, que podrían funcionar como sitios de anclaje para futuras incorporaciones de nanopartículas. También se observa una formación central que parece

Micrografías de muestra de poliuretano termoplástico (TPU) 30%

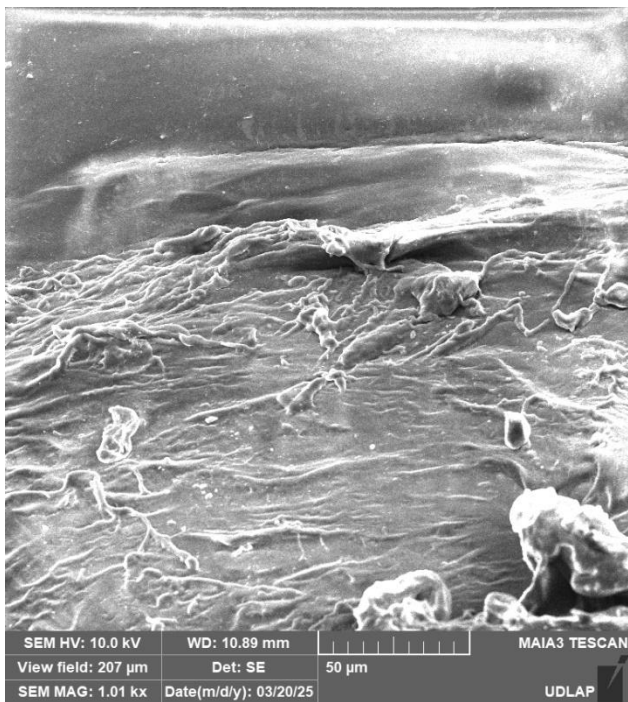


Figura 29. Micrografía SEM – 1.01k \times (campo de visión \approx 207 μ m)
A este aumento se observa una superficie con alta cantidad de arrugas y ondulaciones, asociadas a tensión superficial o estrés durante la solidificación. Se aprecian algunas estructuras lineales y colapsadas, con apariencia de fibrillas, lo cual podría reflejar orientación parcial de las cadenas poliméricas o zonas de retracción. Este patrón es más notorio que en concentraciones menores.



Figura 30. Micrografía SEM – 90 \times (campo de visión \approx 2.31 mm)
Esta imagen de bajo aumento permite observar la forma general del fragmento polimérico, destacando una estructura compacta y sin poros visibles en el interior. El borde externo presenta rugosidades, probablemente formadas por fractura mecánica, mientras que el núcleo luce más denso. La muestra no muestra exfoliación evidente ni formación de capas separadas.

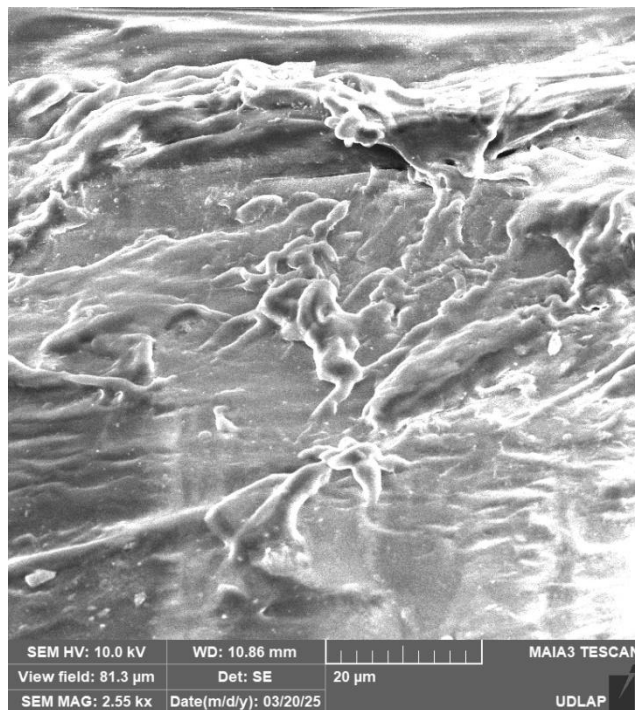


Figura 31. Micrografía SEM – 2.55k \times (campo de visión \approx 81.3 μ m)
A alto aumento, la superficie muestra una morfología compleja y segmentada, con surcos y relieves bien definidos. Las estrias se interconectan en distintas direcciones, formando microcanales, lo que puede representar zonas de interacción potencial con otros compuestos o sitios de difusión para agentes activos como nanopartículas. No se identifican residuos externos, lo que sugiere un buen control de la pureza del polímero.

Se realizó un análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de nanopartículas de plata (AgNPs) en estado seco. Se compararon dos escenarios experimentales: uno correspondiente a una síntesis con una duración de 4 horas y otro a una síntesis de solo 10 minutos. Ambas muestras fueron evaluadas morfológicamente mediante SEM con el objetivo de establecer la relación entre el tiempo de síntesis y el tamaño de partícula. Tal como se esperaba, se observó que un mayor tiempo de reacción se asoció con nanopartículas de mayor tamaño, tendencia que fue corroborada adicionalmente mediante el desplazamiento del pico de plasmón superficial en el análisis espectrofotométrico UV-Vis.

Muestras de AgNPs en seco con 4h de duración del experimento.

Las siguientes micrografías muestran aglomeraciones de nanopartículas de plata, resultado del proceso de recuperación tras los ciclos de lavado, centrifugación y secado. Debido a estas condiciones de preparación, es esperable la formación de cúmulos densos que asemejan estructuras compactas o agregados similares a "piedras". Para confirmar la naturaleza del material observado, se realizó un análisis elemental por espectroscopía de dispersión de energía (EDS), con el fin de verificar la presencia de plata en las regiones analizadas.

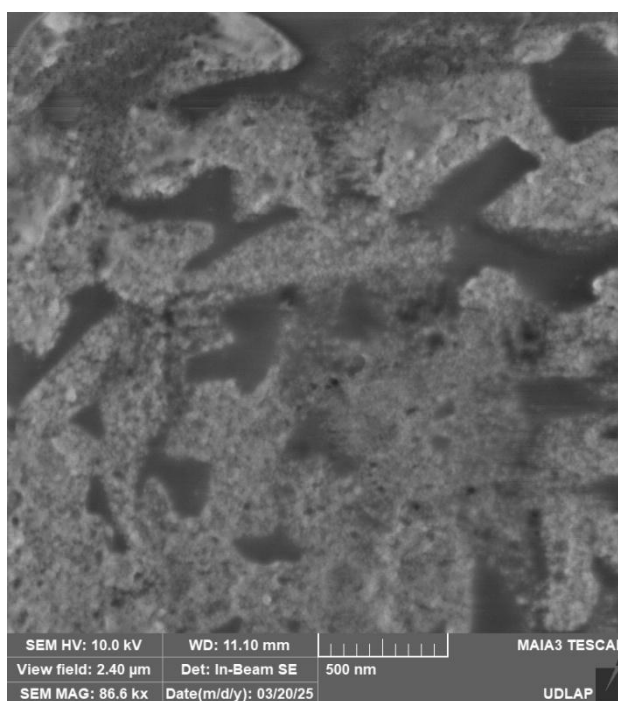


Figura 33. La imagen SEM evidencia que la síntesis de 4 horas produce nanopartículas bien formadas, esféricas y de tamaño sub-50 nm, aunque con una dispersión limitada cuando se evalúan en estado seco. El grado de aglomeración observado no compromete la integridad de las partículas, pero sí resalta la necesidad de evaluar estas muestras también en solución (gota) para estimar su dispersabilidad y comportamiento coloidal real.

Nanopartículas de plata sintetizadas por vía química durante un proceso de reacción de 4 horas, posteriormente recolectadas y analizadas en seco mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). La imagen fue obtenida a 86.6k \times , utilizando un detector tipo In-Beam SE y con un campo de visión de 2.40 μm . La micrografía revela una superficie densamente poblada por nanopartículas con forma esférica y pseudoesférica, agrupadas en clusters o redes discontinuas. A este nivel de aumento, se observan agregados de diferente tamaño, desde estructuras bien definidas hasta regiones con partículas coalescidas.

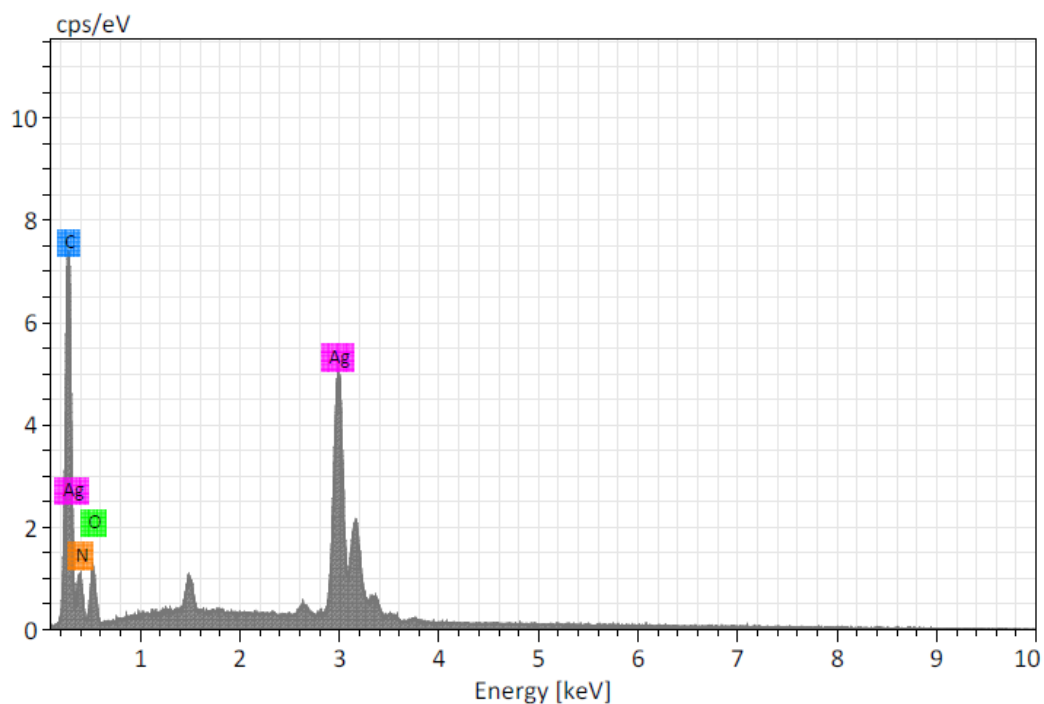
La morfología sugiere un proceso de nucleación extenso seguido de crecimiento controlado, lo cual es típico en tiempos largos de síntesis. La distribución de tamaños parece heterogénea, con partículas individuales discernibles entre 10 y 50 nm, aunque muchas están parcialmente solapadas. La falta de dispersión completa es coherente con una muestra en seco sin agente dispersante, y puede reflejar tanto la tendencia natural de las AgNPs a agregarse por interacción de van der Waals como el efecto de secado sobre el portamuestras.

Análisis elemental de muestras en seco de AgNPs 4h de síntesis.

Selección de una región de la muestra para análisis elemental de la muestra.



Figura 34. Representación esquemática de la estructura molecular en termoplásticos: estructura amorfa (izquierda) y estructuras cristalinas micelar y lamelar (centro y derecha), que determinan las propiedades mecánicas y térmicas del material.



UABC_AgNP_4h_Aseco 35787

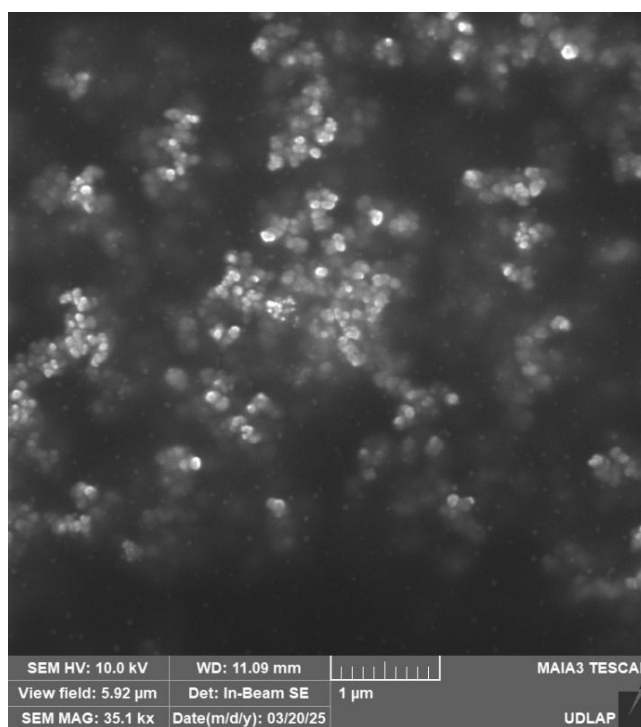
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Silver	47	84078	22.30	74.60	26.04	0.77	3.46
Carbon	6	42199	4.90	16.39	51.36	0.61	12.46
Oxygen	8	4542	1.45	4.87	11.45	0.26	17.65
Nitrogen	7	3793	1.24	4.15	11.14	0.23	18.51
Sum		29.89	100.00	100.00	100.00		

Muestras de AgNPs en gota con 4h de duración del experimento.

La micrografía (A) muestra una distribución heterogénea de nanopartículas de plata obtenidas mediante síntesis química asistida por etanol, utilizando nitrato de plata como precursor y PVP como agente estabilizante. A un aumento de 35,050X, se observa una morfología predominantemente esférica con tendencia a la agregación en ciertas zonas del campo visual. Las partículas exhiben una distribución de tamaños relativamente amplia, con un diámetro estimado mayor a 30 nm en algunas aglomeraciones.

La presencia de agregados sugiere una interacción superficial entre partículas, probablemente debida a una cobertura parcial o insuficiente por parte del agente estabilizante (PVP), o a la duración extendida del proceso de síntesis (4 h), lo cual favorece el crecimiento y coalescencia de las nanopartículas.

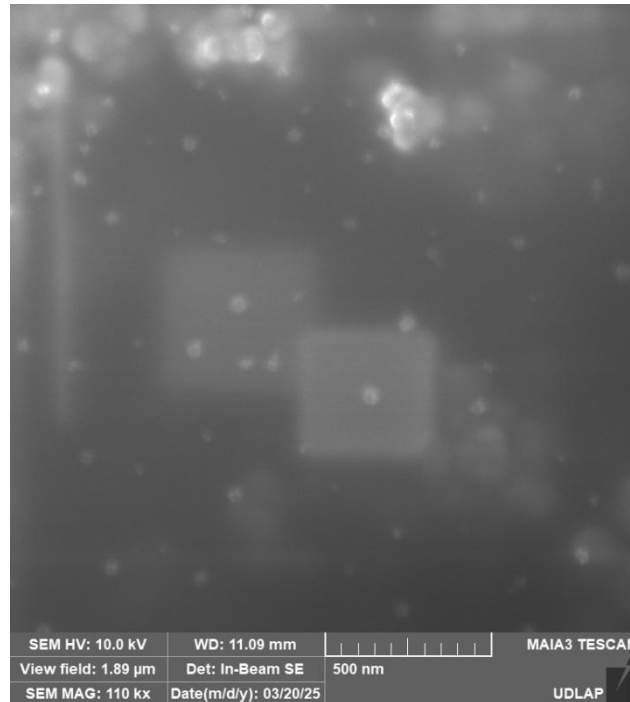
Se identifican zonas con partículas aisladas de menor tamaño, aunque son menos abundantes en comparación con los dominios agregados. La superficie del sustrato muestra buen contraste, lo que permite distinguir con claridad los bordes de las nanopartículas.



Micrografía (B), en esta escala se observa que las partículas presentan una morfología predominantemente esférica y un tamaño claramente menor a 20 nm, con una distribución relativamente densa sobre la superficie del sustrato. Se aprecian algunas regiones donde las nanopartículas se encuentran moderadamente agregadas, formando dominios compactos, lo cual es coherente con el largo tiempo de síntesis (4 h), que favorece tanto el crecimiento como la coalescencia superficial.

La interacción entre partículas sugiere que la estabilización ofrecida por el PVP, aunque efectiva para controlar el tamaño, no fue suficiente para evitar completamente los procesos de nucleación secundaria y aglomeración superficial. Sin embargo, se mantiene un grado aceptable de individualización en varias zonas, lo cual indica una síntesis relativamente controlada.

El alto contraste de la imagen permite observar con claridad los bordes definidos de muchas nanopartículas, lo que sugiere una buena cristalización y deposición homogénea. No se observan estructuras irregulares o productos secundarios aparentes.

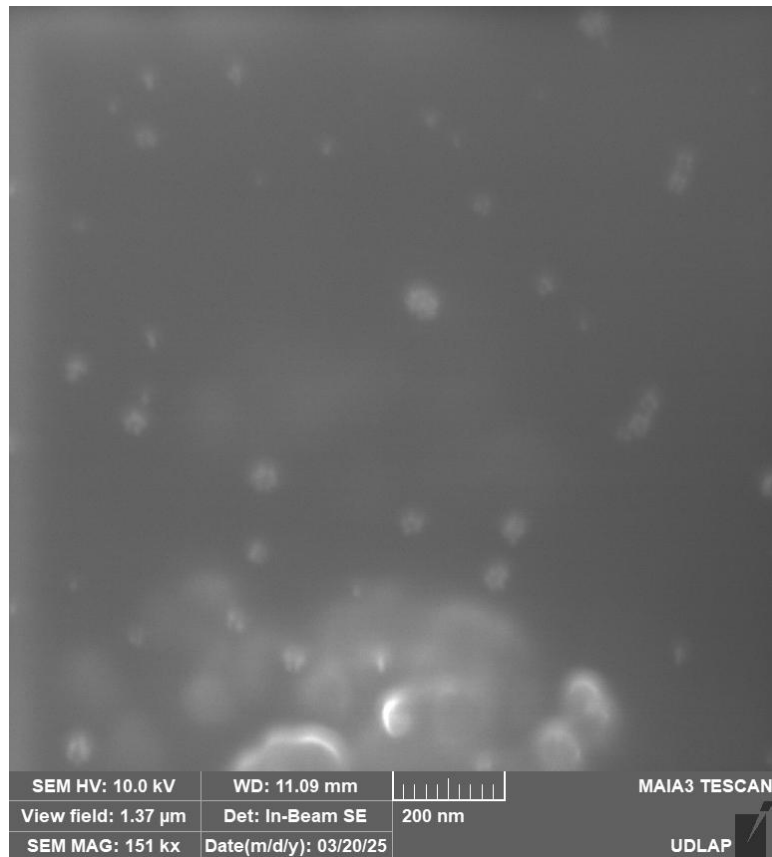


La imagen a un aumento de 151,480X permite una observación clara de la morfología fina y la densidad de las nanopartículas de plata sintetizadas. Se confirma la presencia de partículas con morfología esférica bien definida, con diámetros notablemente pequeños, todos dentro del régimen nanométrico (<20 nm), como se anticipó en los análisis anteriores.

