

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

**FABRICATION AND OPTICAL CHARACTERIZATION
OF HYBRID PLASMONIC AND PHOTONIC
MULTILAYER STRUCTURES**

Proyecto de investigación

Orlando Vinicio Gutiérrez Proaño

Director de tesis: Melissa Infusino, Ph.D

Co-director de tesis: Antonio de Luca, Ph.D

Maestría en Física

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magíster en Física

Quito, Diciembre 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

Hoja de calificación de trabajo de titulación

**Fabrication and Optical Characterization of Hybrid
Plasmonic and Photonic Multilayer Structure**

Orlando Vinicio Gutiérrez Proaño

Nombre del director de tesis:

Melissa Infusino, Ph.D

Calificación:

Firma:

TeX online

Diciembre 2023

Derechos de autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Orlando Vinicio Gutiérrez Proaño

Código:

00325188

Cédula de identidad:

1719929398

Lugar y fecha:

Quito Diciembre del 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a mis padres que siempre me han brindado apoyo en todo momento. En segundo lugar agradezco a mi tutora de Tesis Melissa Infusino y Alessandro Veltri por su dedicación y paciencia en todo el desarrollo de proyecto. Además agradezco a la Universidad San Francisco de Quito por haberme dado la oportunidad de realizar la maestría en física orientado a la óptica experimental. Y finalmente agradezco a la Universidad de la Calabria, en especial al profesor Antonio de Luca por haberme prestado las instalaciones de laboratorio para la realización experimental de mi proyecto de investigación.

Resumen

En las últimas décadas el plagio o robo de información de la propiedad intelectual ha sido de gran interés debido a su gran incremento, por lo que, se hace necesario la introducción de métodos nuevos y más eficientes para generar claves criptográficas o identificadores únicos de protección. Un interesante abordaje al problema es el uso de funciones físicas no clonables, en inglés Physical Unclonable Functions (PUF's), cuya característica principal es su naturaleza aleatoria intrínseca, que deriva del proceso de fabricación específico, por lo que es imposible volverlas a reproducir y por tanto son candidatas idóneas para la protección de la propiedad intelectual[1].

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo principal la fabricación y la caracterización de estructuras híbridas fotónicas/plasmónicas para ser utilizadas como PUF's. Las estructuras consisten en cavidades resonantes, tipo Fabry-Perot, realizadas mediante capas alternas de metal y aislante, conocidas en literatura como cavidades MIM (Metal-Insulator-Metal). El layer metálico superior es incompleto, contrariamente a lo normal, siendo formado por una distribución aleatoria de nanoislas plasmónicas de plata (Ag). 1.3.1 . Esta disposición de capas tiene la característica de crear cavidades de Fabry-Perot lo cual contribuye a la respuesta cromática debido a la interacción de los modos fotónicos con los modos plasmónicos de las nanoislas de Ag[1].

En este trabajo de tesis se describen en detalles las diferentes etapas del proceso de fabricación: desde la preparación de los sustratos de vidrio 2.1, hasta la deposición de las diferentes capas de la estructura multi-estrato por pulverización catódica con magnetrón con la máquina de Sputtering 2.2).

Además las propiedades ópticas y cromáticas de las estructuras son oportunamente caracterizadas mediante ellipsometría espectroscópica. La reflectancia en polarización s y p , que es posible medir por medio del ellipsómetro, puede ser interpretada como una primera firma espectral que identifica cada una de las estructuras. Mientras, para la caracterización del color, que es un identificador adicional, se utilizó la convolución de las reflectancias p y s y un espacio de color oportuno para su catalogación.

La morfología única de las estructuras es caracterizada por medio de un microscopio de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) y de la microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés).

Con el fin de poder describir la reflectancia y la transmitancia de las estructuras fabricadas se realizó modelos electromagnéticos basado en la teoría de medio efectivo. Para optimizar la descripción de la constante dieléctrica eficaz del último layer o capa (formado por una distribución aleatoria de nano-islas), se consideraron diferentes versiones de la Aproximación de Maxwell Garnett: Maxwell Garnett clásica, Maxwell Garnett Mie y Maxwell Garnett Mie Mejorado(sección 1.9.1)[2].

Abstract

In recent decades, plagiarism or theft of intellectual property information has been of great interest due to its great increase, therefore, it is necessary to create new structures that protect intellectual property, these structures are known as functions. non-clonable physics (PUF's) and their main characteristic is their random and intrinsic nature of manufacturing, making it impossible to reproduce them again and therefore they are ideal candidates for intellectual property protection[1].

The main objective of this research work is the manufacture and characterization of hybrid photonic/plasmonic structures to be used as PUFs. The structures consist of resonant cavities, Fabry-Perot type, made by alternating layers of metal and insulator, known in literature as MIM (Metal-Insulator-Metal) cavities. The upper metallic layer is incomplete, contrary to normal, being formed by a random distribution of plasmonic silver (Ag) nanoislands. 1.3.1 . This arrangement of layers has the characteristic of creating Fabry-Perot cavities which contributes to the chromatic response due to the interaction of the photonic modes with the plasmonic modes of the Ag[1] nanoislands.

In this thesis work, the different stages of the manufacturing process are described in detail: from the preparation of the glass substrates 2.1, to the deposition of the different layers of the multi-layer structure by magnetron sputtering with the Sputtering machine 2.2).

Furthermore, the optical and chromatic properties of the structures are appropriately characterized by spectroscopic ellipsometry. The reflectance in s and p polarization, which can be measured using the ellipsometer, can be interpreted as a first spectral signature that identifies each of the structures. Meanwhile, for the characterization of color, which is an additional identifier, the convolution of the reflectances p and s and a color space appropriate for cataloging were used. The unique morphology of the structures is characterized by means of atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM).

In order to be able to describe the reflectance and transmittance of the manufactured structures, electromagnetic models were carried out based on the theory of effective medium. To optimize the description of the effective dielectric constant of the last layer (formed by a random distribution of nano-islands), different versions of the Maxwell Garnett Approximation were considered: classical Maxwell Garnett, Maxwell Garnett Mie and Maxwell Garnett Mie Improved(section 1.9.1)[2].

Índice general

Resumen	5
Abstract	7
1 Introducción	11
1.1 Motivación	11
1.2 Funciones Físicas No-Clonables (PUF's)	12
1.2.1 PUF's Ópticas	13
1.3 Nanopartículas Plasmónicas Metálicas	14
1.3.1 Sistema Híbrido como PUF de tres Niveles	15
1.4 Espacio de Color	18
1.4.1 CIE 1931	18
1.4.2 CIELAB	19
1.5 Elipsometría	20
1.6 Espectroscopía de Fuerza Atómica (AFM)	21
1.7 Espectroscopía Electrónica de Barrido (SEM)	23
1.8 Interferómetro de Fabry-Perot	25
1.9 Teorías de Medios Efectivos	27
1.9.1 Modelo de Maxwell Garnett Clásico	30
1.9.2 Modelo de Maxwell Garnett Mie	31
1.9.3 Modelo de Maxwell Garnett Modificado	32
2 Fabricación y Caracterización Experimental de las Estructuras	33
2.1 Preparación de Laminillas de vidrio	33
2.2 Fabricación de Estructuras Multicapa por Pulverización Catódica con Magnetrón de Corriente Continua(DC) y de Radio Frecuencia(RF)	37
2.3 Caracterización de las Estructuras	44
2.3.1 Espectroscopía Elipsométrica	44
2.3.2 Modelos de Ajuste	46
2.3.3 Microscopía de Fuerza Atómica	48
2.3.4 Microscopía Electrónica de Barrido	48

2.3.5	Caracterización Mediante el espacio de color CIE 1931	49
2.3.6	Software de Reconocimiento	50
3	Resultados Obtenidos	52
3.1	Muestras Obtenidas por Pulverización Catódica con Magnetron de Corriente Continua (CC) y Radio Frecuencia(RF)	52
3.2	Resultados Obtenidos por Espectroscopía Elipsométrica	65
3.3	Resultados Obtenidos por Microscopía de Fuerza Atómica	89
3.4	Resultados Obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	102
3.5	Análisis de Reconocimiento	108
3.6	Resultados Obtenidos por Caracterización Mediante el espacio de color CIE 1931	120
4	Teorías de Medios Efectivos	141
4.1	Modelo de Maxwell Garnett Clásico	144
4.2	Modelo de Maxwell Garnett Mie	146
4.3	Modelo de Maxwell Garnett Mie Mejorado	148
4.4	Discusión de Resultados	150
5	CONCLUSIONES	151
6	RECOMENDACIONES	153
	Anexos	157

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La propiedad intelectual de mercancías tecnológicas es uno de los principales contribuyentes en la economía de un país . Lastimosamente, en los últimos años ha surgido un incremento considerable en el robo o plagio de la propiedad intelectual lo cual ha generado pérdidas económicas importantes. La necesidad de mecanismos eficaces para proteger la propiedad intelectual se ha hecho más y más apremiante. Un estudio realizado en el 2013 denominado "El impacto Económico de la Falsificación y la Piratería" ([3]) muestra que la falsificación de la propiedad intelectual representó el 2.5% del comercio mundial. Y a finales del año 2019, un estudio denominado "Tendencias en el Comercio de Mercancías Falsificadas y Piratas" ([1])mostró un alza al 3.3%. Estos estudios muestran claramente un incremento en la falsificación de las propiedades intelectuales. La exacerbación de este problema ha sido una fuerte motivación para el estudio de nuevas funciones físicas no clonables (PUF's, por sus siglas en inglés). En la literatura con la siglas PUF's se indican también los dispositivos caracterizados por funciones o

propiedades físicas no clonables y esta es la definición que será usada a lo largo del proyecto de investigación. A menudo los procesos de micro y nano-fabricación de las PUFs producen resultados intrínsecamente randomicos que pueden ser usados para generar claves únicas o huellas de identificación.