A esta resolución se evidencian con mayor claridad los dominios de agregación parcial, formados posiblemente por fuerzas de Van der Waals entre partículas insuficientemente estabilizadas. No obstante, también se observa una fracción significativa de nanopartículas distribuidas de forma individual, lo que sugiere un grado aceptable de control durante la síntesis.

El recubrimiento superficial proporcionado por el PVP parece haber influido positivamente en la morfología final, limitando el crecimiento descontrolado de las nanopartículas y favoreciendo su forma esférica. La alta resolución y el contraste permiten identificar la textura superficial de las partículas y distinguir claramente los contornos, lo cual es indicativo de una buena calidad cristalina y una adecuada preparación de la muestra para SEM.

Esta imagen complementa las anteriores mostrando, con mayor precisión, la dimensión real y el patrón de distribución de las nanopartículas sobre el sustrato, ofreciendo evidencia visual contundente de una síntesis efectiva en el régimen de escala nanométrica.



- Re dispersión de nanopartículas de plata (AgNPs) en dimetilformamida (DMF).

Al necesitar degradar el polímero para poder dispersar la nanopartícula de manera homogénea, se necesitó de un solvente como el DMF sin embargo este no se podía incluir en la síntesis inicial debido a que este comprometía la integridad del equipo para análisis DLS, se optó por sintetizar las nanopartículas en etanol y realizar 5 lavados posteriores a 5000 RPS con 10 min por lavado y recuperar el sobrenadante de la muestra, una vez recuperado se dejaría secar en una mufla con vacía durante 30 min asegurándonos de retirar toda la humedad posible y se analizarían muestras en seco y en gota tal y como se muestran en las figuras # y # , posterior a esto se tomarían las muestras de AgNPs secas y se agregaría a 10 ml de DMF y se dejarían durante 1 h aproximadamente en un baño ultrasónico para garantizar la correcta dispersión de las muestras, en el esquema # se muestra el proceso de redispersión de AgNPs en el solvente DMF.

- Integración de nanopartículas de plata (AgNPs) a película de poliuretano termoplástico (TPU).

Una vez obtenidas las muestras de DMF y AgNPs dispersas se elaboraría una solución al 1% de TPU con DMF y AgNPs para plantear diferentes escenarios de dispersión de AgNPs en la matriz polimérica:

Escenario A

Elaboración de solución de DMF +AgNPs + TPU al 1% para ser aplicada mediante atomización con aerografía, dicha solución se aplicó a 3 muestras:

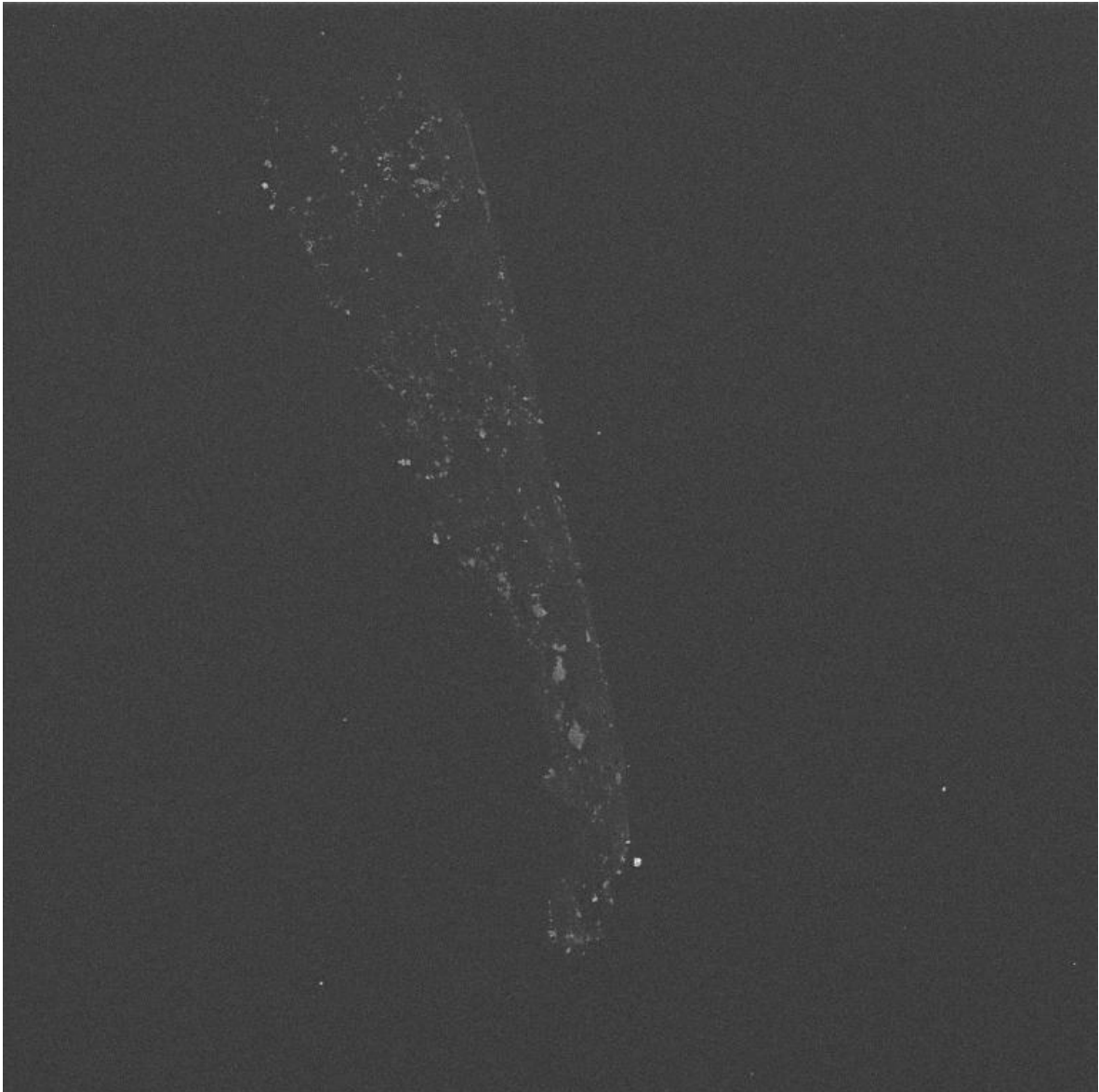
- Película de TPU comercial al 10 %
- Alineador INVISALING A
- Alineador INVISALING B


Escenario B

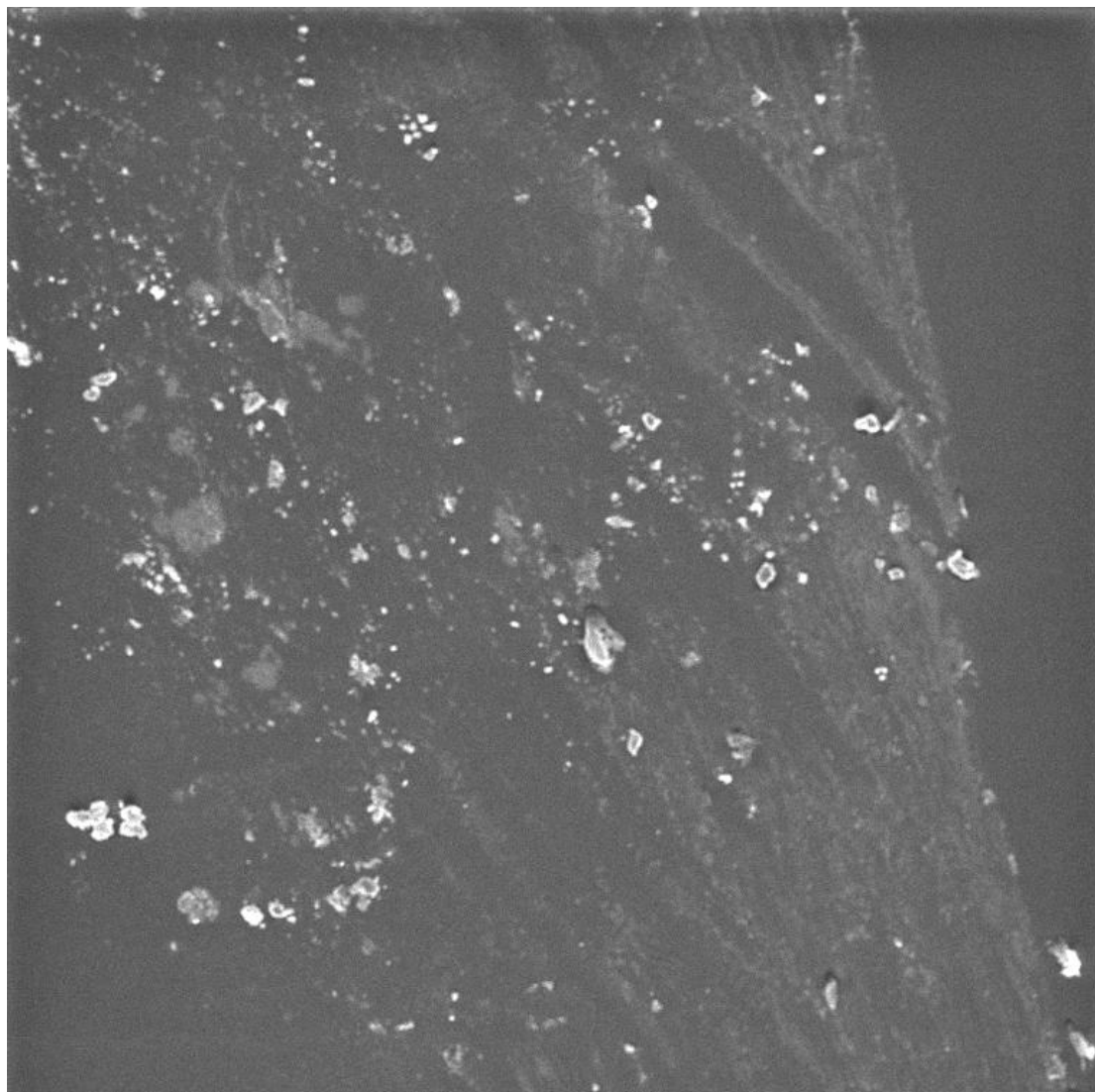
Se elaboro una película de TPU comercial al 10% con AgNPs enbevidas en la matriz polimerica

- Integración en poliuretano termoplástico comercial.

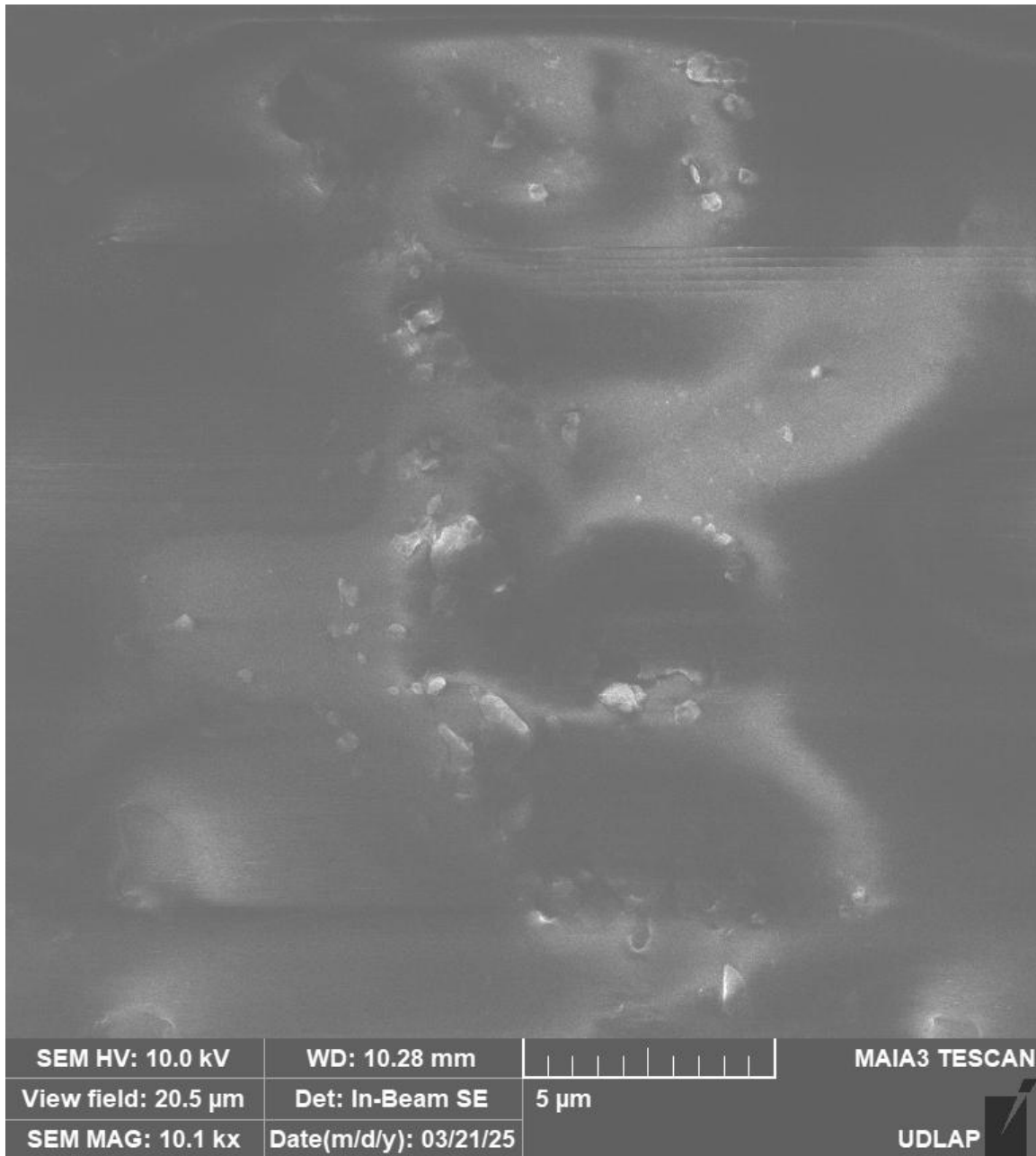
Muestra de película delgada con una concentración del 10% de TPU, se aplicaron 3 capas de solución al 1% de TPU +DMF+AgNPs en la superficie y se dejo secar al vacio a temperatura ambiente para inhibir la nucleación y aglomeración de nuevas nanopartículas, en la siguientes imágenes se aprecian las nanopartículas de plata dispersas en la matris polimerica de la película delgasa.



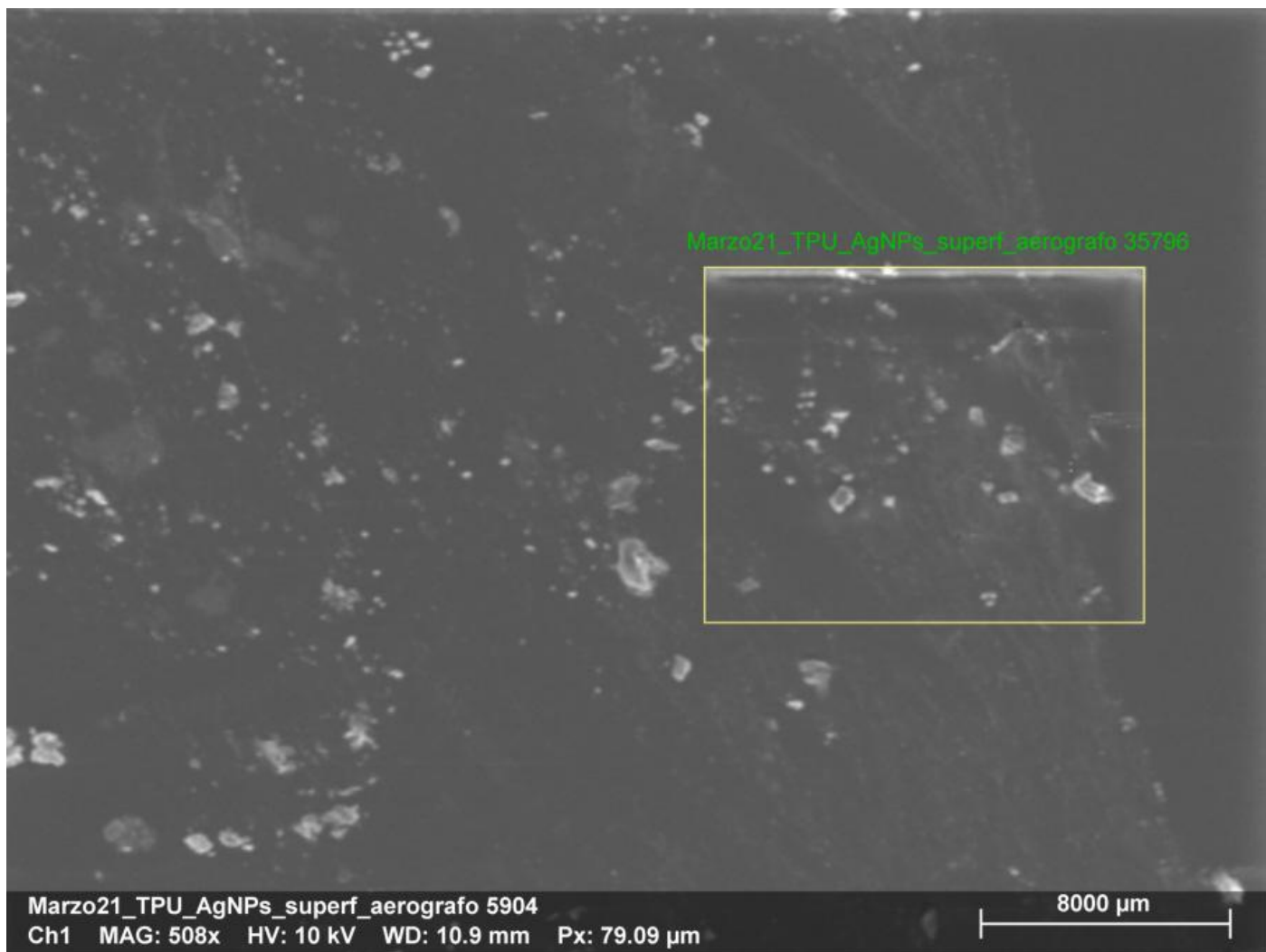
SEM HV: 10.0 kV	WD: 11.66 mm		MAIA3 TESCAN
View field: 2.60 mm	Det: SE	500 μ m	
SEM MAG: 80 x	Date(m/d/y): 03/21/25		



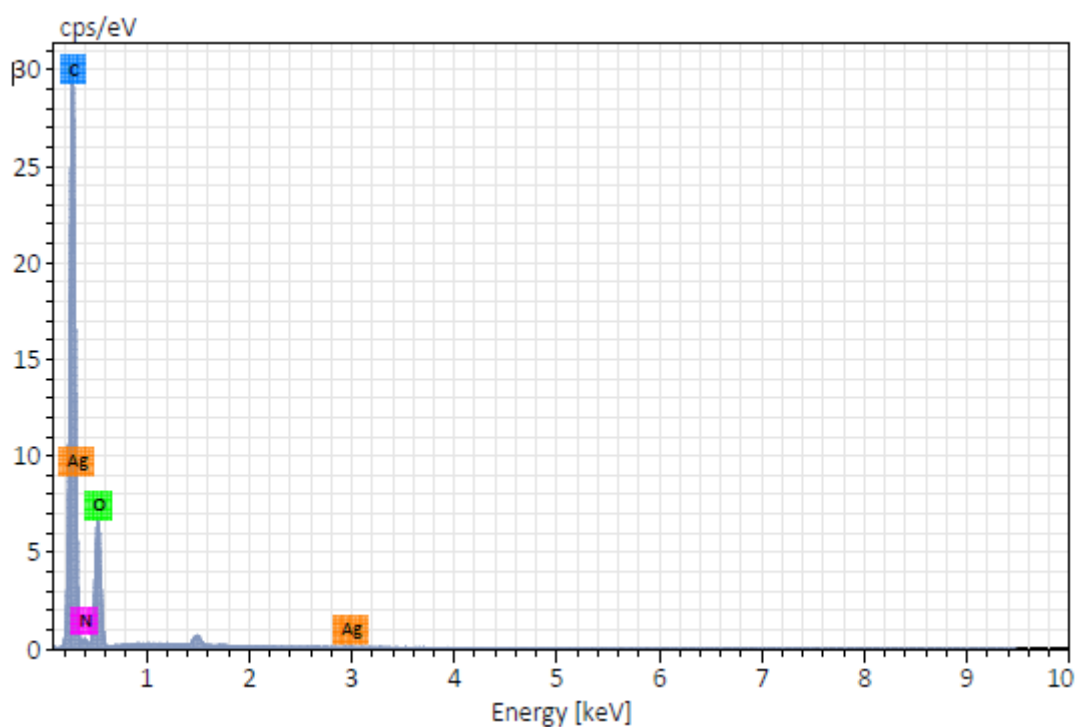
SEM HV: 10.0 kV	WD: 10.85 mm		MAIA3 TESCAN
View field: 409 μm	Det: SE	100 μm	UDLAP 
SEM MAG: 508 x	Date(m/d/y): 03/21/25		



Como análisis adicional se incorporo el análisis elemental para identificar los elementos químicos involucrados en la muestra e identificar las cantidades de cada uno de ellos.