El trabajo de investigación en cuestión se enfoca en la exploración de las propiedades de superficies metálicas noestructuradas en un sistema híbrido diseñado para ser una PUF fuerte de tres niveles (cromático, espectral y morfológico), las cuales servirán para proteger las propiedades intelectuales y disminuir el porcentaje de mercancías falsificadas que actualmente estan al alza [1].

1.2 Funciones Físicas No-Clonables (PUF's)

Una función física no-clonable (PUF) es un dispositivo cuya estructura interna manifiesta aleatoriedad inherente introducida durante su fabricación, esta aleatoriedad se la caracteriza mediante un proceso físico en particular, lo cual conlleva a la creación de una "huella digital" que tiene una respuesta única e imposible de clonar para los usuarios, los falsificadores e incluso para el propio fabricante original del PUF a un desafío específico. Los PUF's tienen una variedad de aplicaciones, como: la lucha contra la falsificación, la identificación, la autenticación, la generación de claves, entre otros [1],[4]. Existen numerosos PUF's de distinta naturaleza como son: biológicos, nanocables de Ag aleatorios, puntos cuánticos impresos por inyección de tinta y los PUF's ópticos. Este último, es de interés en el trabajo de investigación debido a que se enfoca en la interacción de la luz con la materia [1].

1.2.1 PUF's Ópticas

Las funciones físicas no-clonables ópticas se basan principalmente en la interacción de la luz con la materia, de la misma manera poseen variaciones aleatorias inherentes introducidas en su procesos de fabricación. Para verificar que la PUF óptica es viable se introduce un proceso conocido como pares desafío-respuesta (CRP, por sus siglas en inglés) el cual consiste en poner a prueba las PUF's con distintos desafíos. Un ejemplo sería, encontrar la morfología de una muestra mediante la microscopia electrónica de barrido, en este caso, el desafío es el haz de electrones que inciden en la muestra y la respuesta sería la morfología de la muestra. Si la respuesta tiene una disposición aleatoria entonces sería candidata para ser usada como PUF óptica. Si por el contrario, la respuesta obtenida tiene una disposición homogénea y predecible, ésta sería descartada y se la llamaría falso positivo. En la Figura 1.1 se observa un bosquejo de una PUF óptica[4].

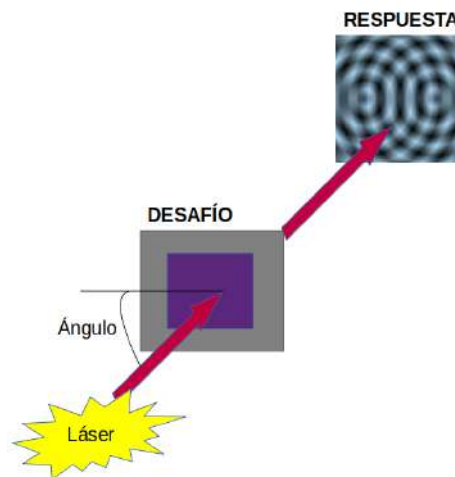


Figure 1.1: Se observa la representación básica de un PUF óptico, bajo la iluminación de un láser con un ángulo de inclinación dado y se observa un patrón de interferencia. El ángulo de incidencia con el láser se trata como desafío, mientras que el patrón de interferencia en la pantalla es la respuesta.

Además, según la cantidad de pares desafío-respuesta, una PUF se puede categorizar como "débil" o "fuerte"[1]. En nuestro caso de estudio nos centraremos en las PUF's fuertes las cuales tienen la característica de tener tres niveles de seguridad que son:

1. Nivel 1: Cromático
2. Nivel 2: Espectral
3. Nivel 3: Morfológico

Para cada uno de los niveles se darán una breve descripción en la sección 1.3.1.

1.3 Nanopartículas Plasmónicas Metálicas

Las nanopartículas (NPs) metálicas son de gran interés para aplicaciones como la nanobiotecnología, biomedicina y para la fabricación de PUF's Ópticas (en nuestro caso es la fabricación de nano-islas plasmónicas) debido a sus propiedades ópticas relacionadas con la resonancia de plasmones de superficie localizados[5]. En nuestro caso en particular, hacemos énfasis en la interacción entre los modos plasmónicos de las nano-islas de Ag y los modos fotónicos o también llamados modos de cavidad de Fabry-Perot. Éste último se van a tratar en la sección 1.8. Tal interacción dota a las estructuras metal-dieléctrico-nanoislas (Sistema Híbrido de tres niveles) de una respuesta cromática variada la cual se la puede caracterizar mediante en el espacio de color CIE 1931[1].

1.3.1 Sistema Híbrido como PUF de tres Niveles

El sistema híbrido, objeto de este estudio, es un resonador MIM (desde el acrónimo inglés: Metal-Insulator-Metal) formado por dos estratos metálicos, de plata (Ag) en nuestro caso, separados por una capa dieléctrica de (ITO, óxido de Indio Titanio). Su esquemático se muestra en la figura 1.2. La capa superior es formada por nano-islas de Ag, las cuales se fabricaron mediante la técnica de pulverización catódica con mangentrón de corriente continua(CC). Este método será explicado con mayor detenimiento más adelante en la sección 2.2 .

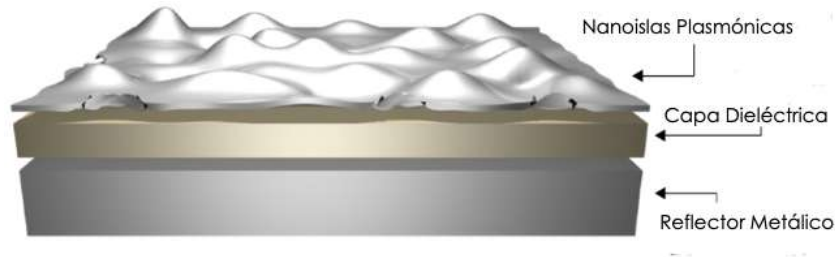


Figure 1.2: Esquema General de una PUF plasmónica [1].

Esta estructura general consta de los tres niveles de seguridad para ser considerada una PUF fuerte. A continuación, se describen brevemente cada uno de los niveles de seguridad presentes en la estructura descrita anteriormente.

- **Nivel 1: Respuesta Cromática**

El acoplamiento entre modos plasmónicos y fotónicos origina colores únicos. La cromaticidad se caracteriza en espacios de colores, en esta investigación se utilizará el espacio de color CIE 1931. En la sección 1.4.1 se detalla de mejor manera este espacio de color.

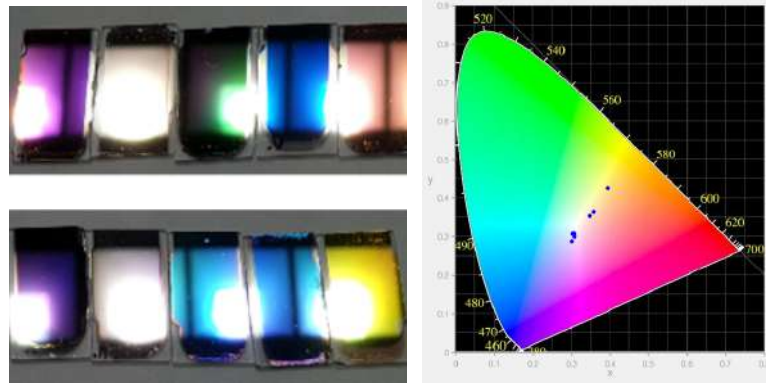


Figure 1.3: En parte izquierda se observa el efecto cromático y de luminosidad. Y en la parte derecha se observa la caracterización del color en el espacio CIE 1931, que corresponde a la respuesta cromática de Nivel 1.[1].

- **Nivel 2: Respuesta Espectral**

La respuesta espectral se realiza por medio de un instrumento espectroscópico llamado Elipsómetro, el cual nos da información sobre la Reflectancia, Transmitancia, índice de refracción y espesor de la capa, entre otras cantidades de la óptica física. En la sección 1.5 se detalla los principios básicos de un Elipsómetro.

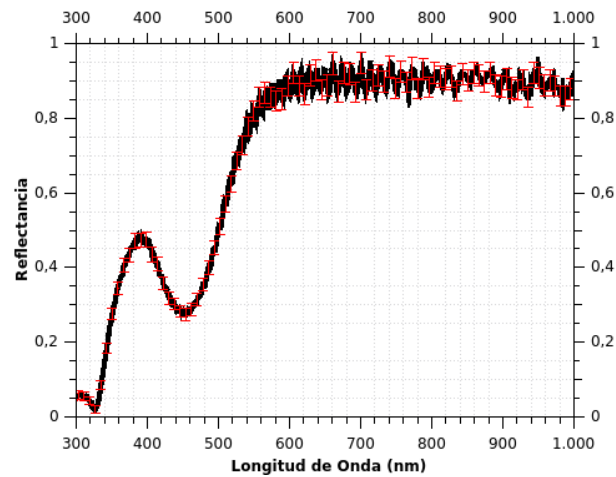


Figure 1.4: Respuesta espectral típica de una muestra que se asemeja a la arquitectura mostrada en la figura 1.2, constituye la firma espectral de Nivel 2.

- **Nivel 3: Respuesta Morfológica**

La morfología de las estructuras se la realiza por medio de espectroscopía de fuerza atómica (AFM) y espectroscopía electrónica de barrido (SEM), las cuales se detallan el principio básico en la sección 1.6 y 1.7.