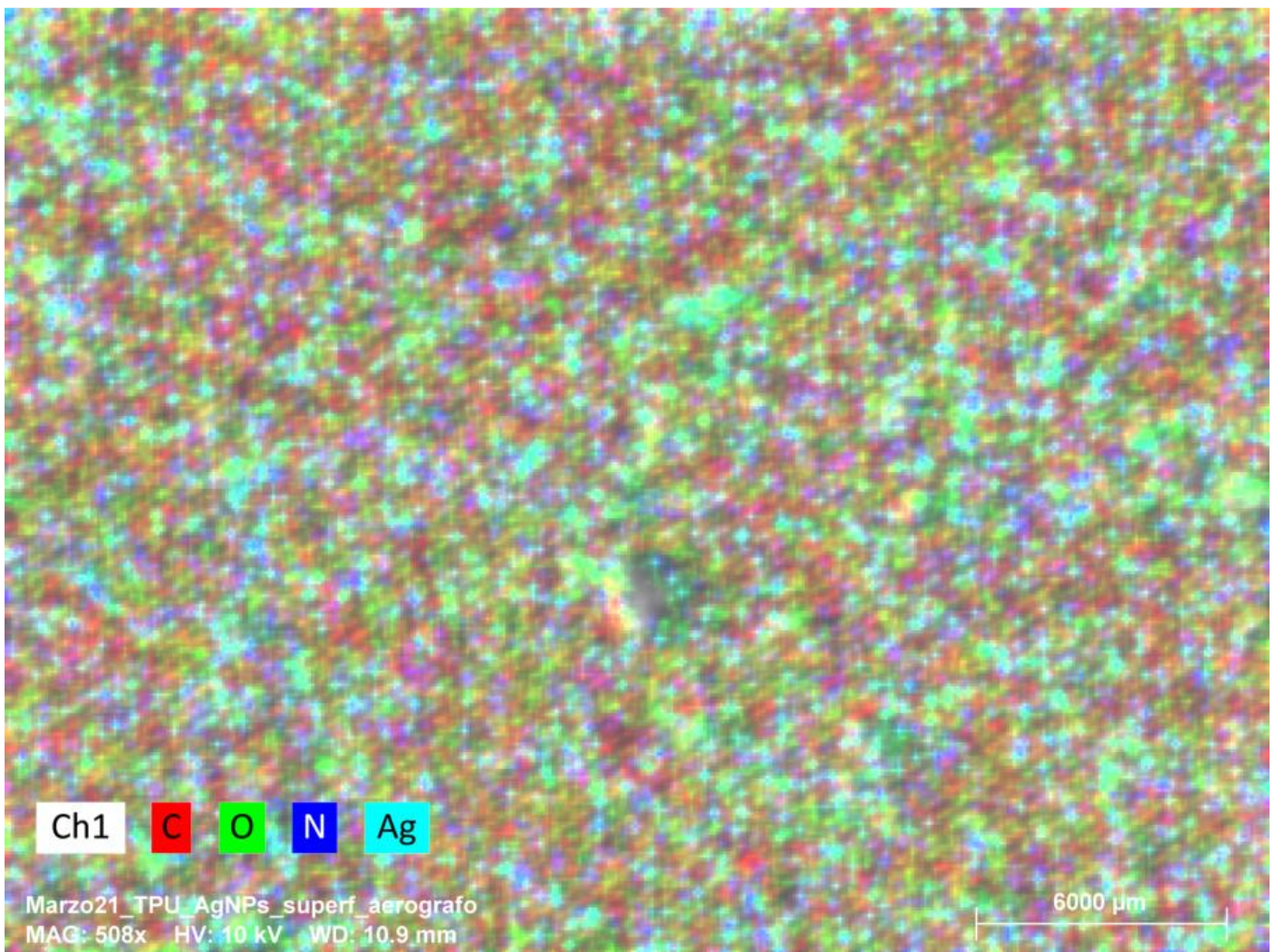


Tomamos una regi3n de la muestra y procedemos al an3lisis elemental de la misma, al ser un pol3mero con nanopart3culas dispersas debemos tener presentes elementos qu3micos como Carbono, Nitrogeno, Oxigeno y plata evidenciando asi la correcta dispersi3n de las nanopart3culas aplicadas en la superficie del pol3mero.

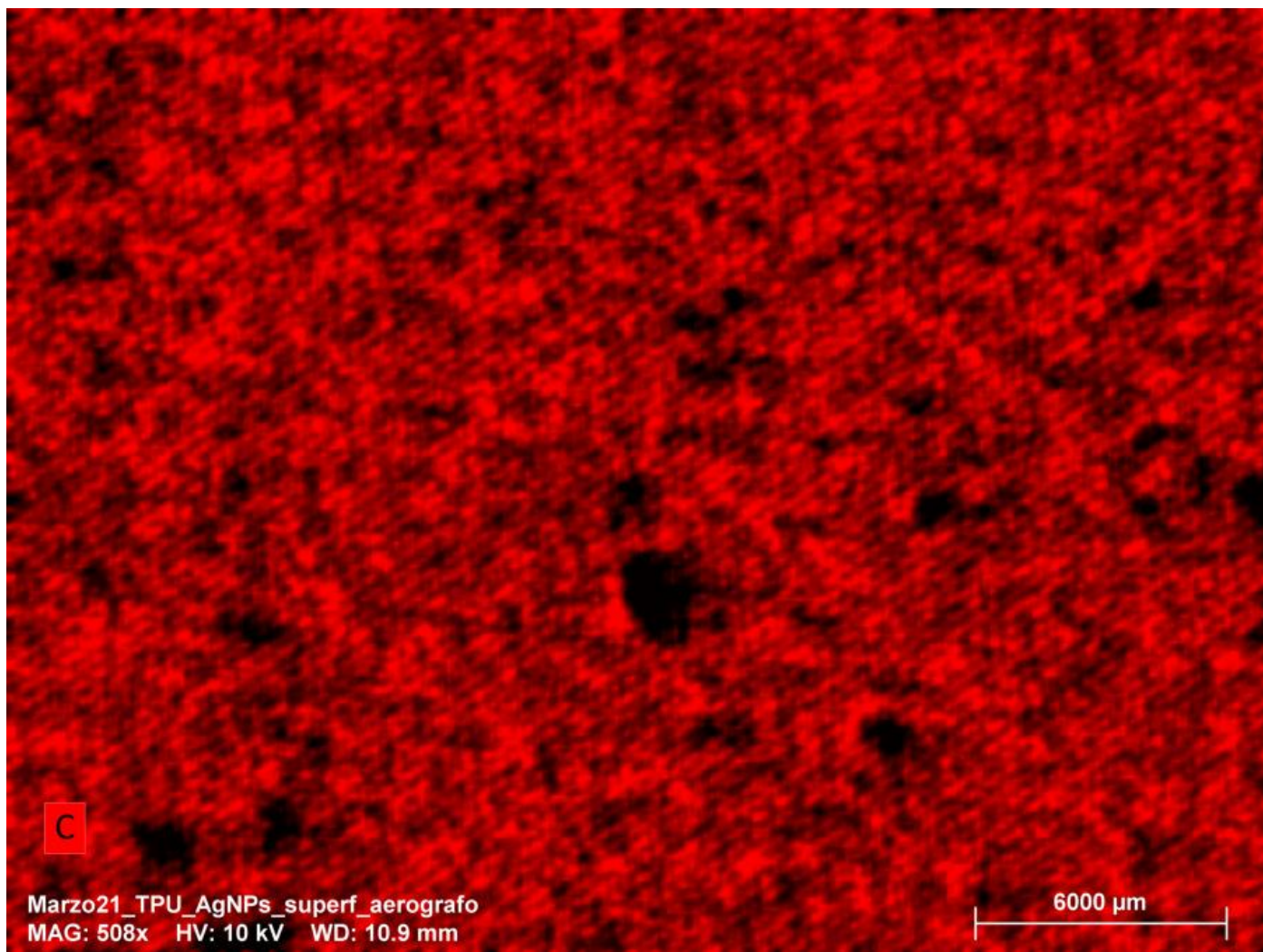


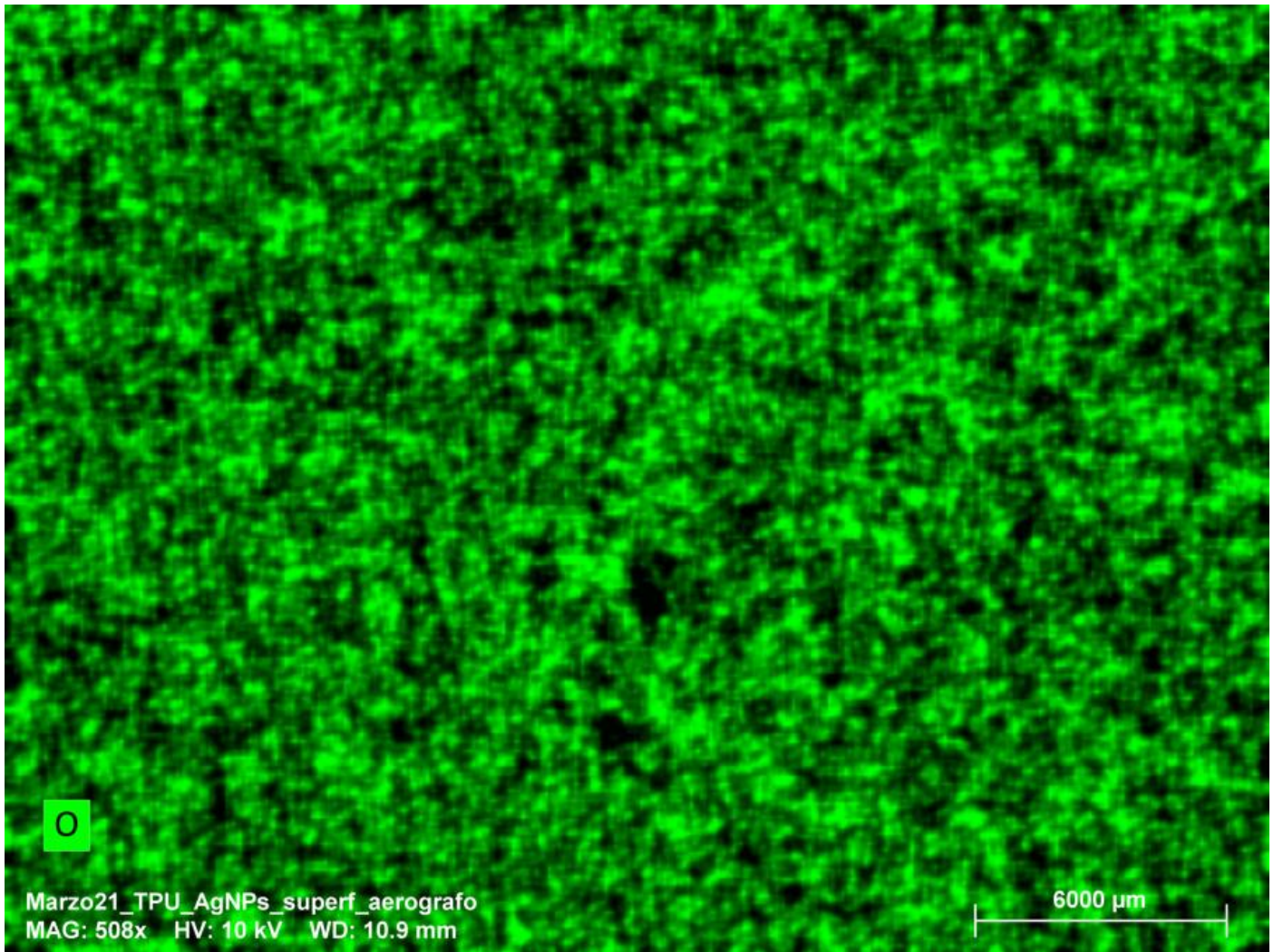
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	238653	63.70	63.70	69.68	6.92	10.86
Oxygen	8	58139	30.65	30.65	25.17	3.60	11.74
Nitrogen	7	4202	5.46	5.46	5.12	0.91	16.63
Silver	47	305	0.19	0.19	0.02	0.04	20.67
Sum			100.00	100.00	100.00		

Posterior a esto realizamos un análisis complementario el cual involucra un mapeo 2D de la región seleccionada para el análisis elemental y designa colores a cada uno de los elementos anteriormente mencionados dando como resultado una imagen con diferentes patrones de colores de acuerdo a los porcentajes de elementos químicos presentes en la muestra.



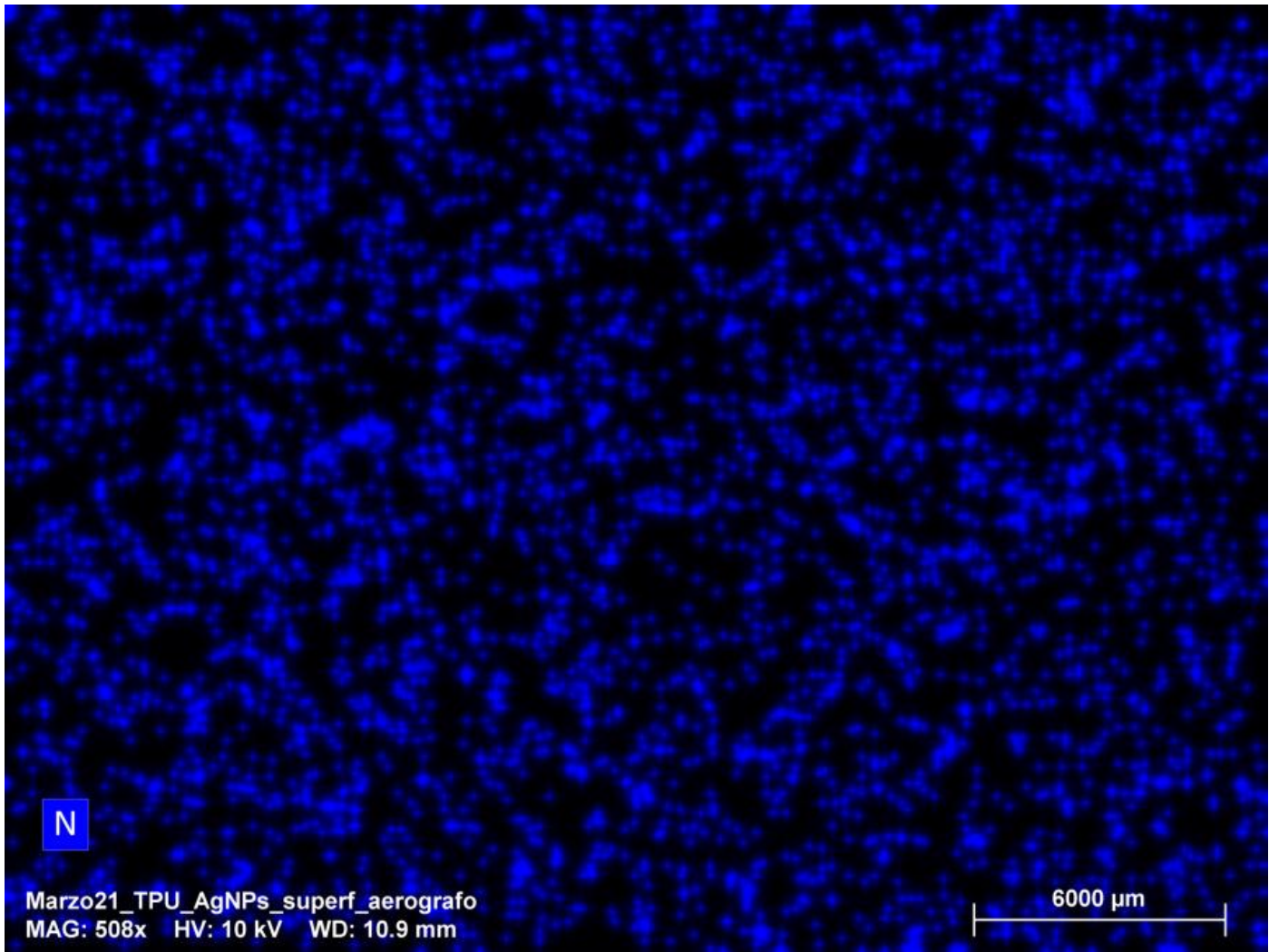
Aunado a esto se puede eliminar elemento por elemento para visualizar de manera individual el área que abarca cada uno de estos tal y como se observa en las siguientes imágenes de resultados.





Marzo21_TPU_AgNPs_superf_aerografo
MAG: 508x HV: 10 kV WD: 10.9 mm

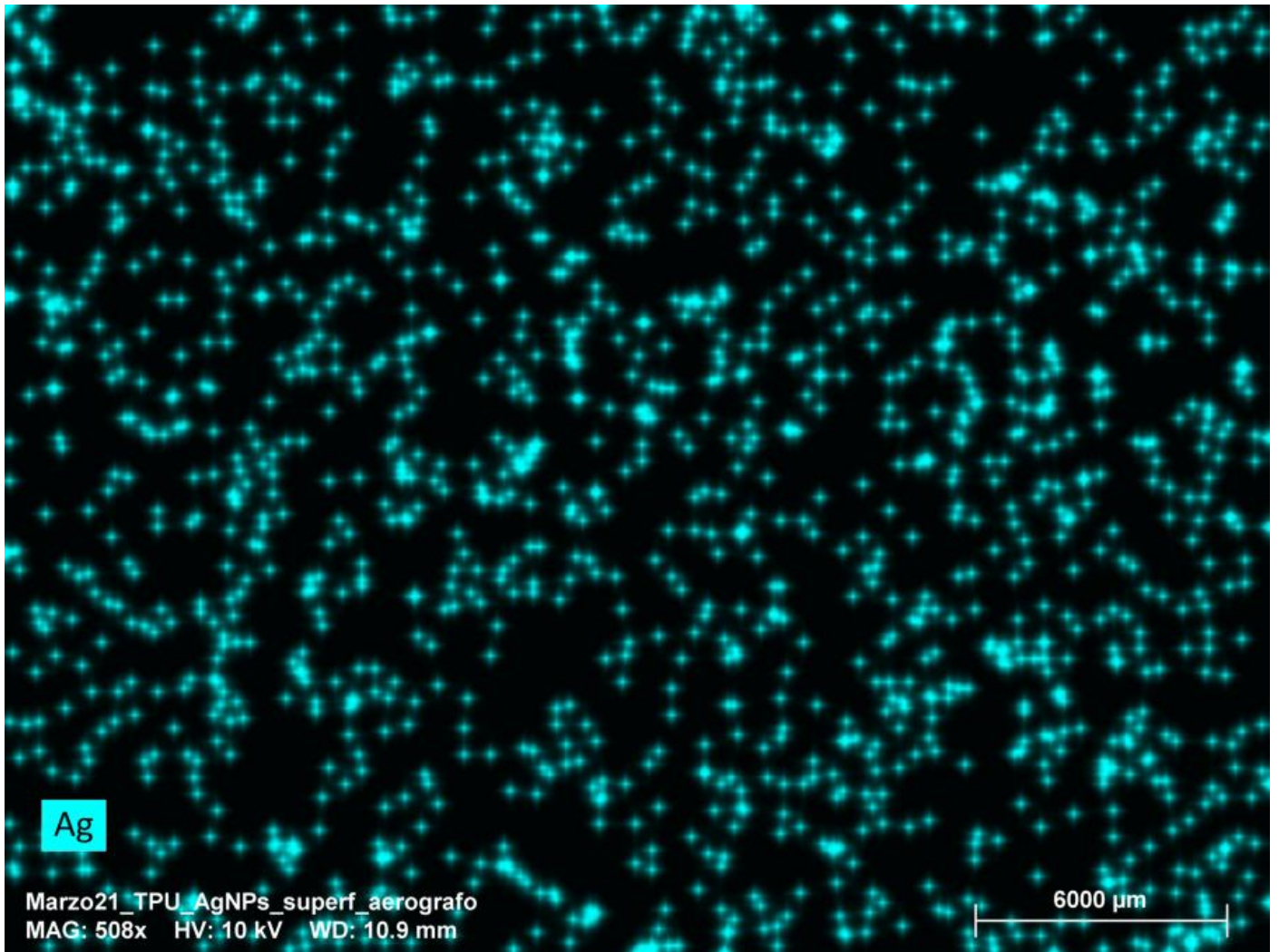
6000 μm



N

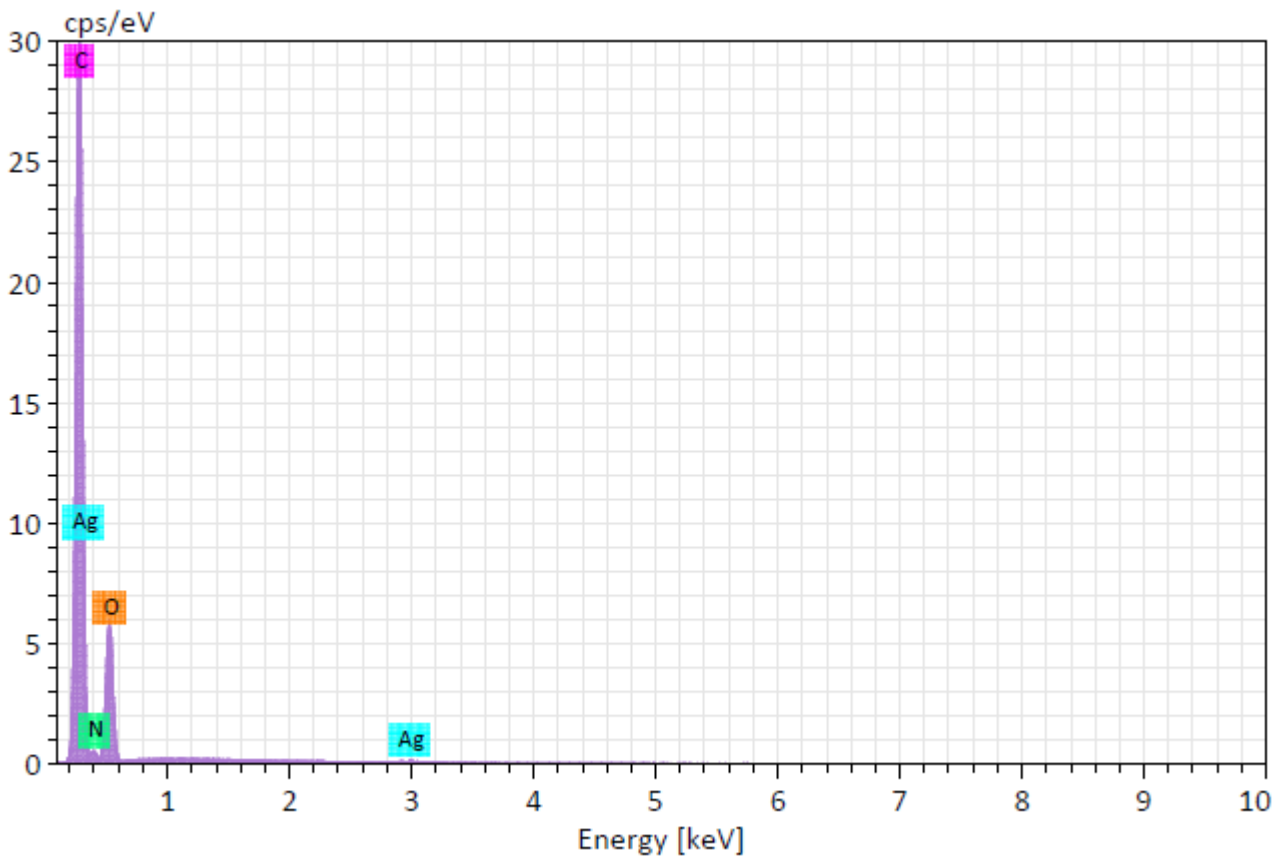
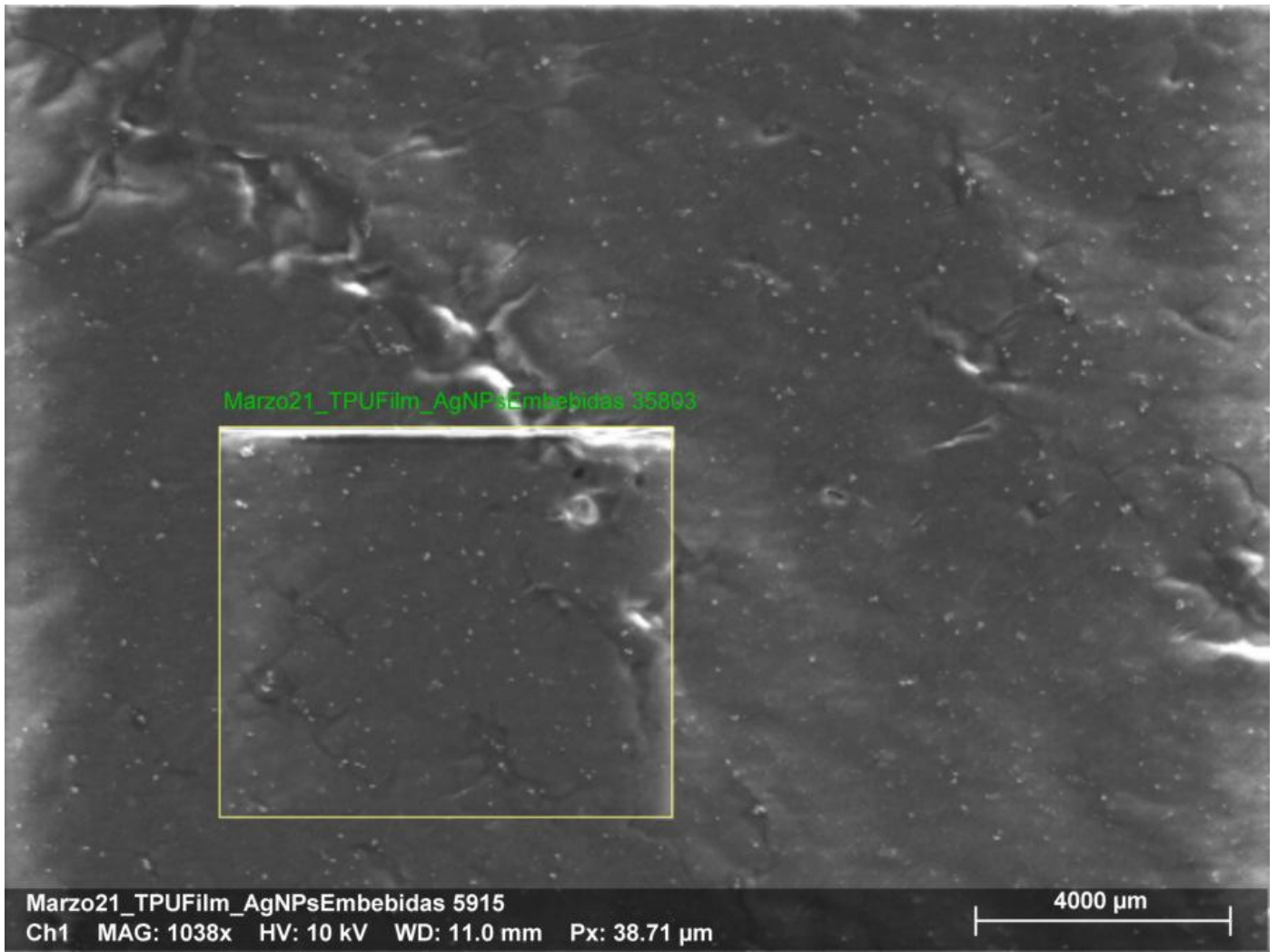
Marzo21_TPU_AgNPs_superf_aerografo
MAG: 508x HV: 10 kV WD: 10.9 mm

6000 μm

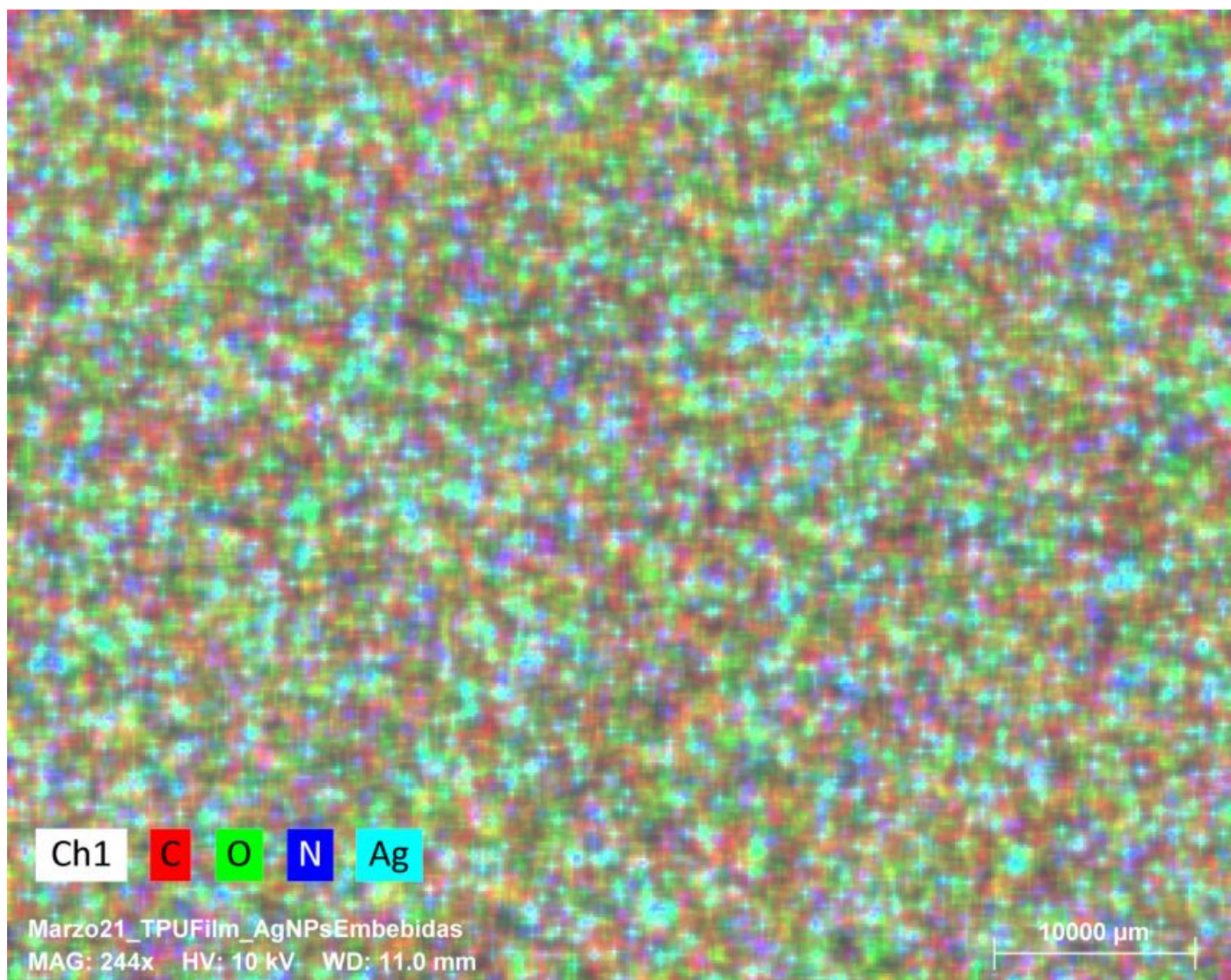


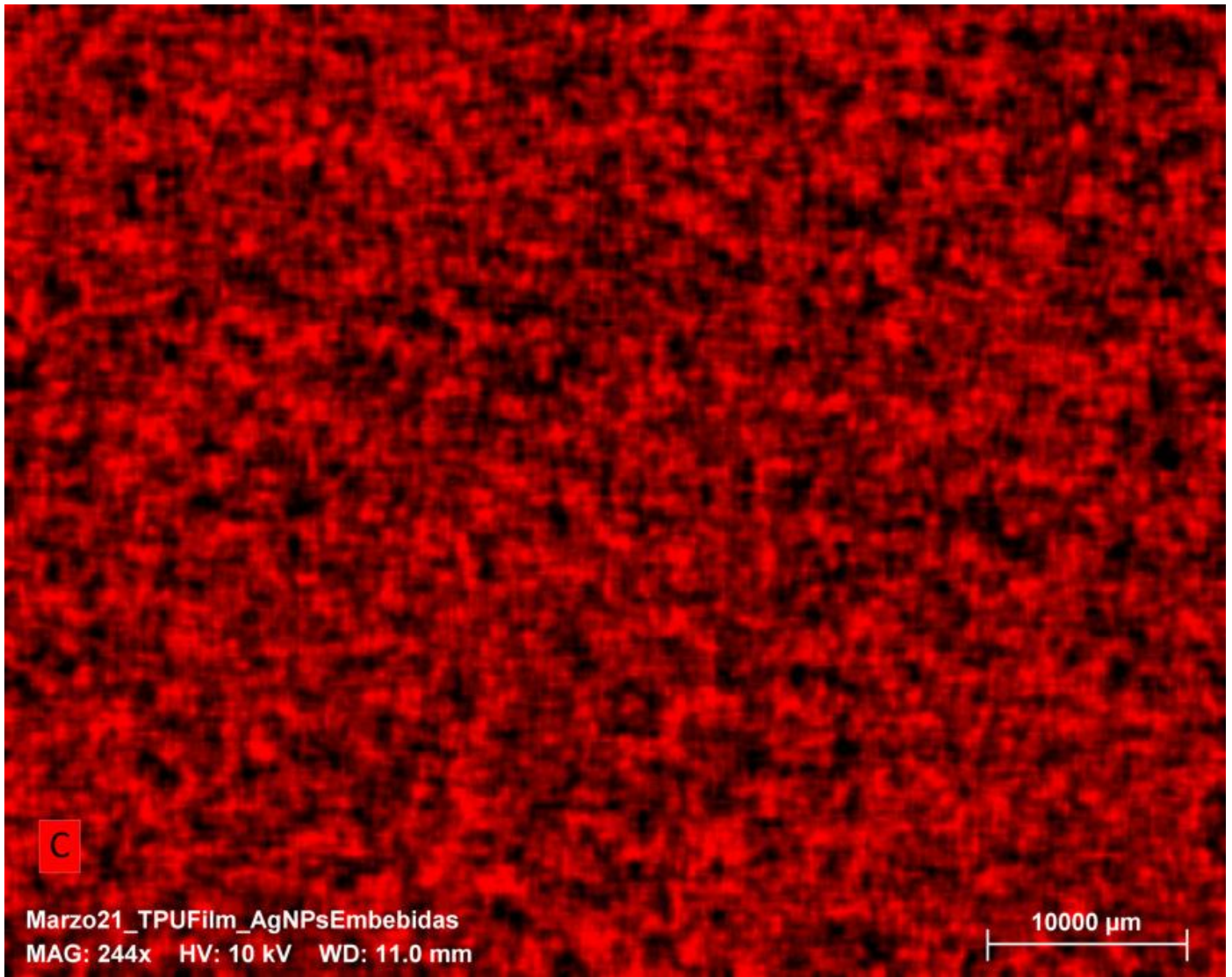
En la presente figura se muestra la correcta dispersión de las nanopartículas de plata en la película delgada con el método de aerografía.