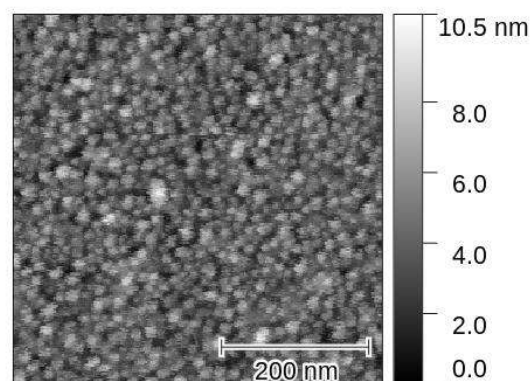


Figure 1.5: Respuesta morfológica de nano-islas de Ag mostrada a través del análisis AFM. Constituye una firma morfológica de Nivel 3.

1.4 Espacio de Color

En la actualidad existen varios espacios de color capaces de caracterizar cuantitativamente las longitudes de onda del espectro electromagnético visible y colores percibidos fisiológicamente por el ojo humano. Los espacios de color CIE 1931 Y CIELAB son los más comunes para la caracterización del color. En esta investigación se va a utilizar el espacio de color más antiguo el cual es el CIE 1931.

1.4.1 CIE 1931

El espacio de color CIE 1931 fue uno de los primero espacios de color definidos matemáticamente por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) en 1931. Es el resultado de una serie de experimentos realizados a finales de la década de 1920 por William David Wright y John Guild. Con él se definieron con precisión los tres colores primarios de la síntesis aditiva del color, a partir de los cuales se pueden crear los demás colores. Este diagrama de cromaticidad CIE 1931 representa todos los colores que el ojo humano es capaz de percibir [6].

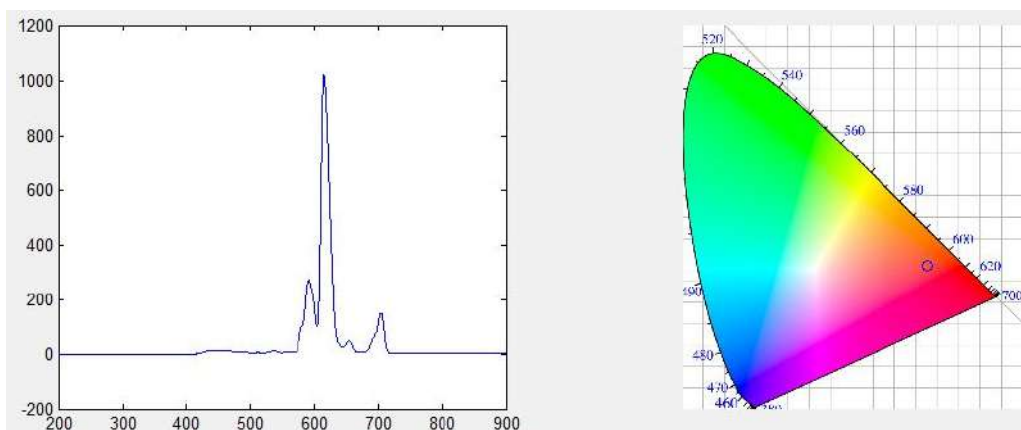


Figure 1.6: Espectro de reflectancia y Espacio de color CIE 1931

1.4.2 CIELAB

El espacio de color CIELAB es uno de los espacios de color más populares y usado actualmente para evaluar el color de un objeto de la siguiente manera: la luminosidad se representa con la letra L , la coordenada cromática rojo/verde se representa con la letra A y la coordenada amarillo/azul se representa con la letra B . En la figura 1.7 se observa de un ejemplo típico del espacio de color CIELAB [7].

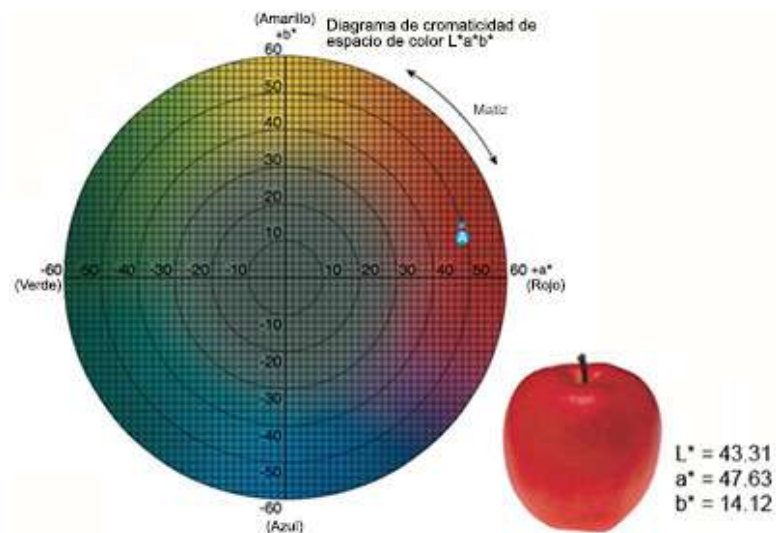


Figure 1.7: Espacio de color CIELAB caracterizando el color de una manzana[7]

Para el cálculo correcto de las coordenadas para los espacios de color se necesita el uso de instrumentos de medición de color como son: espectrofotómetros y colorímetros, que son capaces de cuantificar el color fácilmente. Pero en nuestro caso se va a determinar las coordenadas mediante un código escrito en el software Matlab el cual determina las coordenadas cromáticas deseadas del espacio de color CIE 1931.

1.5 Elipsometría

La elipsometría es una técnica espectroscópica muy sensible, la cual utiliza una luz polarizada para caracterizar películas delgadas, superficies y microestructuras de materiales. Dicha técnica es no destructiva la cual es idónea para la determinación de anchos de películas delgadas y constantes ópticas (en los rangos de UV, visible e Infrarrojo) [8]. La elipsometría mide el cambio en el estado de polarización de la luz reflejada (o transmitida a través) de la superficie de una muestra. Sin embargo, las mediciones elipsométricas suelen realizarse para describir un "sistema óptico" que modifica el estado de polarización de un haz de luz (en nuestro caso, el sistema óptico son muestras de más de dos capas fabricadas con pulverización catódica con magnetron). Además, otros valores medidos por el elipsómetro son los ángulos elipsométricos Ψ y Δ , éstos se relacionan con los coeficientes de refracción de Fresnel R_p y R_s para las dos polarizaciones de la luz (p y s), mediante la siguiente relación,[8]:

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \tan(\Psi) \exp^{i\Delta} \quad (1.1)$$

Debido a que la elipsometría mide la proporción de dos valores como se observó en la ecuación (1.1), puede ser muy precisa y muy reproducible. Como la relación es un número complejo, también contiene información de "fase" (Δ), lo que hace que la medición sea muy sensible[8].

Las principales medidas que se pueden obtener del elipsómetro se listan a continuación:

1. Constantes Ópticas ($n, k_0, \epsilon_1, \epsilon_2$)
2. Grosor de las estructuras fabricadas, sean simples o compuestas.
3. Concentración de dopaje.
4. Cristalinidad.

5. Anisotropía Óptica.

Éstas variables y constantes se las puede encontrar con el software propio del Elipsómetro llamado (WVASE)[9], el cual consta de muchas funciones de interpolación de resultados para diferentes modelos, los cuales han sido implementados en el software. La siguiente figura 1.8 muestra el mecanismo con el cual el software trabaja:

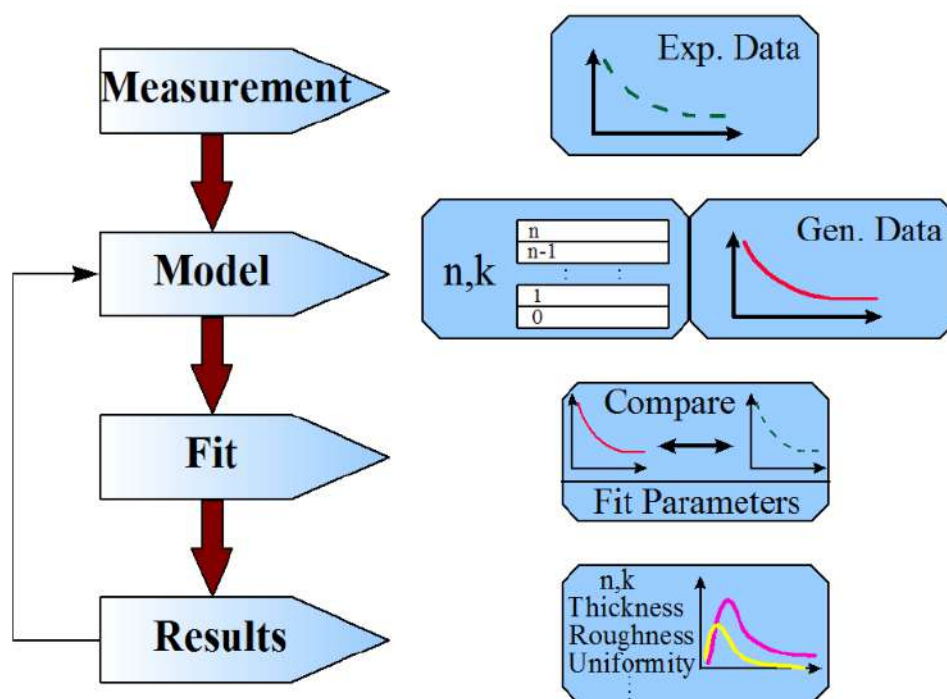


Figure 1.8: Esquema del procedimiento básico utilizado en mediciones de elipsometría para determinar las propiedades de los materiales a partir de datos experimentales [8].

1.6 Espectroscopía de Fuerza Atómica (AFM)

La Microscopía de Fuerza Atómica (por sus siglas en inglés, AFM) es una técnica que utiliza la combinación de los principios del microscopio de efecto tunel y del perfilómetro de aguja, para obtener imágenes de alta resolución. Esta técnica fue demostrada por G.Binnig, C.F.Quate y

CH.Gerber en 1985. Desde entonces, esta técnica se ha convertido en una poderosa herramienta de medición de la morfología de superficies y de sus propiedades físicas como son: eléctricas, magnéticas, químicas, ópticas, mecánicas, etc, de la superficie. Esta técnica es no invasiva y no destructiva lo cual la hace muy precisa ya sea si se la mide en aire, líquidos o en alto vacío. [10]. La microscopía de fuerza atómica (AFM) consta de una punta especial afilada la cual esta generalmente rematada con un vértice de tamaño nanométrico unido al extremo libre de un voladizo blando como se observa en la Figura 1.9. El principio de funcionamiento es controlar las fuerzas que actúan entre la punta y la superficie de la muestra. Las fuerzas de interacción punta-muestra hacen que el voladizo se desvíe, lo que posteriormente se registra mediante un rayo láser que se enfoca en el extremo libre del voladizo donde se encuentra un espejo y por consiguiente se refleja en un fotodiodo sensible a la posición. La deflexión del voladizo, d , es directamente proporcional a la fuerza, F , que actúa entre la punta y la muestra, a través de la relación $F = -k * d$, siendo k la constante elástica del voladizo. Un escáner piezoeléctrico que mueve el voladizo o la muestra permite que la punta escanee la superficie de la muestra en direcciones x e y , mientras que un circuito de retroalimentación entre la desviación del voladizo z y el piezo permite controlar la posición precisa de la punta y la fuerza aplicada [11]. La resolución de la técnica es de aproximadamente menos de 1 Angstrom en vertical y de menos de 30 Angstroms en lateral, lo cual nos indica que esta técnica es factible para calcular no solo fuerzas interatómicas sino fuerzas eléctricas [10].

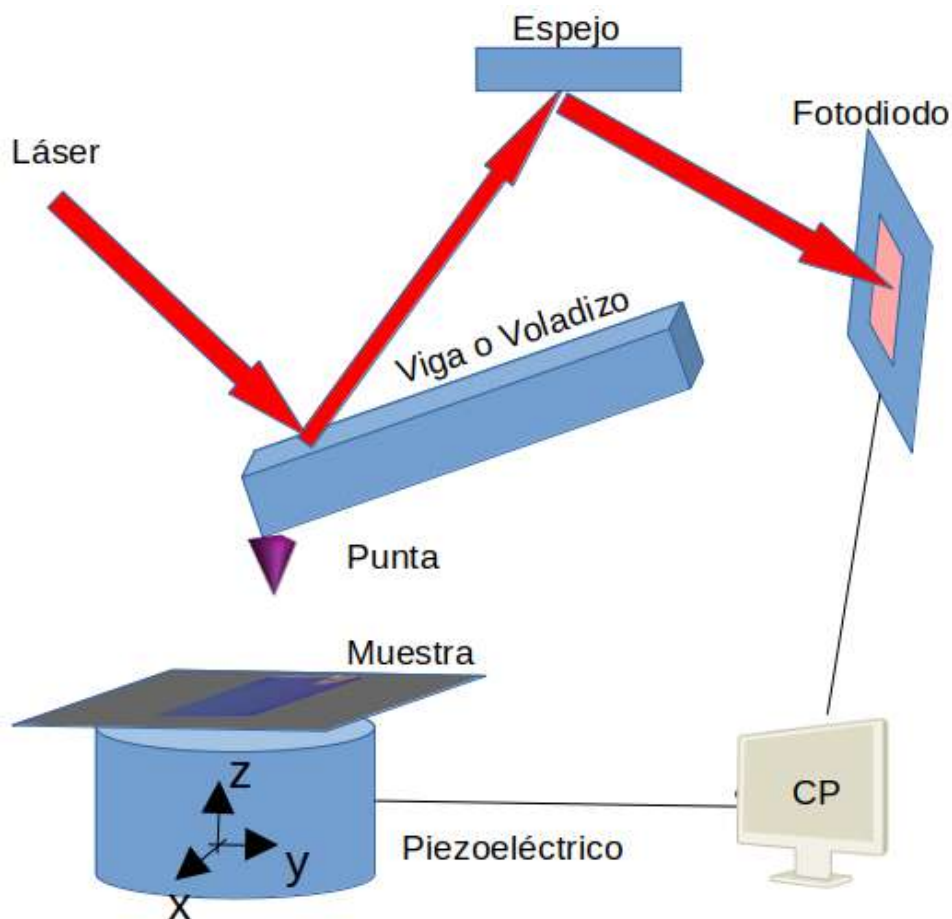


Figure 1.9: Bosquejo básico de las partes y funcionamiento de un AFM

1.7 Espectroscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (con sus siglas en inglés, SEM) es una de las técnicas espectroscópicas más utilizadas actualmente para la caracterización de superficies de materiales, como por ejemplo la morfología de películas delgadas de minerales, o en nuestro caso en particular la morfología de estructuras híbridas plasmónicas fotónicas compuestas de más de una capa o layer (nanoislas, ito y metal)[12]. La microscopía electrónica de barrido es una

técnica de muy alta resolución debido a su principio de funcionamiento, el cual utiliza como herramienta principal un haz de electrones (cuyo diámetro está aproximadamente entre 4 nm y 200 nm) los cuales realizan un barrido sobre la superficie de la muestra, los electrones provenientes del haz interactúan con los electrones presentes en la superficie de la muestra, como se observa en la figura 1.10 [13].

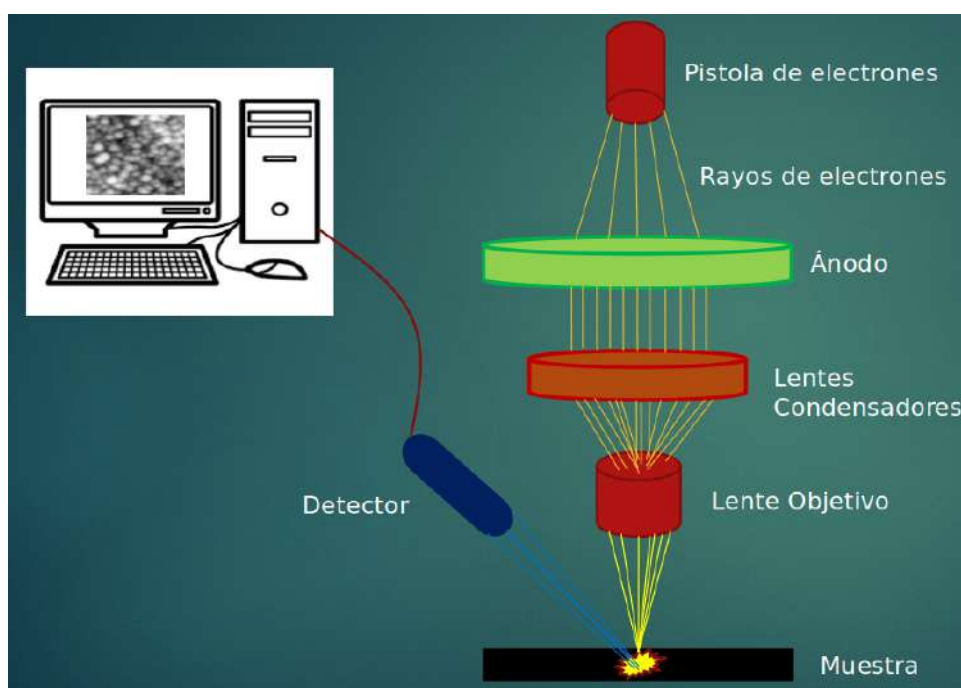


Figure 1.10: Esquema de un microscopio electrónico de barrido convencional

De esta interacción resultan varios tipos de electrones: electrones restrodispersados, electrones Auger, electrones secundarios, electrones absorbidos, electrones dispersados elásticamente, electrones dispersados inelásticamente y electrones transmitidos inelásticamente (ver figura 1.11) [13].

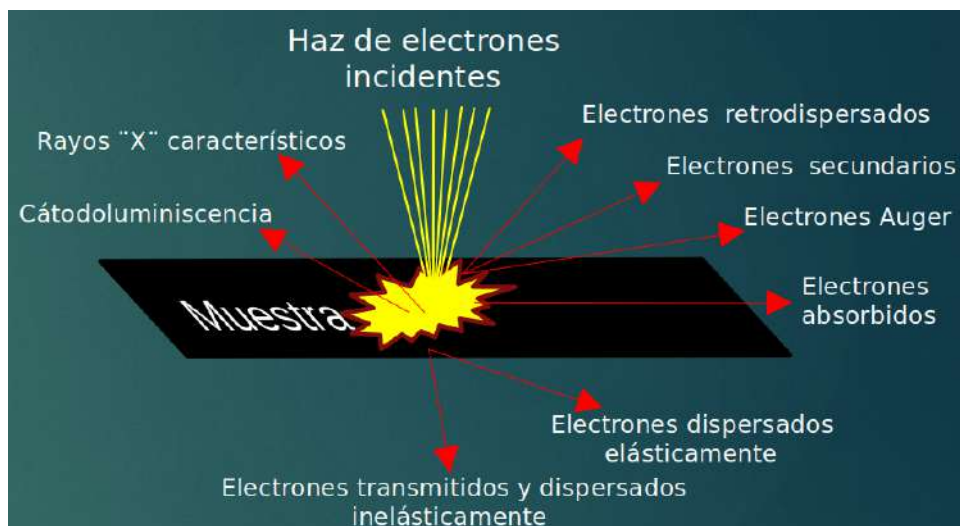


Figure 1.11: Esquema de los electrones producidos en la interacción del haz de electrones con la muestra a estudiar

De estos tipos de electrones generados por la interacción, los más importantes son los electrones secundarios debido a que provienen de la banda de conducción de la muestra por lo que están más próximos al haz incidente, por lo tanto, van a generar una mejor resolución[14]. La resolución de la técnica es de aproximadamente de 3 a 4 nanómetros de resolución (es decir, va de $10x$ a $300000x$), lo cual se puede observar a las proteínas que tienen un tamaño aproximado de $10nm$ [13].