Por otro lado se realizó otra prueba con nanopartículas enbebidas en la matriz polimérica del TPU y los resultados fueron los siguientes:



Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	336625	65.12	65.12	71.06	6.99	10.73
Oxygen	8	71161	28.25	28.25	23.14	3.27	11.59
Nitrogen	7	6327	6.14	6.14	5.75	0.95	15.44
Silver	47	1059	0.48	0.48	0.06	0.05	10.14
Sum			100.00	100.00	100.00		

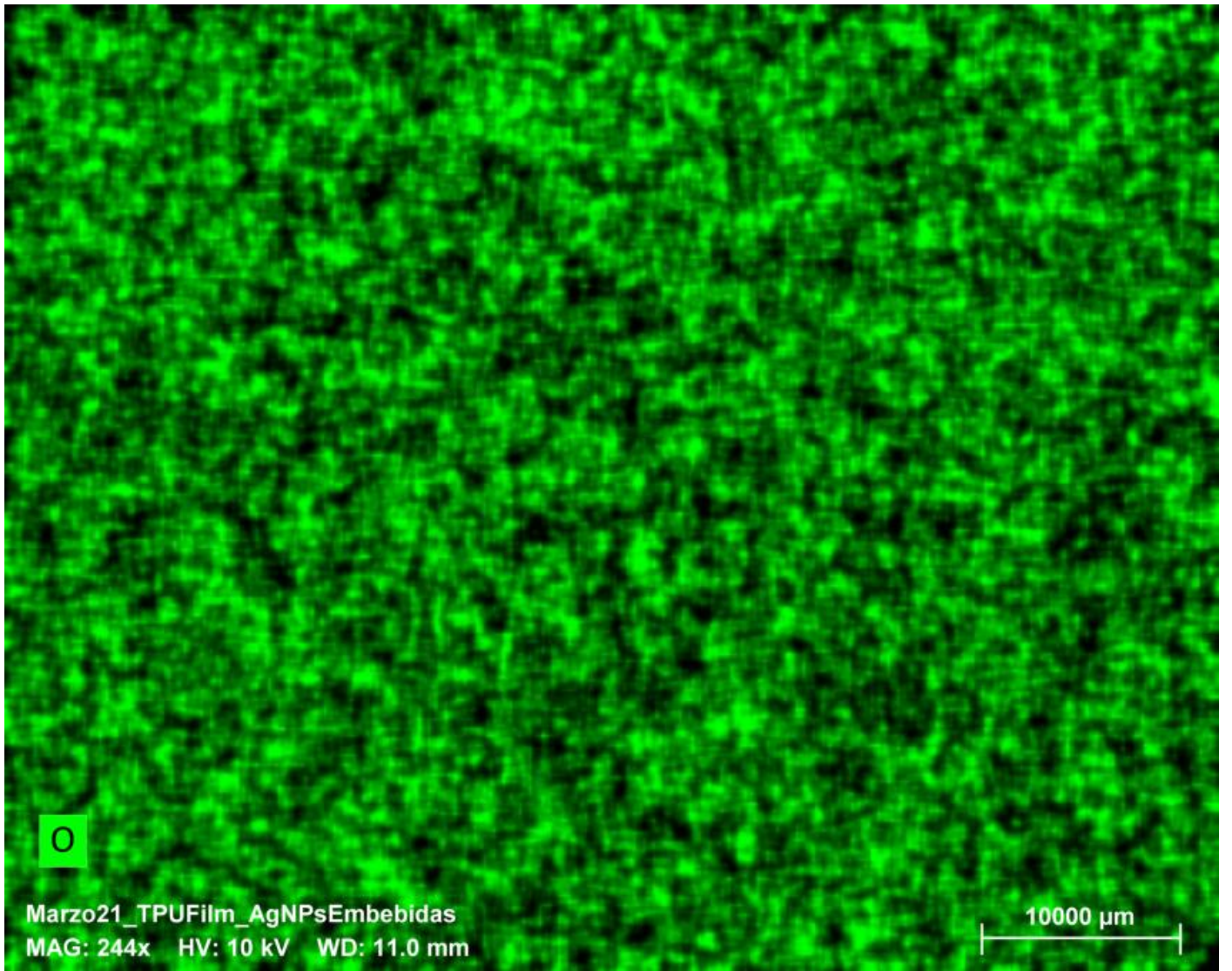




C

Marzo21_TPUFilm_AgNPsEmbebidas
MAG: 244x HV: 10 kV WD: 11.0 mm

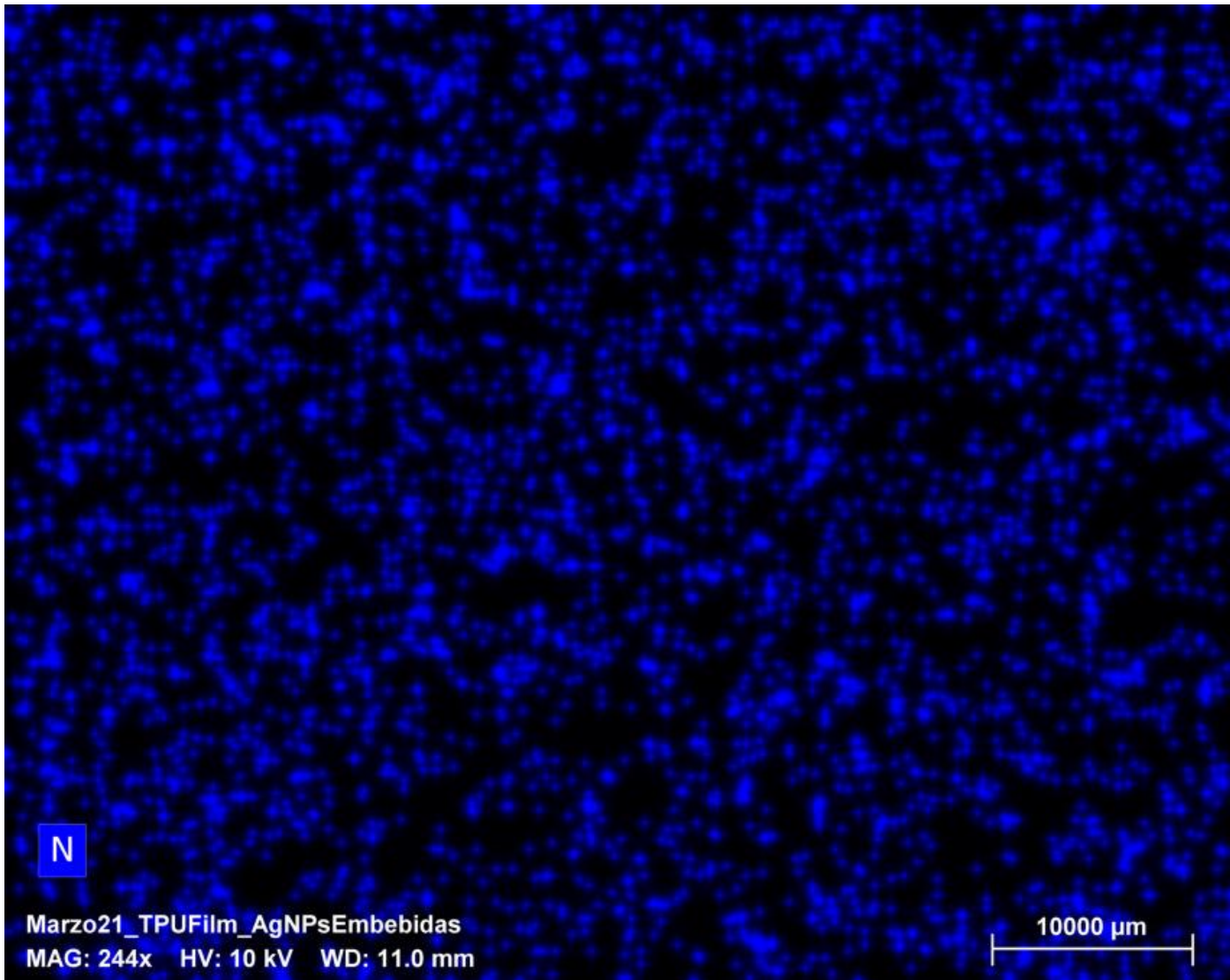
10000 μm



O

Marzo21_TPUFilm_AgNPsEmbebidas
MAG: 244x HV: 10 kV WD: 11.0 mm

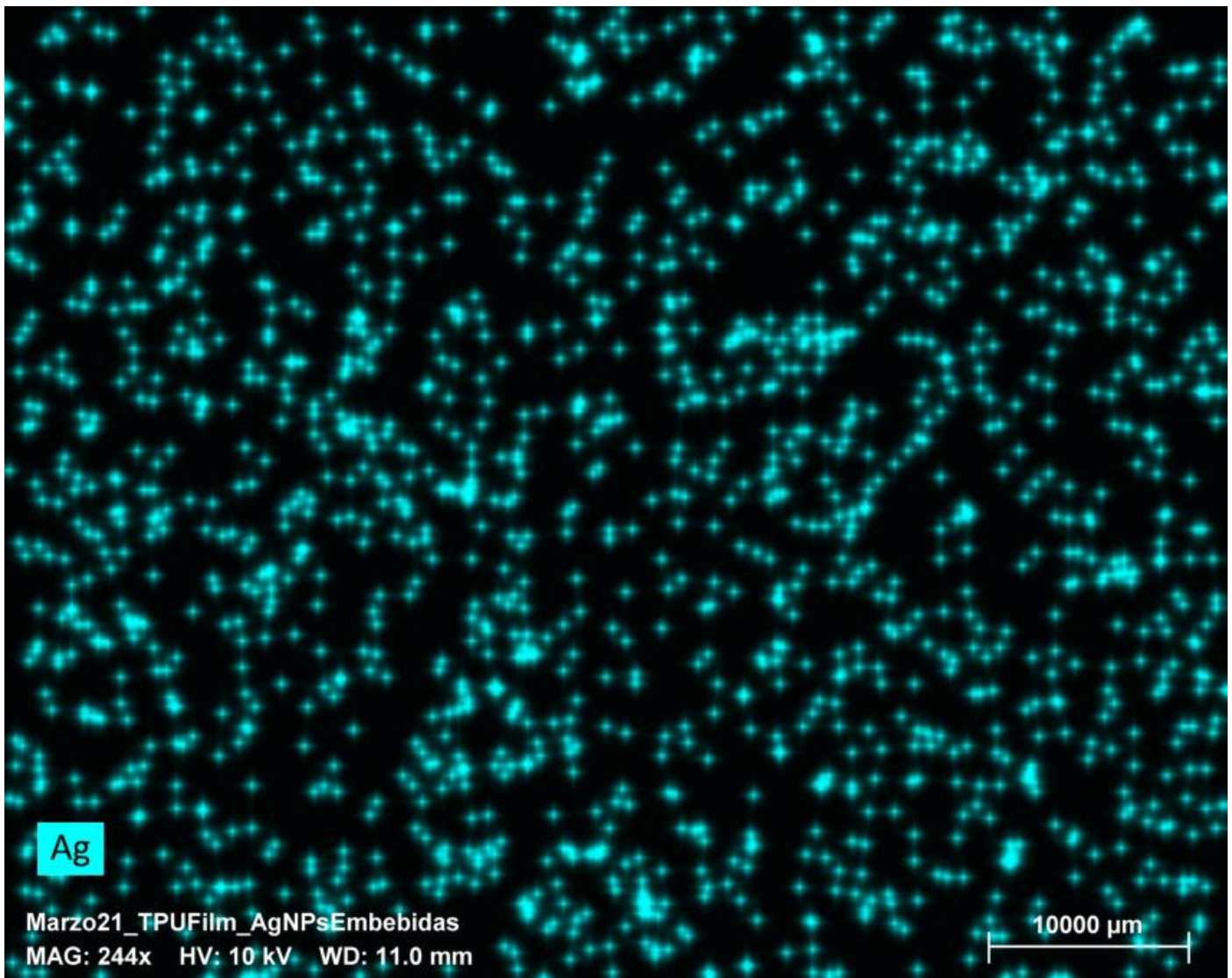
10000 μm



N

Marzo21_TPUFilm_AgNPsEmbebidas
MAG: 244x HV: 10 kV WD: 11.0 mm

10000 μm



- Integración en alineador Invisalign.

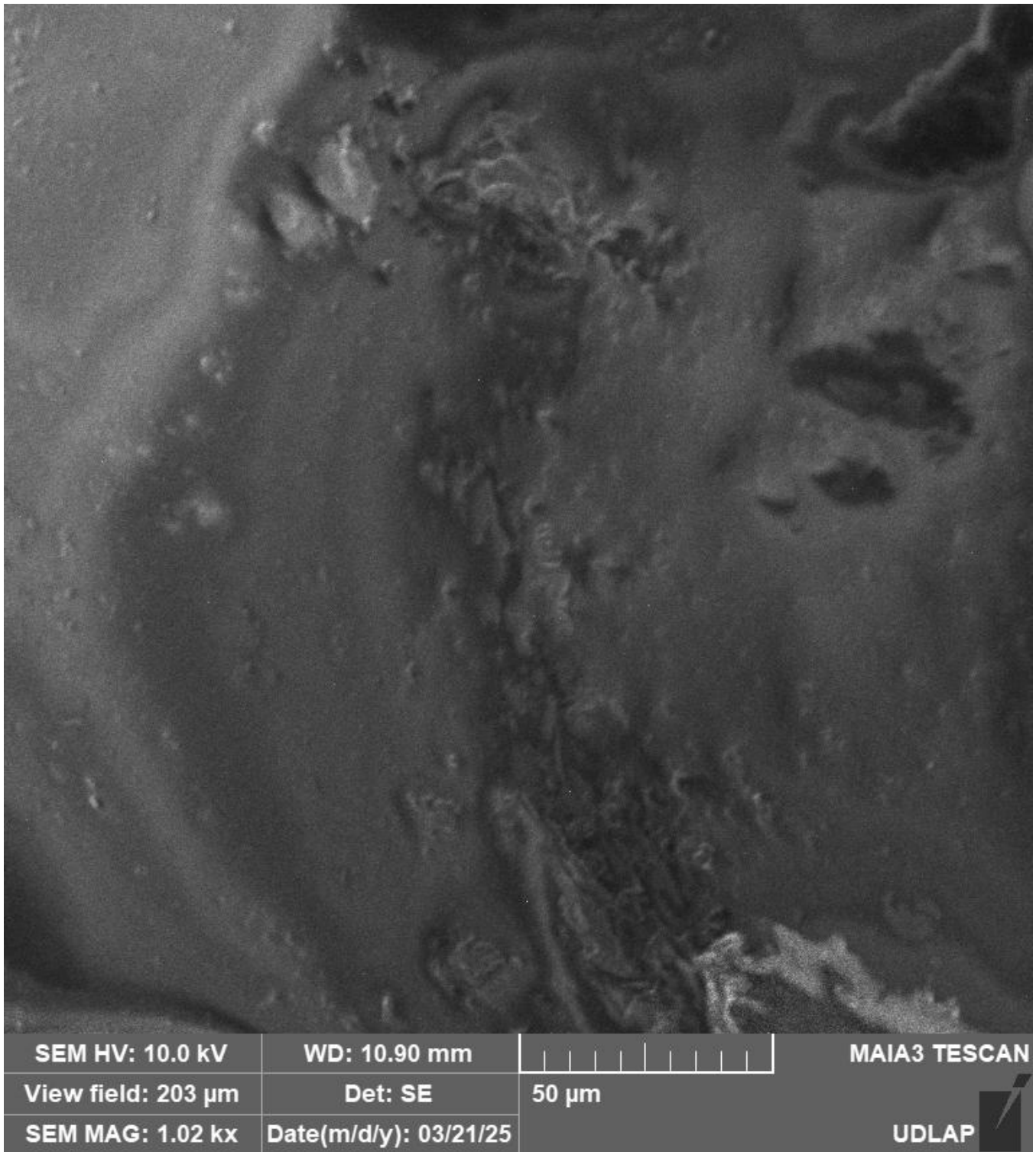
Para la integración de las nanopartículas en alineadores comerciales se realizó también una solución de DMF+AgNPs+ TPU al 10% y se aplicó con la técnica de aerografía 3 capas de dicha solución.

Se aplicó a ambos alineadores A y B y se observaron los resultados en el microscopio electrónico

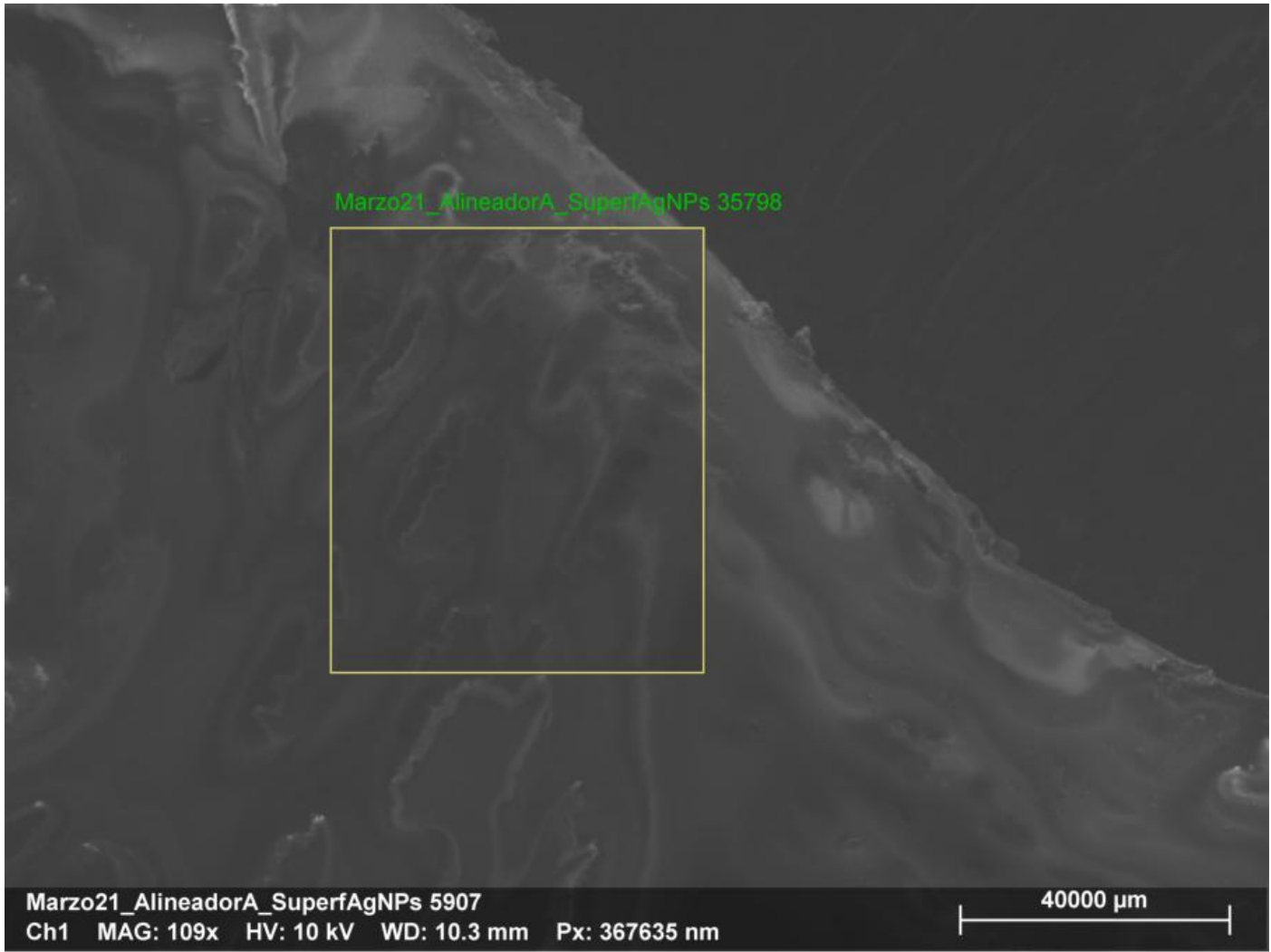
Alineador A

El alineador A tiene un menor porcentaje de TPU en su composición química dando como resultado menor flexibilidad y resistencia térmica debido al copolímero que completa el resto de la composición química del alineador, esto dificultaba la captura de imágenes con el microscopio electrónico debido a que el haz de electrones terminaba quemando la muestra.