1.8 Interferómetro de Fabry-Perot

La óptica actual cuenta con sistemas de comunicación modernos, los cuales son capaces de discriminar o seleccionar determinados rangos de frecuencias ópticas ν (o longitudes de onda λ) para mejorar su eficiencia[15]. Para lograrlo, se tiene el uso de Cavidades de Fabry-Perot, las cuales se descubrieron en la década de 1890, por Charles Fabry. Él se dió cuenta que al usar una interfáz doble se podía distinguir entre dos longitudes de onda de luz que se encontraban muy

cercanas entre sí. Él y Alfred Perot construyeron el instrumento Fabry-Perot, el cual consta de una fuente monocromática, dos superficies idénticas planas de alta reflectancia (paralelas entre sí) y separadas una distancia d , que dejan pasar una cantidad de rayos paralelos por transmisión. Además, cuenta con una lente convergente que sirve para direccionar los rayos transmitidos y puedan interferir entre ellas. Las interferencias ocurridas dependen del índice de refracción n de la cavidad, del espesor de la cavidad d y del ángulo del rayo de incidencia θ , como se muestra en la Figura 1.12 [15],[16].

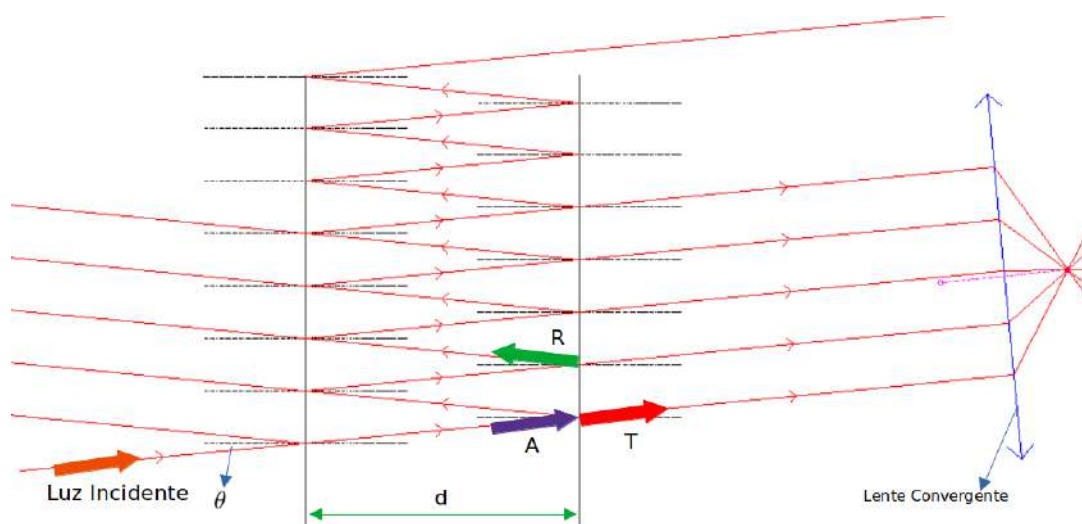


Figure 1.12: Esquema básico de Fabry-Perot

Cuando la distancia d es variable el instrumento se llama interferómetro de Fabry-Perot, en cambio, si la distancia d es fija pero se varía el ángulo de incidencia, el instrumento se llama etalon de Fabry-Perot. La transmisión a través del instrumento depende del espesor de la cavidad d , la reflectancia entre los dos espejos R y la longitud de onda de la luz incidente $\lambda_{incidente}$. [16]

La transmitancia a través de una interfaz doble viene dada por la siguiente expresión:

$$T^{tot} = \frac{T^{max}}{1 + F * \sin^2(\Phi/2)} \quad (1.2)$$

En nuestro caso la reflectancia y transmitancia son iguales debido a que los espejos son idénticos. Donde T^{max} y F se definen como:

$$T^{max} = \frac{T^2}{(1 - R^2)^2}$$

$$F = \frac{4R}{(1 - R^2)}$$

El valor de Φ depende de la distancia d , θ y la longitud de onda λ_{vac} , se relacionan de la siguiente manera:

$$\Phi = \frac{4\pi n_1 d}{\lambda_{vac}} \cos \theta + 2\psi_r \quad (1.3)$$

Las cavidades de Fabry-Perot o también conocidos como resonadores ópticos se utilizan comúnmente para mediciones de distancia y frecuencia de alta precisión. En la actualidad las cavidades de Fabry-Perot se están empleando para detectar ondas gravitacionales cósmicas [17].

1.9 Teorías de Medios Efectivos

La idea principal de la investigación es la fabricación de estructuras con diferentes capas o layers superpuestas como se mostró en la figura 1.2, la cual supone cierta homogeneidad en las primeras dos capas. Sin embargo, la capa más externa es formada por una distribución de nano-islas de Ag de diferente forma y tamaño. Para poder determinar las propiedades ópticas es importante modelar oportunamente la constante dieléctrica y el índice de refracción de cada una de las capas. Para la capa superior se decidió adoptar un modelo de medio efectivo que permite el cálculo de una constante dieléctrica eficaz: las nano-islas son consideradas como inclusiones en un layer dieléctrico formado por aire. [18].

La propiedad óptica fundamental que se centra esta teoría es encontrar o formular una función

dieléctrica efectiva, ϵ_{eff} , que exprese una respuesta lineal al campo externo aplicado en términos de las funciones dieléctricas o polarizabilidades en conjunto, la matriz del material y parámetros de topología elegidos adecuadamente. Es decir, se requiere encontrar una ϵ_{eff} de un material homogéneo ficticio que tenga las mismas propiedades macroscópicas ópticas del material compuesto (partículas y matriz). Para lograr este objetivo, en particular se requiere de cantidades físicas que permanezcan invariantes al reemplazar la muestra no homogénea por el medio efectivo correspondiente, las cantidades invariantes se enlistan :[19].

1. La suma de las funciones dieléctricas ponderadas por concentración de volumen.
2. La refracción molar
3. El campo eléctrico ponderado por concentración de volumen y el desplazamiento dieléctrico.
4. La densidad de energía del campo eléctrico en la muestra.

Existen varios modelos del medio efectivo, unos más precisos que otros, esto se debe principalmente al grado de aproximación utilizado para incluir la topología de la muestra. Además, son muy sensibles con la $\epsilon(\omega, R)$ y ϵ_m elegidas (donde, $\epsilon(\omega, R)$ es la permitividad de las inclusiones o de las nano-islas, y ϵ_m es la permitividad del medio). Además, en nuestro caso tenemos muestras con inclusiones de tamaño nanométrico y el problema se centra en la elección adecuado de $\epsilon(\omega, R)$ y la morfología aleatoria intrínseca de las inclusiones[19].

El primer modelo de medio efectivo fue desarrollado por Newton, que posteriormente fue modificado por Beer, Gladstone y Dale y finalmente por Landau and Lifschits & Looyenga. Estos modelos que se derivan uno del otro se basan básicamente en promediar determinadas potencias de las funciones dieléctricas de las inclusiones con un factor de llenado "f". Las

forma matemática de los tres modelos se observa a continuación[19]:

1. Modelo de Newton

$$\epsilon_{eff} = f\epsilon + (1 - f)\epsilon_m \quad (1.4)$$

2. Modelo de Beer, Gladstone

$$\epsilon_{eff}^{1/2} = f\epsilon^{1/2} + (1 - f)\epsilon_m^{1/2} \quad (1.5)$$

3. Modelo de Landau-Lifschitz & Looyenga

$$\epsilon_{eff}^{1/3} = f\epsilon^{1/3} + (1 - f)\epsilon_m^{1/3} \quad (1.6)$$

Donde ϵ_{eff} es la permitividad efectiva del medio, f es el factor de llenado o también llamado fracción de volumen, ϵ es la permitividad de las inclusiones y ϵ_m es la permitividad del medio.

Otro modelo importante que cabe analizar es el modelo de Wiener el cual utiliza una cantidad invariante como la refracción molar(Z) la cual depende de la permitividad del medio(ϵ_m), de la permitividad de las incrustaciones(ϵ_{np}), peso molecular (M_{mol}) y densidad de masa (ρ), donde se supone que son inclusiones esféricas. Su forma matemática es la siguiente[19]:

$$Z = \frac{M_{mol}}{\rho} \frac{\epsilon_{np} - \epsilon_m}{\epsilon_{np} + 2\epsilon_m} \quad (1.7)$$

Wiener amplió incluyendo también formas no esféricas de las inclusiones. Su cantidad invariante tomó la siguiente forma[19]:

$$Z_{Wiener} = \frac{1}{\rho} \frac{\varepsilon - \varepsilon_w}{\varepsilon + \mu} \quad (1.8)$$

Donde $0 \leq \mu$ y $\varepsilon_w \leq \inf$ y son cantidades reales. Además, μ se denomina factor de forma y depende de la forma que tengan las inclusiones. Finalmente se encuentra que la permitividad efectiva ε_{eff} tiene la siguiente forma matemática[19].

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m \left[1 + \frac{(1 + 2\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_m})f(\varepsilon - \varepsilon_m)(\varepsilon + 2\varepsilon_w)}{1 - f(\varepsilon - \varepsilon_m)(\varepsilon + 2\varepsilon_w)} \right] \quad (1.9)$$

Para inclusiones esféricas el factor de forma $\mu = 2\varepsilon_m$ y $\varepsilon_w = \varepsilon_m$, reemplazando se encuentra fórmula la de Maxwell-Garnett para la permitividad efectiva, que tiene la siguiente formulación matemática[19].

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = f \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon + 2\varepsilon_m} \quad (1.10)$$

1.9.1 Modelo de Maxwell Garnett Clásico

En la literatura existen varios métodos para encontrar la formulación de Maxwell-Garnett, uno de ellos es partiendo de la relación de Clausius-Mossotti, la cual relaciona la permitividad efectiva (ε_{eff}), la permitividad del medio (ε_m), la fracción de volumen (f), el radio promedio de las inclusiones esféricas (R) y la polarizabilidad de las inclusiones. La forma matemática es la siguiente[2]:

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = \frac{f}{R^3} \alpha(R) \quad (1.11)$$

La polarizabilidad de inclusiones esfericas es:

$$\alpha_{MG}(R) = R^3 \frac{\epsilon_{np} - \epsilon_m}{\epsilon_{np} + 2\epsilon_m} \quad (1.12)$$

Reemplazando la ecuación 1.12 en la ecuación 1.11 y realizando las operaciones matemáticas pertinentes, la permitividad efectiva de Maxwell-Garnett (ϵ_{eff}) es:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_m \left[\frac{\epsilon_{np}(1+2f) + 2\epsilon_m(1-f)}{\epsilon_{np}(1-f) + \epsilon_m(f+2)} \right] \quad (1.13)$$

En esta ecuación el radio de la nanopartícula no aparece explícitamente, y solo toma en cuenta el confinamiento intrínseco, por lo que solo sería válida para campos homogéneos dentro de las nanopartículas[2].

1.9.2 Modelo de Maxwell Garnett Mie

En esta aproximación se redefine una nueva polarizabilidad incorporando la dependencia de efectos dinámicos en la teoría del medio efectivo[2]. La nueva ecuación para la polarizabilidad se muestra:

$$\alpha_{MGM} = \frac{3i\lambda^3}{16\pi^3\epsilon_m^{3/2}} a_1(R) \quad (1.14)$$

Donde a_1 es el primer coeficiente de Mie dado por:

$$a_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_{np}}\Psi_1(2\pi R\sqrt{\epsilon_{np}}/\lambda)\Psi_1'(2\pi R\sqrt{\epsilon_m}/\lambda) - \sqrt{\epsilon_m}\Psi_1(2\pi R\sqrt{\epsilon_m}/\lambda)\Psi_1'(2\pi R\sqrt{\epsilon_{np}}/\lambda)}{\sqrt{\epsilon_{np}}\Psi_1(2\pi R\sqrt{\epsilon_{np}}/\lambda)\xi_1'(2\pi R\sqrt{\epsilon_m}/\lambda) - \sqrt{\epsilon_m}\Psi_1'(2\pi R\sqrt{\epsilon_m}/\lambda)\xi_1(2\pi R\sqrt{\epsilon_{np}}/\lambda)} \quad (1.15)$$

Reemplazando la ecuación 1.14 en la ecuación 1.11, y realizando las operaciones matemáticas pertinentes se tiene que la permitividad efectiva ϵ_{eff} es:

$$\epsilon_{eff} = \frac{6i\lambda^3 f \epsilon_m a_1(R) + 16R^3 \pi^3 \epsilon_m^{5/2}}{16\pi^3 R^3 \epsilon_m^{3/2} - 3i\lambda^3 f a_1(R)} \quad (1.16)$$

1.9.3 Modelo de Maxwell Garnett Modificado

En la realidad los materiales compuestos por inclusiones de nanopartículas de algún metal (en nuestro caso inclusiones de Ag) están hechos de diferentes tamaños debido a su naturaleza aleatoria intrínseca de fabricación, por lo que cada nano-isla de Ag tiene su propio valor de polarizabilidad. Tomando en cuenta eso y la teoría del campo medio, se obtiene la ecuación modificada de Maxwell-Garnett[2].

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_m}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_m} = \frac{3i\lambda^3}{16\pi^3 \epsilon_m^{3/2}} \frac{f}{R^3} \int_{R_{min}}^{R_{max}} P(R) a_1(R) dR \quad (1.17)$$

Donde $P(R)$ es la distribución de tamaño de las nanopartículas, R_{max} y R_{min} es el radio máximo y mínimo de la distribución de tamaño, R es el radio promedio de las nanopartículas, f es la fracción de volumen y a_1 es el primer coeficiente de Mie[2].

En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los modelos, sus diferencias y características generales.

Capitulo 2

Fabricación y Caracterización Experimental de las Estructuras

2.1 Preparación de Laminillas de vidrio

Las laminillas de vidrio que se utilizó para las deposiciones tienen dimensiones de 76.2 mm de largo x 25.4 mm de ancho x 1.0 mm-1.2 mm de espesor. Se sigue el siguiente protocolo para la adecuada limpieza y uso de los mismos.

1. Cada Laminilla se cortó en 4 piezas iguales (aprox. de 19.05 mmx25.4 mm) con corta vidrios de punta de diamante.
2. Se usó el laboratorio Cleaning Room para la correcta limpieza de las laminillas(ver figura2.1) .

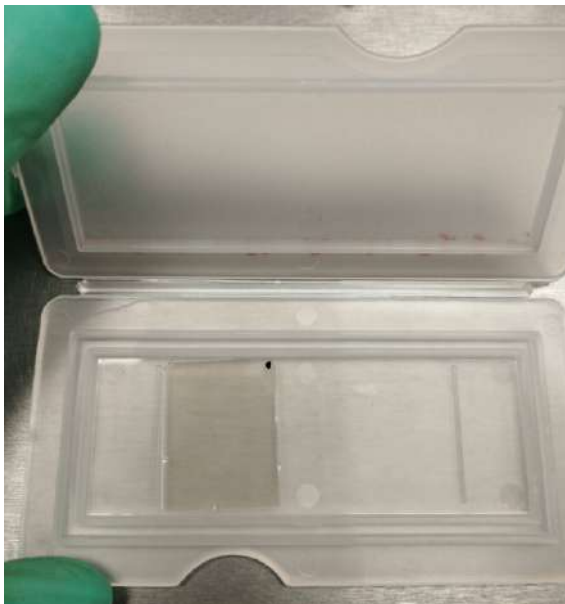


Figure 2.1: Foto de laminilla y portamuestras.

3. Antes de entrar a la habitación debemos colocarnos un overol especial de laboratorio para evitar contaminaciones.
4. En la habitación Cleaning Room las laminillas se los trata con el siguiente protocolo de limpieza:
 - Colocación de las laminillas en un recipiente circular para laminillas.
 - Se lavó con agua destilada y se sumerge en la misma con un poco de detergente especial para limpieza de laminillas.
 - Se colocó el recipiente con las laminillas en el ultrasonido, a un tiempo de 10 min(ver Figura2.2).



Figure 2.2: Esquema del Ultrasonido utilizado

- Después de los 10min se retiró del ultrasonido y se botó el agua en el fregadero, y se lavó nuevamente con agua destilada.
- Posteriormente se secó el envase circular y los portamuestras con un compresor de aire.
- Se llenó el recipiente circular con las laminillas en Acetona.
- Y se colocó nuevamente en el ultrasonido (10 min).
- Después de los 10 min se retiró del ultrasonido y se recicla la Acetona.
- De la misma manera, se secó el envase circular y las laminillas con un compresor de aire.
- Seguidamente se llenó el recipiente circular con las laminillas de Isopropanol.
- Y se colocó nuevamente en el ultrasonido (10 min).
- Después de los 10min se retiró del ultrasonido y se recicla el Isopropanol.
- De la misma manera, se secó el recipiente circular y las laminillas con el compresor de aire. Las laminillas se colocaron en una base de metal que posteriormente serán

colocadas en el interior de una máquina de plasma pequeña (por 15 min, ver figura 2.5) para una mejor limpieza de la superficie, se muestra en la figura 2.3.



Figure 2.3: Laminillas cortadas sobre la bandeja de la máquina de plasma.

- Finalmente, las laminillas fueron colocadas en los porta muestras en una cámara seca para evitar la contaminación y el deterioro de las muestras (ver Figura 2.4).



Figure 2.4: Cámara seca para evitar contaminaciones y degradación de muestras.

- Antes de usar las laminillas en el máquina de Sputtering, se coloca las muestras en la máquina de plasma pequeña de plasma (ver Figura2.5), para una mejor limpieza de la superficie de las laminillas.



Figure 2.5: A la izquierda se observa la foto frontal de la máquina de plasma en funcionamiento. A la derecha se observa una foto del plasma sobre la superficie de las muestras.

2.2 Fabricación de Estructuras Multicapa por Pulverización Catódica con Magnetron de Corriente Continua(DC) y de Radio Frecuencia(RF)

Las estructuras multicapas se las realizaron por medio de pulverización catódica con magnetron de corriente continua (DC) y de radio frecuencia(RF) sobre las laminillas cortadas y limpiadas en la sección 2.1.

La máquina utilizada es la KENISISTEC KS 300C, la cual se observa en la figura2.6



Figure 2.6: Foto del equipo utilizado (KENOSISTEC KS 300C) para la realización de la pulverización catódica con magnetrón (CC y RF).

A continuación, se muestra el esquema básico del proceso de Sputtering utilizado.