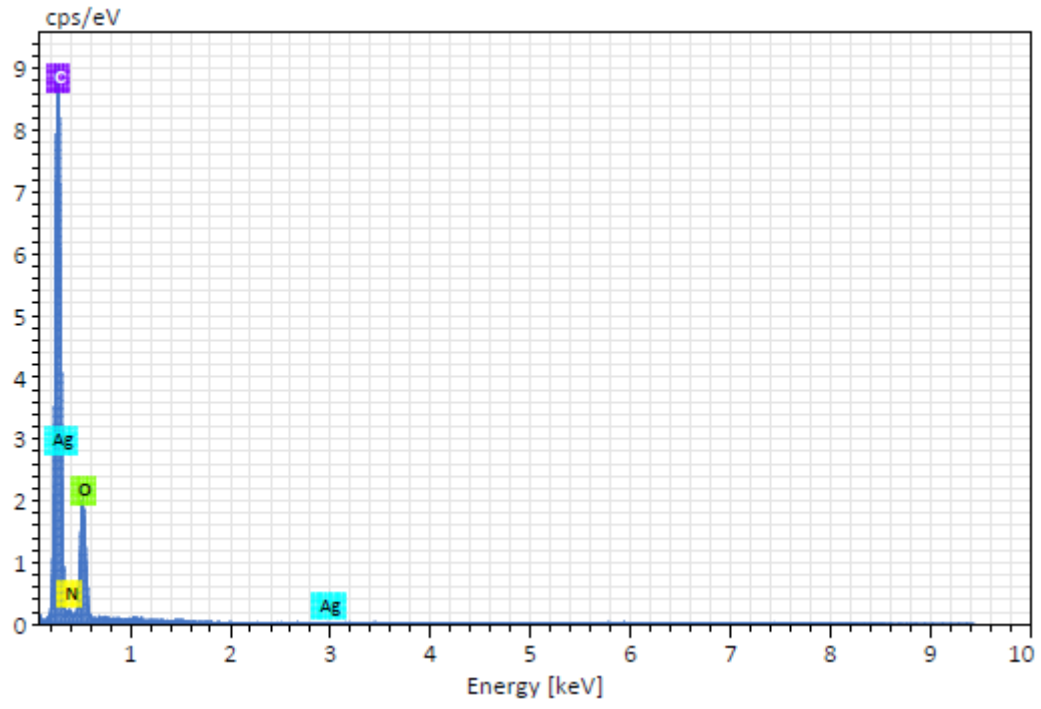
En la siguiente imagen se plasma una micrografía del alineador A a una distancia considerable para evitar daños en la muestra por el haz de electrones.



Una vez tomada la micrografía y elegida una región de la muestra se realizó un análisis elemental de la misma para evaluar los porcentajes de elementos químicos que la componen tal y como se muestra en las siguientes imágenes.



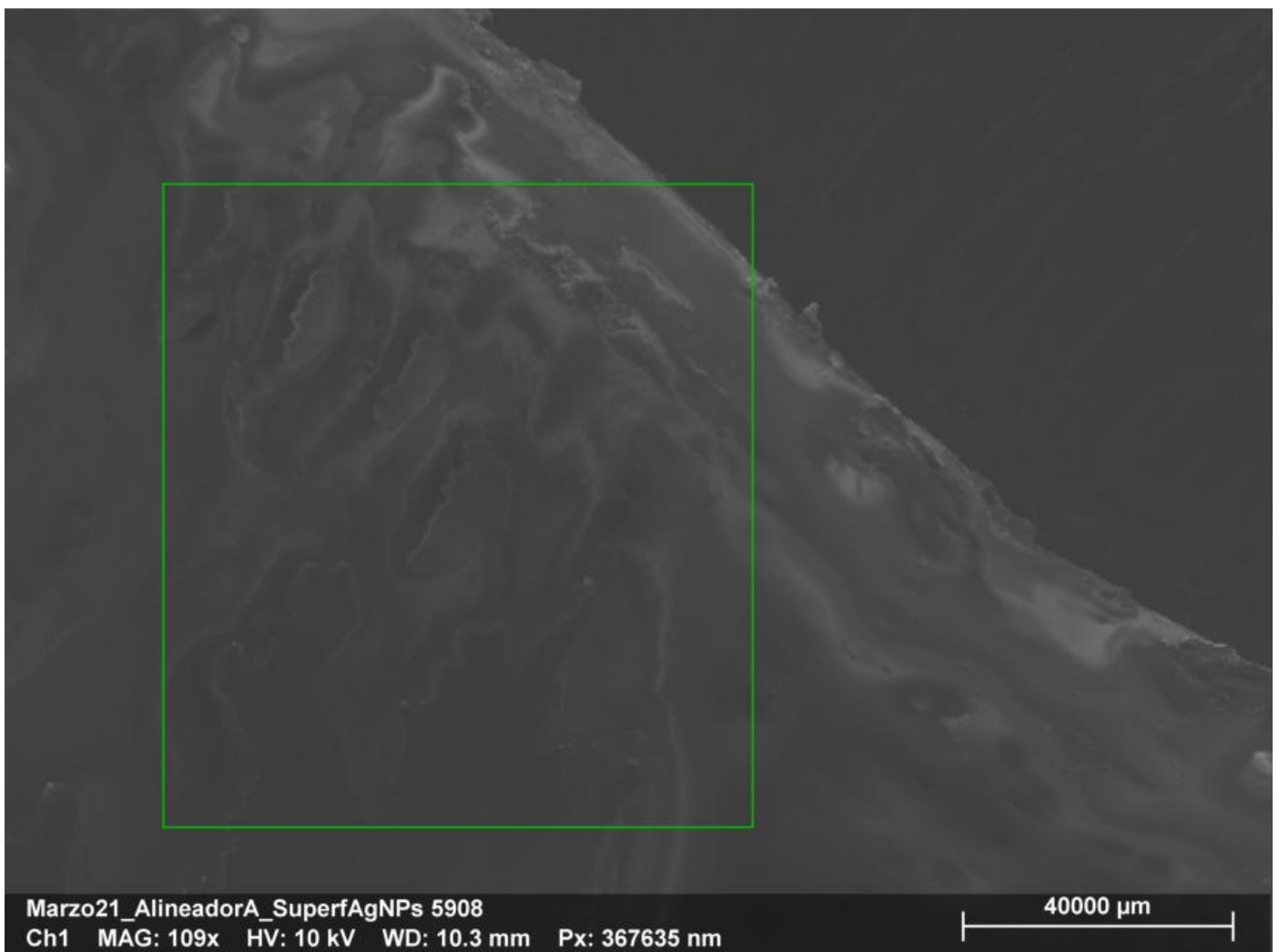
Análisis elemental

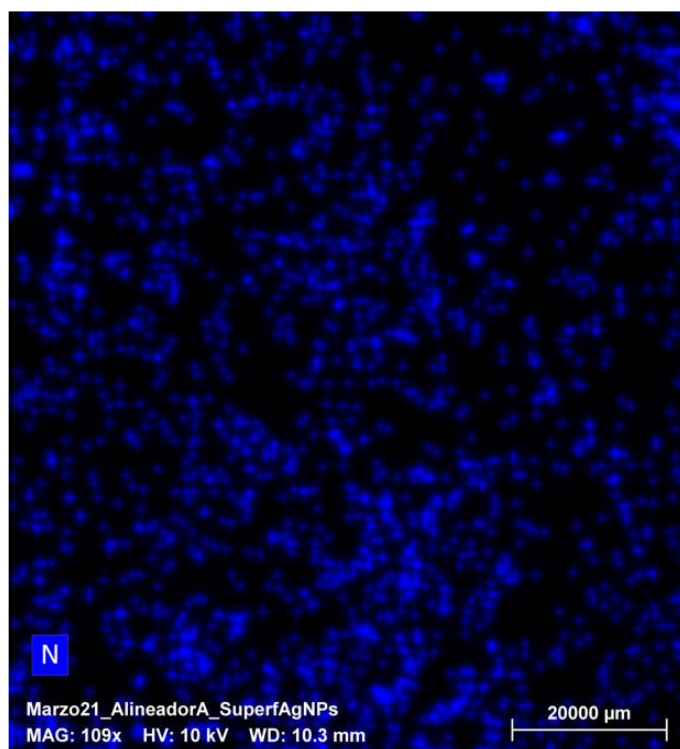
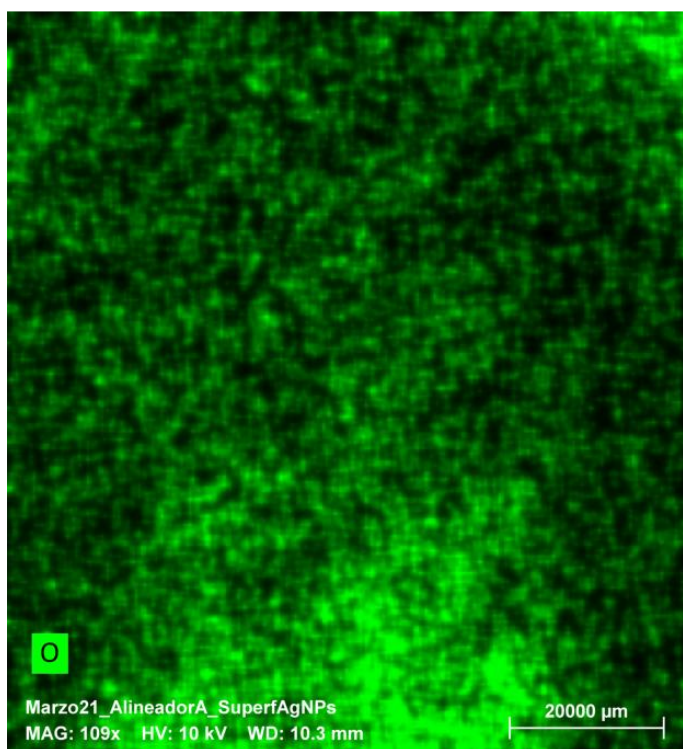
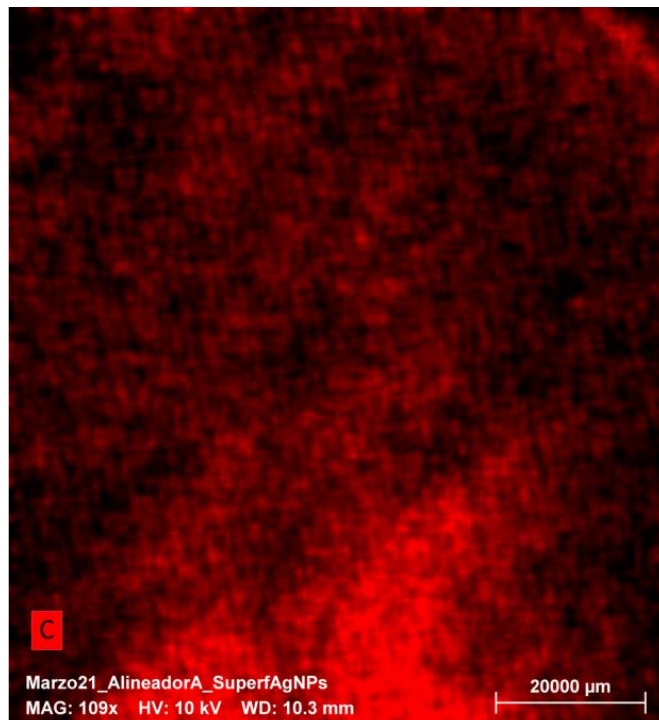
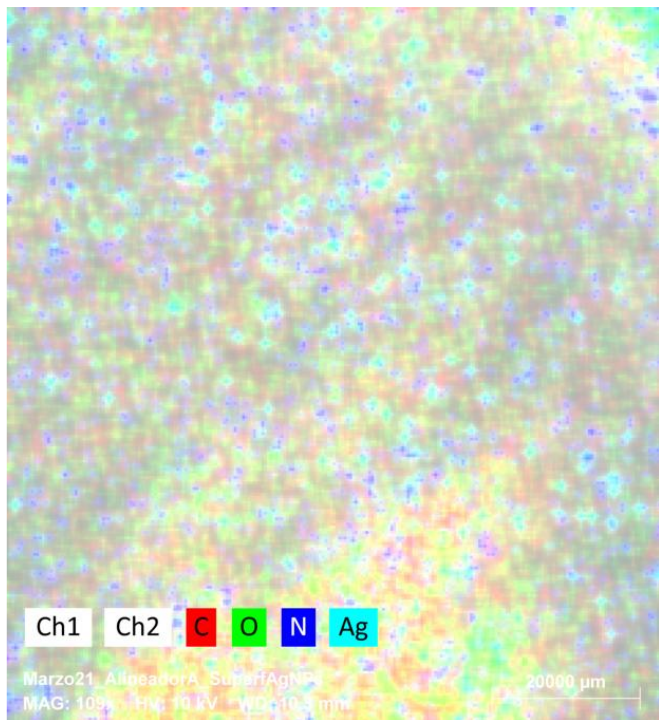


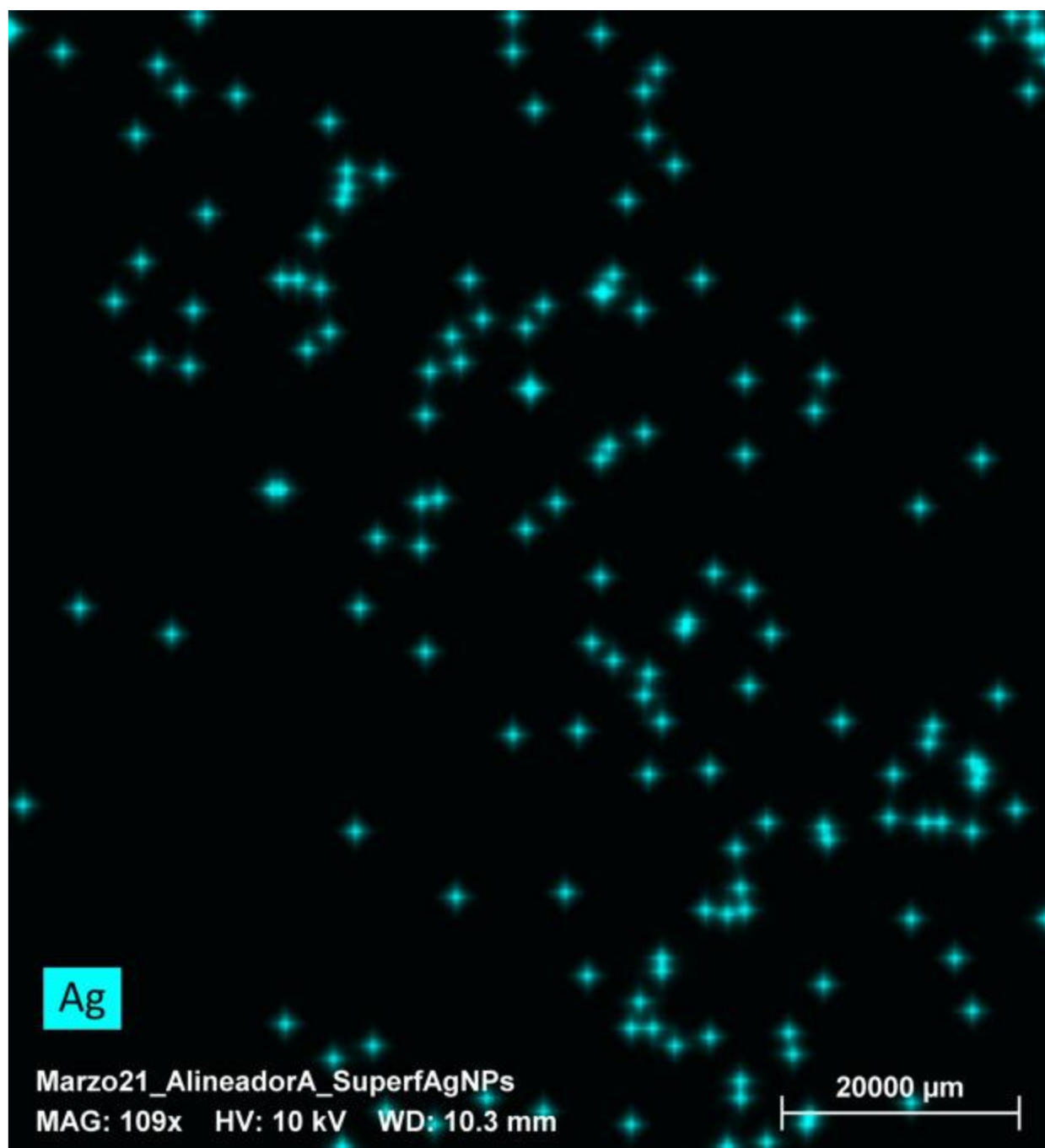
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	67572	61.16	61.16	67.09	7.08	11.58
Oxygen	8	16591	30.12	30.12	24.81	3.97	13.19
Nitrogen	7	2033	8.59	8.59	8.08	1.65	19.16
Silver	47	60	0.12	0.12	0.02	0.04	34.42
Sum			100.00	100.00	100.00		

Posterior a esto se eligió una región de la misma muestra y se realizó un mapeo 2D de la zona para generar un análisis complementario al igual que en las muestras anteriores y así visualizar gráficamente los elementos en la muestra designando colores a cada uno de los elementos.