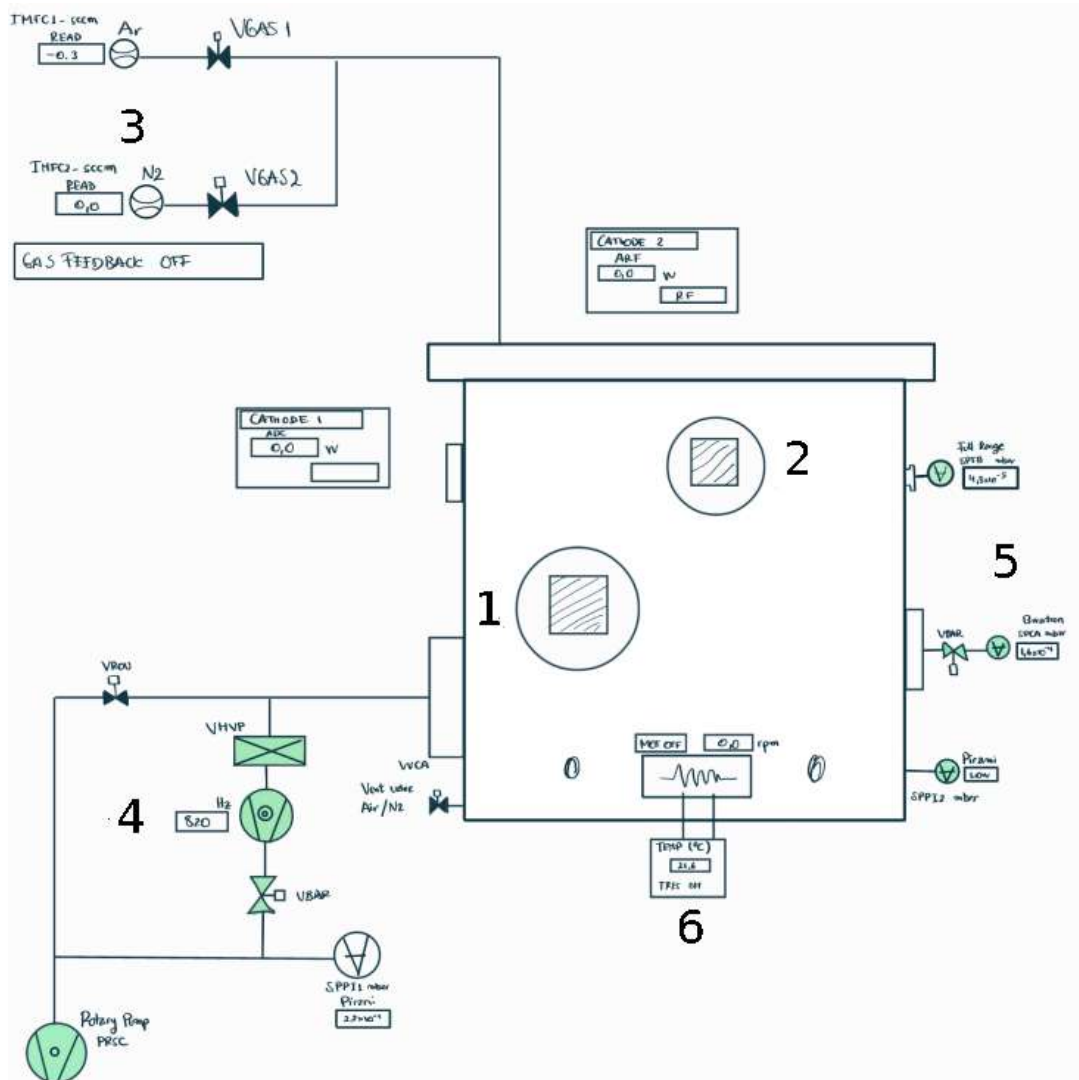


Figure 2.7: Esquema básico del proceso para la realización de la pulverización catódica con magnetron.

Donde las partes principales del proceso de sputtering se enlista acontinuación:

1. Cátodo para targetas para diferentes materiales(ver Figura2.8), realiza deposiciones en corriente continua (DC).

2. Cátodo para targetas para diferentes materiales(ver Figura2.8), realiza deposiciones en radio frecuencia (RF).

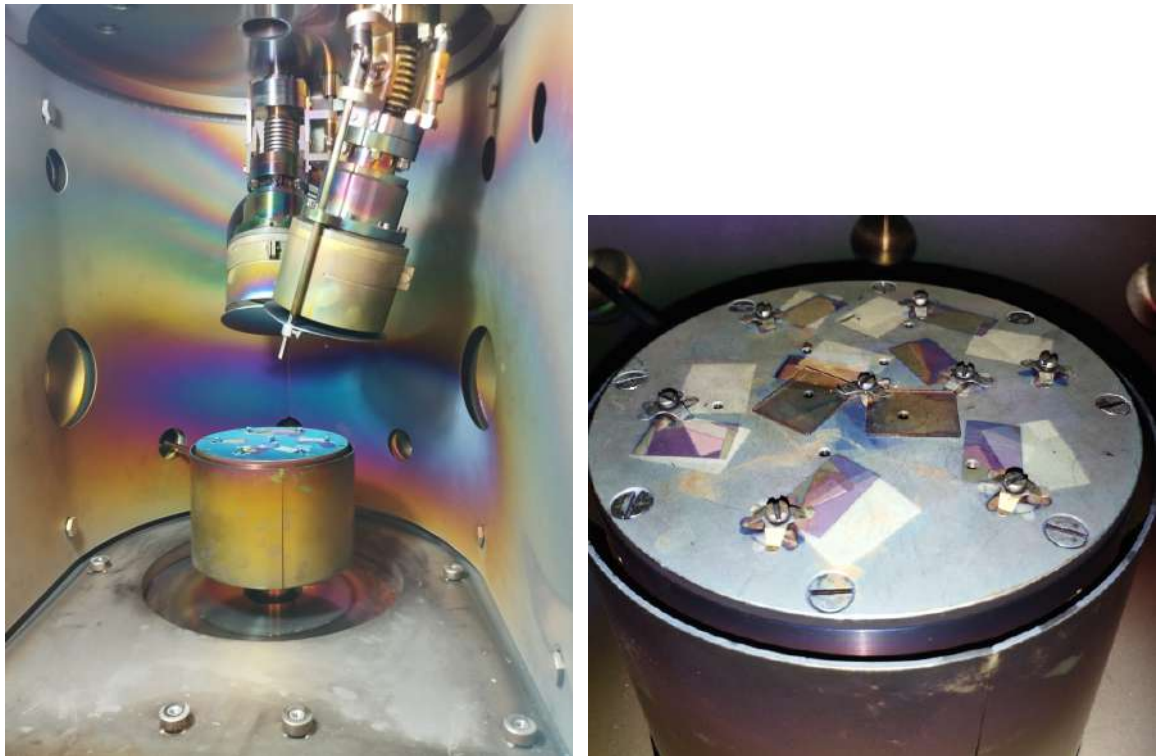


Figure 2.8: En la parte izquierda se observa una foto del interior del Sputtering. Y en la parte derecha se observa una foto de la base rotativa de soporte de las laminillas.

3. Valvulas para el ingreso del gas Argón(Ar) y Nitrógeno molecular (N_2), (ver Figura2.9).



Figure 2.9: En la izquierda se observa la válvula de gas de Argón y a la derecha la válvula de gas de Nitrógeno

4. Bombas de vacío y alto vacío, (Ver Figura2.10).

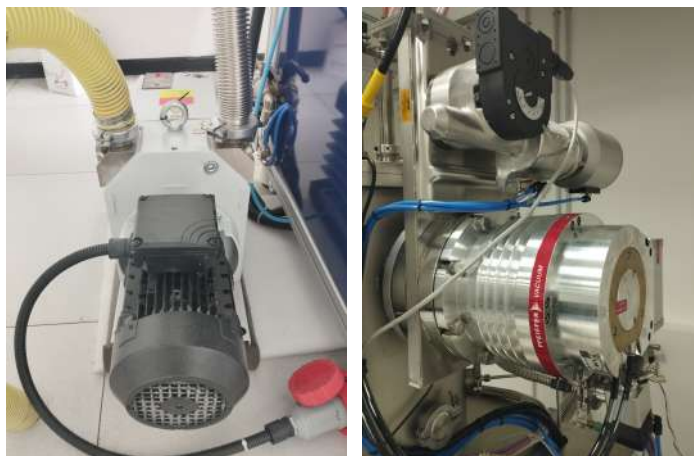


Figure 2.10: En la parte izquierda se observa una foto de la primera bomba de vacío que logra llegar hasta aproximadamente a 10^{-4} mmbars . Y en la parte derecha se observa una foto de la segunda bomba de vacío que logra llegar hasta aproximadamente a 10^{-7} mmbars .

5. Control de sensores de presiones (ver Figura2.11).



Figure 2.11: Se observa los diferentes sensores de presión y temperatura de la máquina.

6. Control de temperatura del sistema (ver Figura 2.11).

Una vez prendido el instrumento y con el software inicializado se inicia el protocolo para proceso de sputtering. Antes de iniciar un proceso de sputtering se debe presionar el botón de **RESET** ubicado en la parte posterior del instrumento (ver figura 2.12).



Figure 2.12: Se observa los diferentes botones para iniciar y terminar con un proceso de Sputtering.

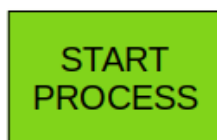
Posteriormente en la pantalla se presiona el botón de VENT CHAMBER.



Y finalmente, el botón de PUMP CHAMBER.



Una vez obtenido la presión de aproximadamente 10^{-4} [mbar], se da click en STAR PROCESS.