En la primera imagen se plasman los múltiples elementos en la muestra del alineador A y en las siguientes imágenes se muestran los elementos dispersos en la muestra de manera individual,



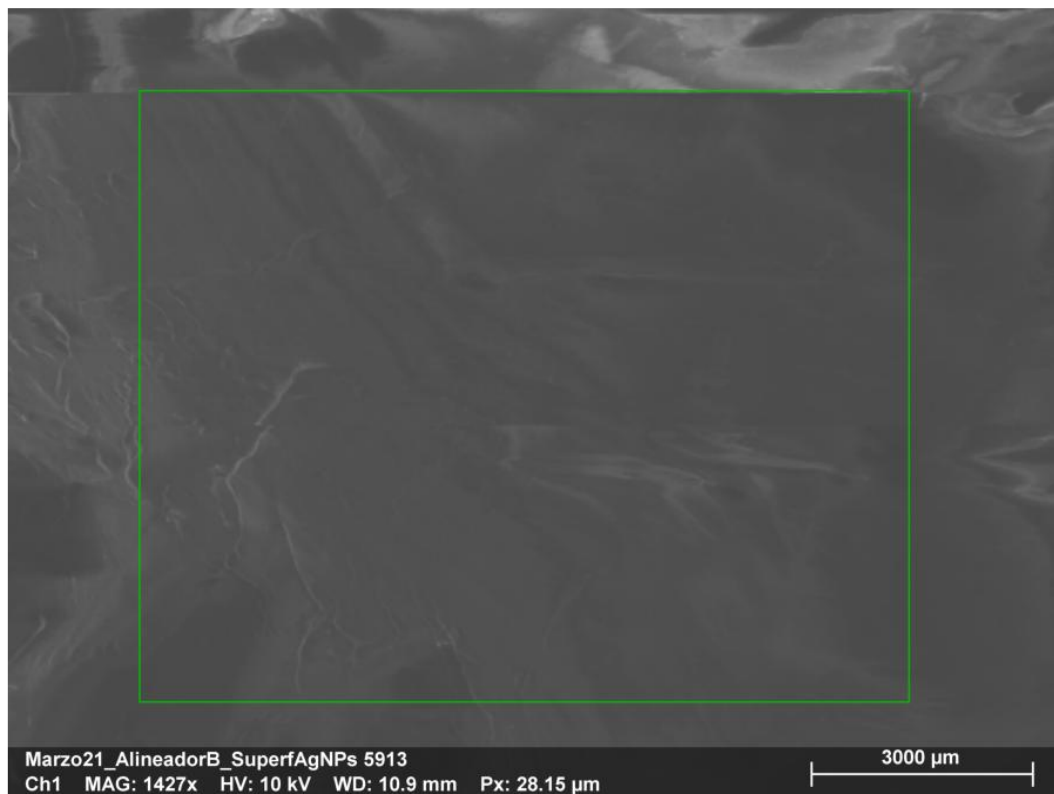




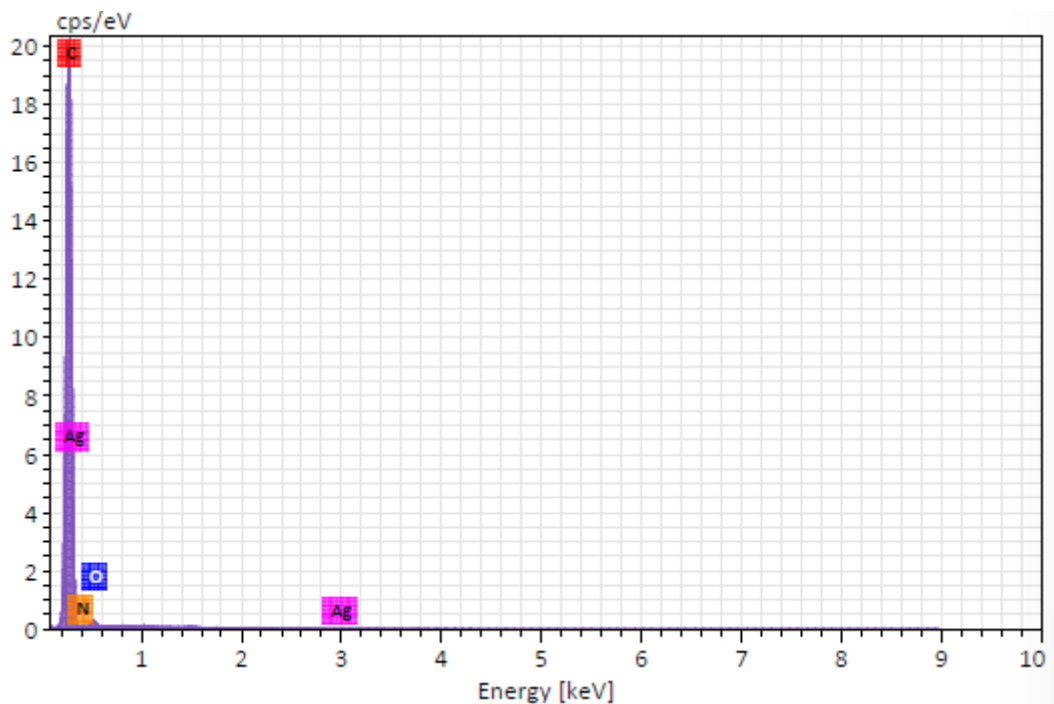
Alineador B

El alineador B tiene un mayor porcentaje de TPU en su composición química dando como resultado mayor flexibilidad y resistencia térmica debido al copolímero que completa el resto de la composición química del alineador, esto dificultaba en menor grado la captura de imágenes con el microscopio electrónico a comparación del alineador A, sin embargo, a una aproximación sumamente alta se tendía a quemar la muestra.

En la siguiente imagen se plasma una micrografía del alineador B a una distancia considerable para evitar daños en la muestra por el haz de electrones

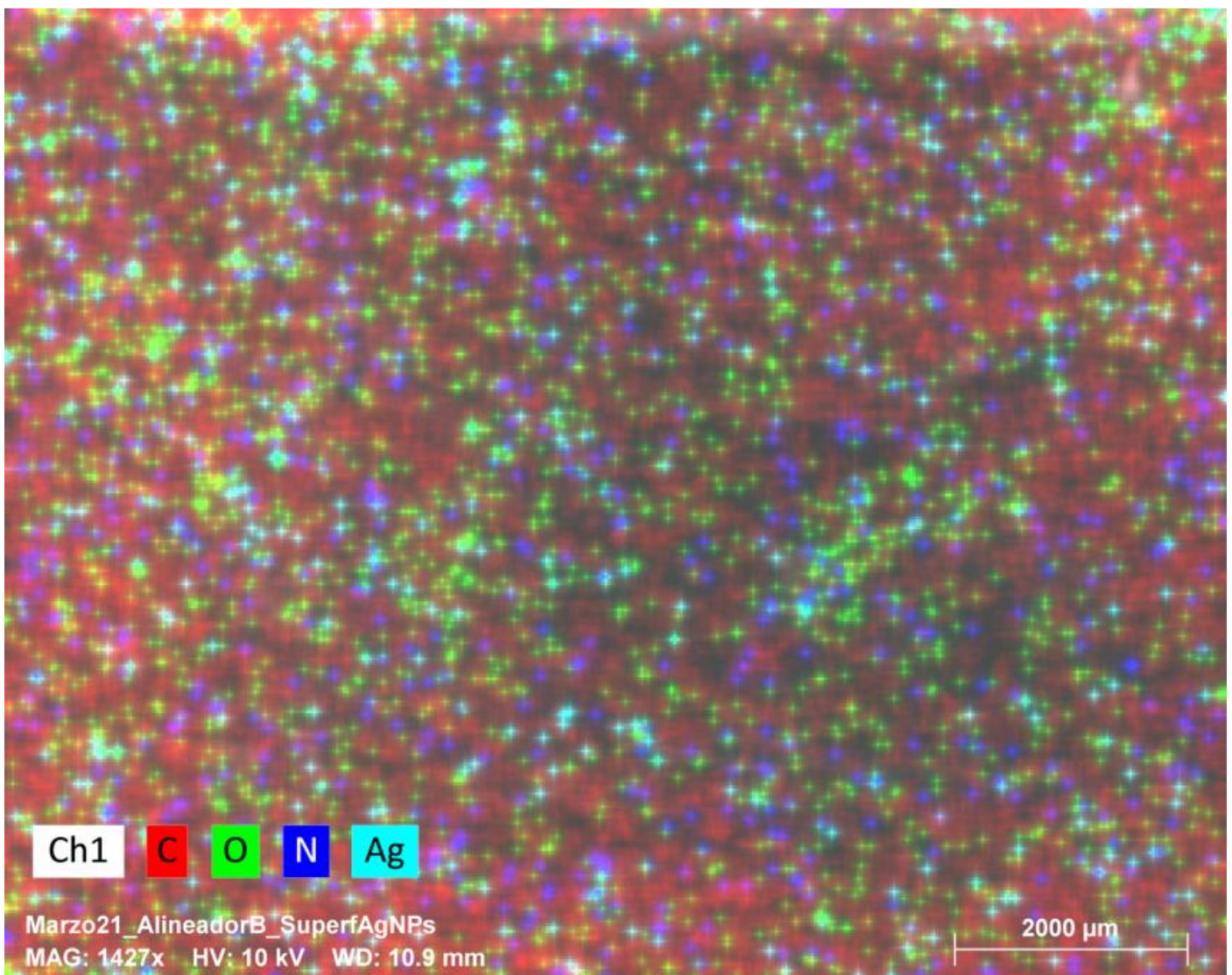


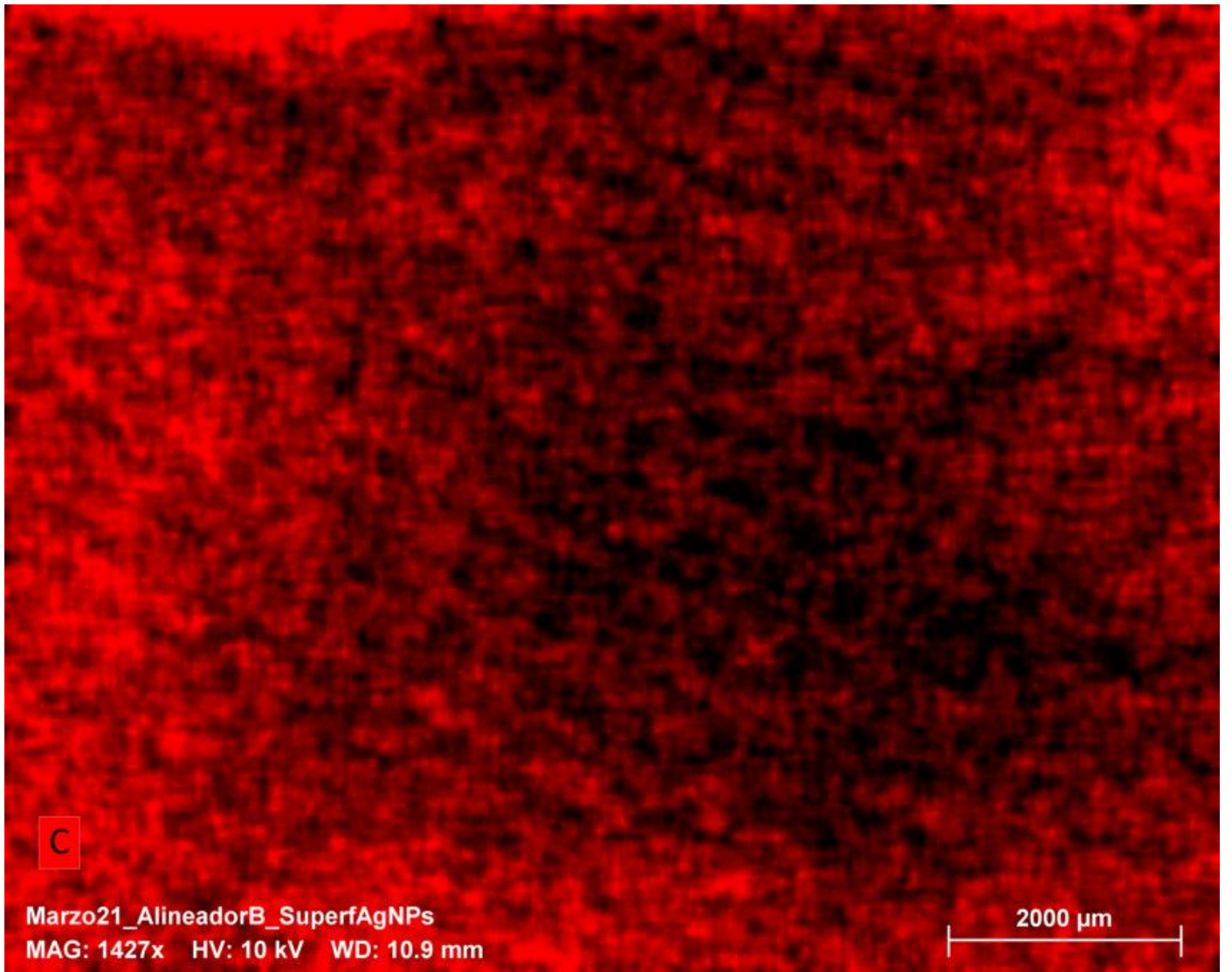
Una vez seleccionada la región a analizar se genera el análisis elemental de la muestra.



Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	161460	91.59	91.59	93.15	10.10	11.02
Oxygen	8	2616	4.32	4.32	3.30	0.79	18.40
Nitrogen	7	898	4.07	4.07	3.55	0.97	23.96
Silver	47	17	0.03	0.03	0.00	0.01	25.31
Sum			100.00	100.00	100.00		

Una vez identificados los porcentajes de los elementos que componen a la muestra se procedió a realizar un análisis complementario el cual consiste en realizar un mapeo 2D de la región seleccionada y se generan imágenes con los diferentes elementos que componen la muestra designando colores a cada uno de los elementos químicos que comprenden la muestra .

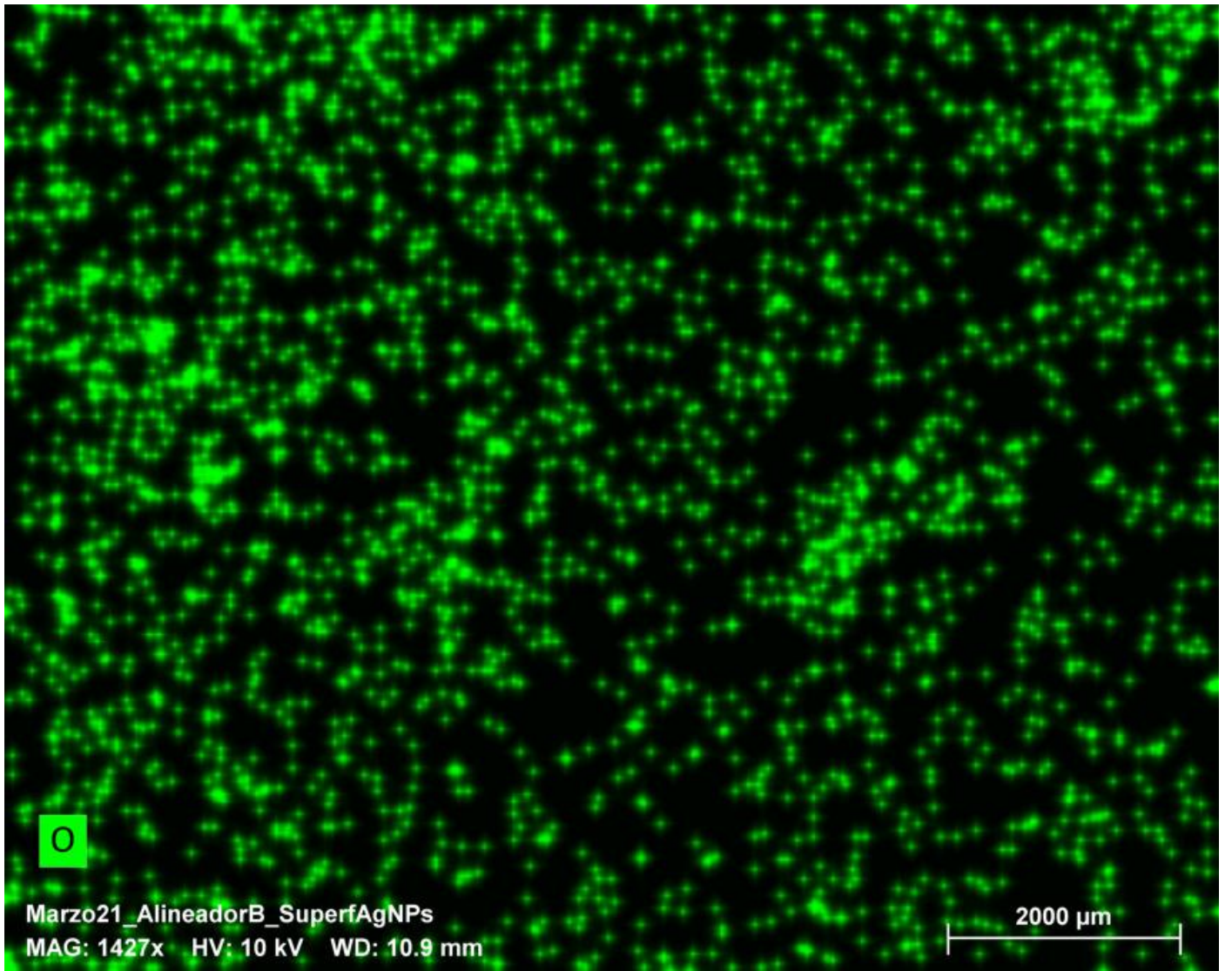




C

Marzo21_AlineadorB_SuperfAgNPs
MAG: 1427x HV: 10 kV WD: 10.9 mm

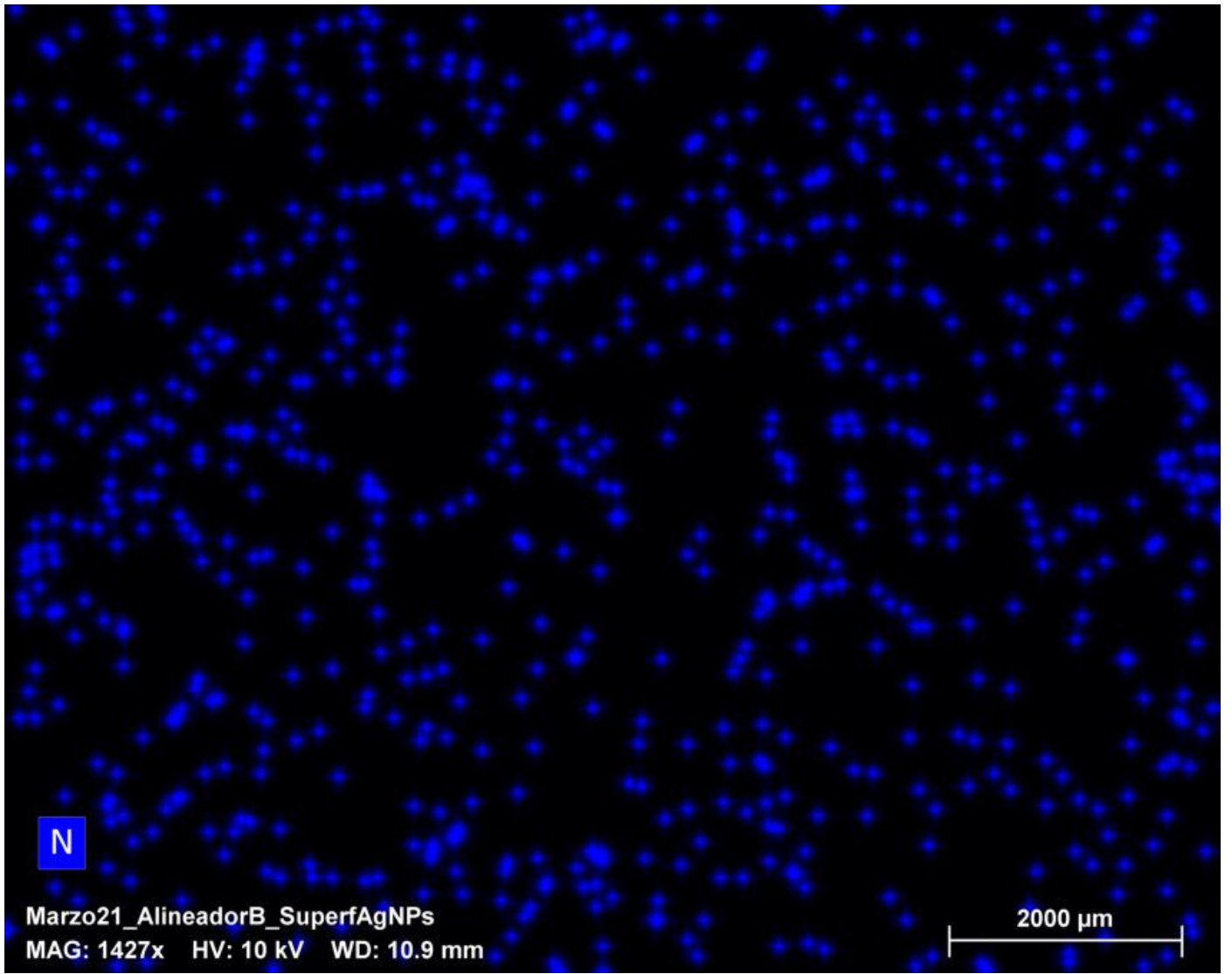
2000 μm



O

Marzo21_AlineadorB_SuperfAgNPs
MAG: 1427x HV: 10 kV WD: 10.9 mm

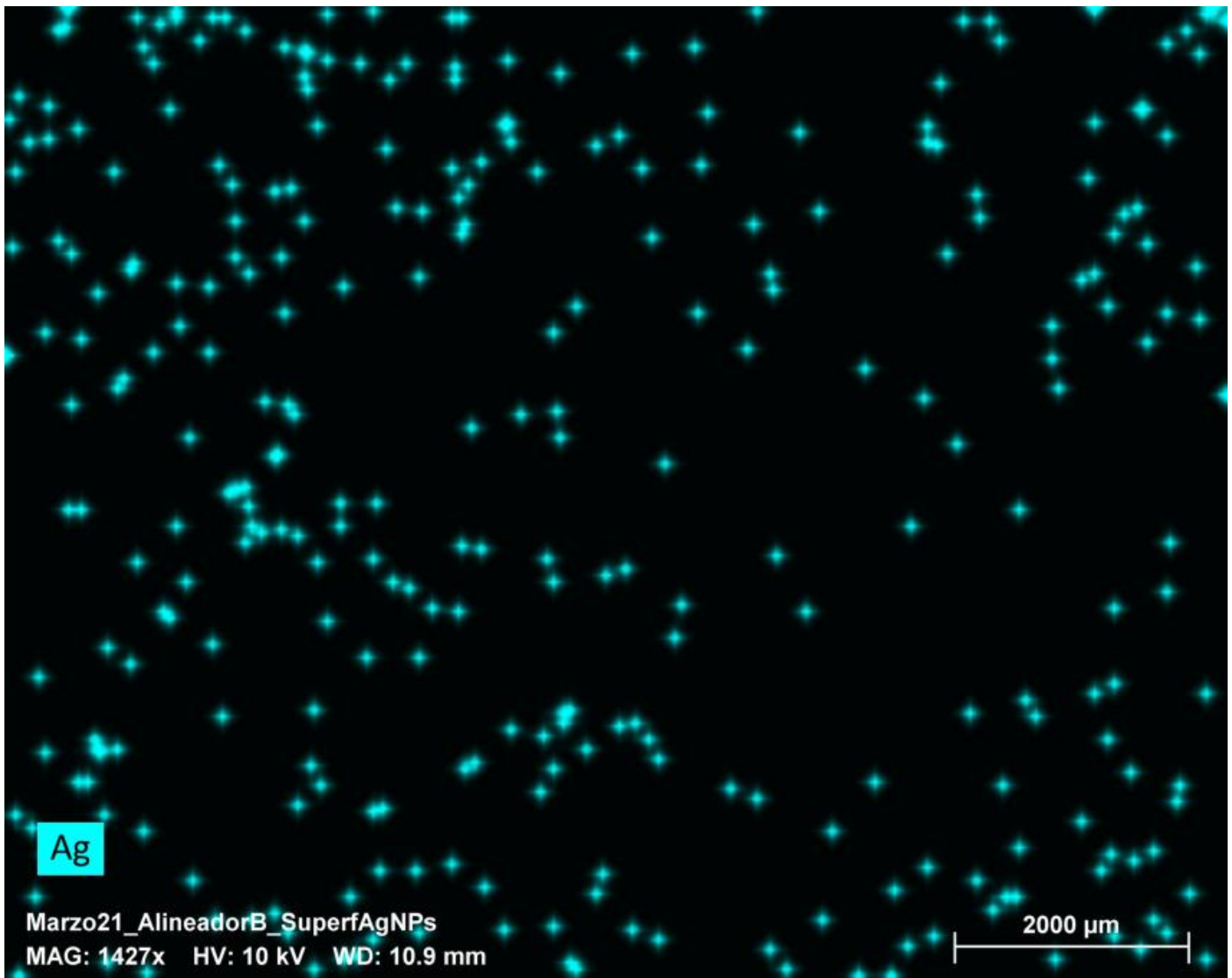
2000 μm



N

Marzo21_AlineadorB_SuperfAgNPs
MAG: 1427x HV: 10 kV WD: 10.9 mm

2000 μm



- **Análisis del efecto bactericida mediante potencial Z de la nanopartícula.**

En esta investigación, las nanopartículas de plata (AgNPs) sintetizadas presentaron un potencial Z de -13.3 mV, valor que indica una estabilidad coloidal moderada. Este resultado es relevante, ya que el potencial Z influye de manera directa en las propiedades bactericidas de las AgNPs, al modular su dispersión en el medio, su interacción con la membrana bacteriana y la liberación de iones Ag^+ (Franci et al., 2015; Bruna et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que los valores de potencial Z entre ± 15 y ± 30 mV proporcionan un equilibrio adecuado entre repulsión electrostática suficiente (para evitar agregación) y atracción efectiva hacia las bacterias, que poseen carga superficial negativa (Krychowiak-Maśnicka et al., 2024; Ferreyra Maillard et al., 2019). Aunque el valor de -13.3 mV se encuentra ligeramente por debajo del umbral ideal descrito para estabilidad alta (≈ -30 mV), aún representa un nivel funcional que permite una dispersión aceptable y la posibilidad de interacción electrostática con células bacterianas.

La carga superficial negativa favorece una interacción moderada con bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, y, si bien no promueve una adhesión tan fuerte como las AgNPs cargadas positivamente, permite que las nanopartículas penetren la matriz extracelular y se distribuyan eficientemente en el entorno bacteriano (Porcaro et al., 2016; Pokhrel et al., 2022). Además, este potencial Z ligeramente negativo facilita la liberación sostenida de iones Ag^+ , los cuales son considerados los principales agentes antimicrobianos a nivel intracelular (Li et al., 2017).

Krychowiak-Maśnicka et al. (2024) evaluaron distintas AgNPs con cargas que iban desde -50 mV hasta

+70 mV, y concluyeron que aquellas con potencial Z moderadamente negativo (~ -21.5 mV) fueron las que presentaron mayor eficacia bactericida. Aunque el valor obtenido en este estudio (-13.3 mV) es algo menor, se encuentra dentro de un rango funcional efectivo, especialmente cuando se considera que las AgNPs estarán embebidas en una matriz de poliuretano termoplástico (TPU) que puede limitar o controlar su agregación.

En este contexto, se espera que las AgNPs sintetizadas, al presentar un potencial Z negativo y tamaño inferior a 20 nm, mantengan una actividad antimicrobiana efectiva, tanto por interacción superficial como por liberación controlada de Ag^+ . Este efecto será particularmente relevante en el diseño del composite para alineadores ortodónticos, ya que la liberación prolongada de plata puede contribuir a mantener condiciones de higiene bucal óptimas durante el uso del dispositivo.

6. Resultados y discusión.

1. Caracterización de las nanopartículas de plata

1.1 Análisis por espectroscopía UV-Vis

El espectro UV-Vis mostró un pico de absorción máximo a 413 nm, característico de la resonancia de plasmones superficiales localizados (LSPR) de las nanopartículas de plata esféricas. Este valor sugiere un tamaño de partícula por debajo de los 20 nm, con una distribución de tamaño estrecha y homogénea. La simetría del pico y su intensidad apoyan la hipótesis de una síntesis controlada mediante microondas, en presencia de PVP como agente estabilizante.

1.2 Distribución de tamaño por DLS

Los análisis de dispersión de luz dinámica (DLS) arrojaron un tamaño hidrodinámico promedio de 15.2 nm y un índice de polidispersidad (PDI) de 0.241. Estos valores indican una distribución de tamaño adecuada para mantener una buena estabilidad coloidal, condición deseable para aplicaciones bactericidas en medios húmedos.

1.3 Potencial Z

Los valores de potencial Z obtenidos fueron 200.0 mV, -108.2 mV, y 38.2 mV, correspondientes a diferentes lotes de nanopartículas sintetizadas bajo condiciones variables. El valor de 200 mV representa un sistema con carga extremadamente alta, poco común en sistemas coloidales, que sugiere una repulsión electrostática muy elevada entre partículas, lo que podría evitar completamente la aglomeración, pero también limitar la interacción efectiva con superficies biológicas. El valor de -108.2 mV indica una estabilidad coloidal muy alta con carga negativa, lo cual favorece una buena dispersión, aunque puede generar repulsión con la membrana bacteriana (también negativa). Finalmente, el valor de 38.2 mV, dentro del rango funcional moderado (± 30 a ± 50 mV), sugiere un equilibrio más adecuado entre estabilidad y capacidad de interacción bacteriana. Estos resultados permiten evaluar la influencia de la carga superficial en la eficacia bactericida del sistema desarrollado.

2. Análisis del efecto bactericida mediante potencial Z de la nanopartícula

Los valores de potencial Z obtenidos permiten inferir distintos comportamientos electrocinéticos frente a bacterias. Las nanopartículas con -108.2 mV presentan una excelente estabilidad coloidal, lo que favorece su dispersión y evita aglomeración, pero pueden presentar repulsión con las bacterias, limitando la interacción directa. Por otro lado, las nanopartículas con 38.2 mV poseen una carga positiva moderada que puede facilitar la adhesión a la membrana bacteriana (negativamente cargada), promoviendo disrupción estructural y liberación localizada de iones Ag^+ . En contraste, el valor 200.0 mV es extremadamente alto y sugiere una posible sobrecarga superficial, lo que si bien previene completamente la agregación, podría generar pasivación o limitar el intercambio iónico. Por lo tanto, desde un punto de vista funcional, las nanopartículas con potencial Z de 38.2 mV representarían la formulación más favorable para aplicaciones bactericidas.

3. Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Dispersión de Energía (EDS)

El análisis morfológico mediante microscopía electrónica de barrido permitió observar y comparar la superficie de películas de TPU a diferentes concentraciones (10 %, 20 % y 30 %), así como la interacción y distribución de nanopartículas de plata (AgNPs) sintetizadas y aplicadas en diversos escenarios experimentales.

3.1 Películas de TPU sin AgNPs

Las micrografías obtenidas para las películas de TPU al 10 %, 20 % y 30 % mostraron una superficie rugosa e irregular, propia de una matriz polimérica amorfa sin aditivos conductores. A menor concentración de TPU, se evidenció una mayor homogeneidad superficial y menos acumulaciones o pliegues (Figuras correspondientes). Aumentos superiores revelaron zonas de acumulación morfológica posiblemente asociadas a la evaporación diferencial del DMF y la elasticidad del polímero.

En ningún caso se detectaron señales de Ag en los análisis EDS, confirmando la pureza del polímero en esta fase de caracterización base.

3.2 AgNPs en seco y en gota

La evaluación morfológica de las nanopartículas de plata sintetizadas durante 4 h y 10 min reveló diferencias notables en tamaño y agregación. Las imágenes SEM de AgNPs secas mostraron una distribución más densa y aglomerada en el experimento de 4 h, en contraste con las obtenidas tras 10 min de síntesis, donde las partículas aparecieron más pequeñas y dispersas. Lo anterior confirma que una menor duración del proceso de síntesis permite una mejor estabilización y menor crecimiento por coalescencia.

En fase líquida (gota), se observó una distribución más uniforme en ambas condiciones, con una notable mejora en la dispersión en la muestra de 10 min, atribuido a una menor densidad de nucleación y estabilización más eficiente por PVP.

3.3 Aplicación superficial de AgNPs con aerógrafo

La película delgada recubierta con 3 capas de solución de TPU/DMF/AgNPs mostró un patrón superficial irregular con zonas claras de agregación de nanopartículas. El análisis elemental por EDS confirmó la presencia de plata con un contenido de masa del 0.19 %, así como la existencia de carbono, oxígeno y nitrógeno como parte de la matriz TPU. El mapeo 2D mostró una distribución densa y heterogénea de Ag, con acumulaciones puntuales, lo cual sugiere una adsorción superficial ineficiente que favorece la aglomeración.

3.4 Alineadores comerciales recubiertos (A y B)

Los alineadores A y B modificados con el mismo tratamiento superficial reflejaron diferencias notables en la retención y dispersión de AgNPs. El alineador A mostró una morfología continua con zonas más densas de acumulación, y una señal de plata del 0.12 %, mientras que el alineador B presentó una superficie más cargada de carbono (91.59 %) y una mínima retención de plata (0.03 %).

El mapeo de elementos confirmó que la distribución de AgNPs fue más homogénea en el alineador A, mientras que en el B se observó una dispersión deficiente y escasa integración, probablemente debido a diferencias en la composición superficial del material base y su interacción con el disolvente y la plata.

3.5 AgNPs embebidas en matriz de TPU

Finalmente, al disolver la película de TPU en solución de AgNPs para obtener un compuesto con partículas embebidas, se observó una superficie más homogénea y sin acumulaciones visibles a nivel superficial. El análisis elemental reveló un incremento en la señal de Ag (0.48 %), lo cual, junto con el mapeo uniforme, confirma una distribución más eficiente y estable dentro de la matriz.

Este resultado sugiere que la estrategia de embeber las nanopartículas durante la conformación del material permite una integración más estable y prolongada de las mismas, lo que podría traducirse en una liberación más controlada y prolongada de iones Ag⁺.

7. Referencias bibliográficas.

1. Ashby, M., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design*. Elsevier.
2. Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2019). *The science and engineering of materials (7th ed.)*. Cengage Learning.
3. Bondarenko, O., Juganson, K., Ivask, A., Kasemets, K., Mortimer, M., & Kahru, A. (2013). Toxicity of Ag, CuO and ZnO nanoparticles to selected environmentally relevant test organisms and mammalian cells in vitro: A critical review. *Archives of Toxicology*, 87(7), 1181–1200. <https://doi.org/10.1007/s00204-013-1079-4>
4. Bruna, T., Maldonado-Bravo, F., Jara, P., & Caro, N. (2021). Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>
5. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
6. Cheng, Z., et al. (2019). Evolution of nanotechnology: From Feynman's vision to modern applications. *Journal of Nanoscience Research*, 17(4), 123–137.
7. Ferreyra Maillard, A. P. V., Rivas Morales, C., & Tapia, C. (2019). Studies on interaction of green silver nanoparticles with whole bacteria by surface characterization techniques. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1861(6), 1086–1092. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2019.03.011>
8. Franci, G., Falanga, A., Galdiero, S., Palomba, L., Rai, M., Morelli, G., & Galdiero, M. (2015). Silver nanoparticles as potential antibacterial agents. *Molecules*, 20(5), 8856–8874. <https://doi.org/10.3390/molecules20058856>
9. Fried, J. R. (2014). *Polymer science and technology (3rd ed.)*. Prentice Hall.
10. García, M., et al. (2016). Recent advances in nanotechnology applications in medicine and dentistry. *International Journal of Nanomedicine*, 11, 7457–7472.
11. ISO/TS 80004-1:2015. *Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms*. International Organization for Standardization.
12. Krychowiak-Maśnicka, M., Łubkowska, B., Kacprzak, M., & Sienkiewicz, A. (2024). The substantial role of cell and nanoparticle surface properties in the antibacterial potential of spherical silver nanoparticles. *Nanotechnology, Science and Applications*, 17, 227–242. <https://doi.org/10.2147/NSA.S489407>
13. Lee, D., & Kim, H. (2017). Nanoparticles: Properties, synthesis, and biomedical applications. *Advanced Materials Science*, 24(3), 234–250.
14. Li, W. R., Xie, X. B., Shi, Q. S., Zeng, H. Y., Ou-Yang, Y. S., & Chen, Y. B. (2017). Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles against multidrug-resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 2511–2523. <https://doi.org/10.2147/IJN.S131226>
15. Martínez, L., et al. (2020). Biomaterials in healthcare: Recent innovations and future perspectives. *Materials Science in Medicine*, 28(7), 887–903.
16. Pelaz, B., Alexiou, C., Alvarez-Puebla, R. A., Alves, F., Andrews, A. M., Ashraf, S., ... & Parak, W. J. (2017). Diverse applications of nanomedicine. *ACS Nano*, 11(3), 2313–2381. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b06040>
17. Pokhrel, L. R., Ramalingam, B., Sani, D., Liu, X., & Murdock, R. C. (2022). Five nanometer size highly positive silver nanoparticles are bactericidal targeting cell wall and adherent fimbriae expression. *Scientific Reports*, 12, 6729. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10778-9>
18. Porcaro, F., Carloni, P., Tabocchini, M. A., & Amato, J. (2016). Synthesis and structural characterization of silver nanoparticles stabilized with 3-mercapto-1-propanesulfonate and 1-thioglucoose mixed thiols for antibacterial applications. *Materials*, 9(12), 1028. <https://doi.org/10.3390/ma9121028>
19. Rahaman, M. N. (2017). *Ceramic processing and sintering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315120922>
20. Rai, M., Deshmukh, S. D., Ingle, A. P., Gade, A. K., & González García, Y. (2016). Silver nanoparticles: The powerful nanoweapon against multidrug-resistant bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 120(5), 1174–1187. <https://doi.org/10.1111/jam.13014>
21. Rodríguez, A., et al. (2019). Silver nanoparticles in biomedical applications: Mechanisms and recent advances. *Journal of*

Biomedical Nanotechnology, 15(5), 1012–1025.

22. Santos, F., et al. (2021). Development of silver nanoparticle-enhanced polyurethane composites for orthodontic applications. *Journal of Dental Materials*, 35(8), 1203–1211.
23. Shackelford, J. F. (2016). *Introduction to materials science for engineers* (8th ed.). Pearson.
24. Smith, J., et al. (2018). Fundamentals of nanoscience: Definitions and scope. *Nanoscience Journal*, 12(2), 45–60.