El protocolo utilizado por el software del instrumento para la fabricación de las estructuras se detalla a continuación en los siguientes 8 pasos, ver Figura 2.13:

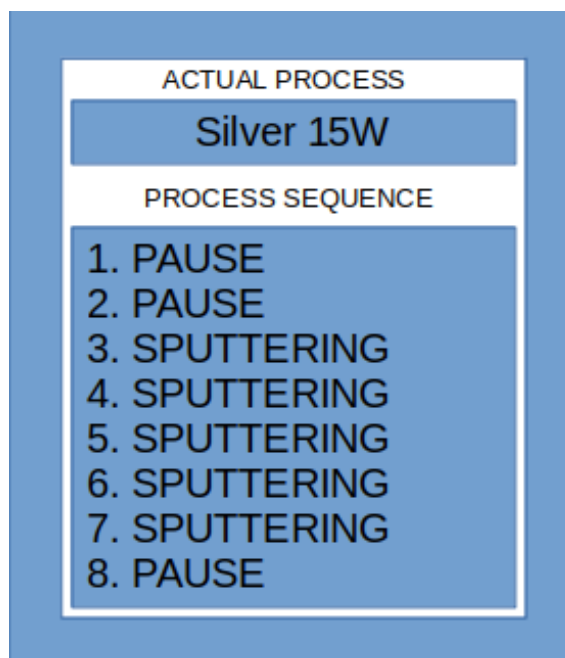


Figure 2.13: Esquema del proceso de Sputtering utilizado para fabricación de muestras.

1. **PAUSE:** Se prende la segunda bomba de vacío para lograr una presión de aproximadamente 7×10^{-6} mmbar.
2. **PAUSE:** Se prepara el gas de Argón para salir a la cámara de Sputtering.
3. **SPUTTERING:** Prepara para la formación de plasma (en nuestro caso plasma de Plata(Ag)).
4. **SPUTTERING:** Formación de plasma en su punto óptimo.
5. **SPUTTERING:** Se libera el plasma(de Ag).
6. **SPUTTERING:** Se cierra la placa para que no libere más plasma.
7. **SPUTTERING:** Sale el gas de Argón.
8. **PAUSE:** Se restaura a la presión normal, para retirar las muestras del interior de la cámara del Sputtering.

2.3 Caracterización de las Estructuras

2.3.1 Espectroscopía Elipsométrica

Las estructuras obtenidas mediante pulverización catódica con magnetrón a DC y RF de la sección 2.2 se las caracterizó mediante un Elipsómetro, que se muestra en la figura 2.14



Figure 2.14: Esquema del elipsómetro utilizado para caracterización de muestras obtenidas por el Sputtering.

El protocolo utilizado para la medición es el siguiente:

1. Para la realización correcta de las mediciones se debe prender una hora antes la fuente de luz (fuente de Xenón). Esto se realiza para calentar la lámpara de Xenon y estabilizar la intensidad de la luz.
2. Cada muestra de vidrio se la colocó en la posición indicada en la figura 2.14.
3. Se midió la reflectancia en polarización s y en polarización p en función de la longitud de onda, para diferentes ángulos(en este caso de 25 a 70 grados).

4. Se midió la transmitancia en polarización p en función de la longitud de onda (para un ángulo de 90 grados).
5. Además, se midieron los ángulos elipsométricos Φ y Δ para diferentes ángulos de incidencia (en nuestro caso de 25 a 70 grados).
6. Finalmente, las medidas de reflectancia en polarización en p y s encontradas nos sirvan para realizar la caracterización del color de las estructuras, la transmitancia para comparar con modelos de la teoría efectiva y los ángulos elipsométricos son analizadas mediante el Software propio del equipo para obtener espesor, índice de refracción, entre otras propiedades ópticas mediante modelos de ajuste, que se detallaran a continuación.

2.3.2 Modelos de Ajuste

Los típicos modelos de ajuste que se encuentran en la literatura son: el modelo de Cauchy y el modelo de Lorentz. El primero sirve para caracterizar materiales dieléctricos, semiconductores y no-metales. Y el segundo modelo de Lorentz sirve para caracterizar las capas metálicas y semiconductores por encima de la banda prohibida fundamental, en nuestra investigación se usó la Plata (Ag) como material metálico e ITO como material transparente[9].

Cauchy Layer

La característica fundamental de materiales en la óptica es sin duda su índice de refracción n y su coeficiente de extinción k . El modelo de Cauchy, encuentra éstos índices aproximados en función de la longitud de la onda que varía lentamente y una absorción exponencial, con las siguiente relaciones matemáticas[9]:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.1)$$

$$k(\lambda) = \alpha e^{\beta(1.24(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\gamma}))} \quad (2.2)$$

Donde α y γ están en unidades de μm . Además, las constantes A , B , C , α (amplitud de coeficiente de extinción) y el factor exponente β , son parámetros que se pueden ajustar dependiendo de la capa. En cambio el parámetro de borde de la banda γ va a ser un valor constante dependiendo de la capa[9].

Lorentz oscillator layer

Este modelo es el utilizado en el proyecto de investigación debido a que trabaja de manera óptima con metales (Ag), semiconductores y en nuestro caso con óxidos conductores como es el ITO. La forma matemática del modelo de Lorentz es la siguiente[9]:

$$\varepsilon(h\nu) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 = \varepsilon_{1\text{inf}} + \sum_k \frac{A_k}{E_k^2 - (h\nu)^2 - iB_k h\nu} \quad (2.3)$$

Donde, se suma sobre los k osciladores de Lorentz, A_k es la amplitud, E_k es la energía central, y B_k es el ensanchamiento de cada oscilador. Además, $h\nu$ es la energía del fotón en eV y $\varepsilon_{1\text{inf}}$ es un término adicional definido por el modelo[9].

2.3.3 Microscopía de Fuerza Atómica

El instrumento utilizado para la caracterización de la morfología de las estructuras fabricadas se observa en la siguiente Figura 2.15. Las estructuras candidatas para el análisis morfológico con el AFM fueron: Vidrio-Nanoislas(10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos). Los resultados de este técnica se visualizan en la sección3.3 .

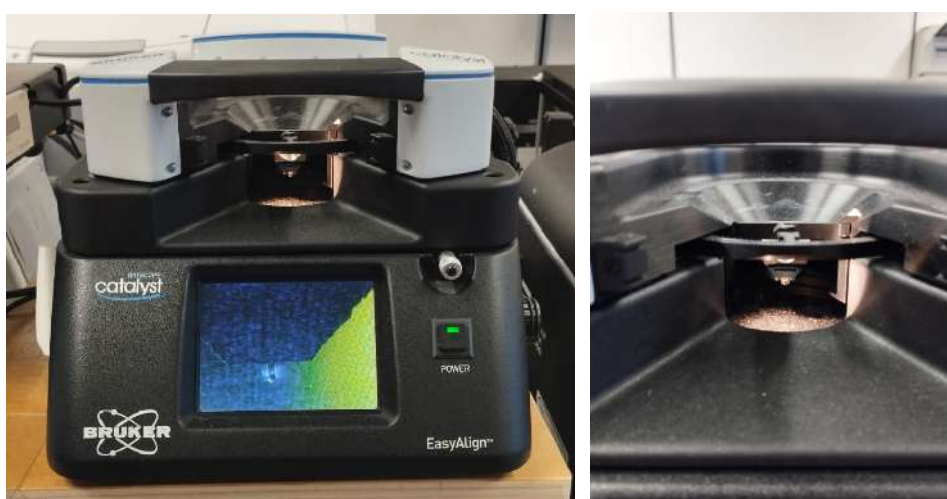


Figure 2.15: En la parte izquierda se observa una foto del instrumento AFM utilizado y a la derecha la punta del AFM calibrándose.

2.3.4 Microscopía Electrónica de Barrido

La caracterización de la morfología también se la realizó mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), el instrumento utilizado se observa en la Figura 2.16. Las estructuras candidatas para el análisis fueron las fabricadas de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de: Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos, en la sección3.1, se observan las muestras para el análisis morfológico.

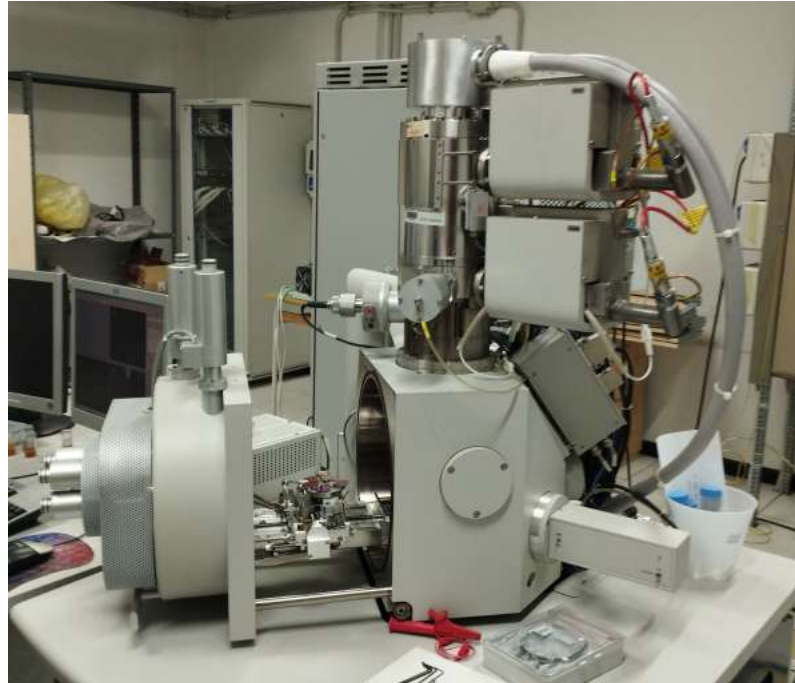


Figure 2.16: Esquema SEM utilizado.

2.3.5 Caracterización Mediante el espacio de color CIE 1931

La caracterización del color se obtuvo mediante un programa de libre acceso con extensión *.m*, es decir, un programa hecho en el software de Matlab. Para poder utilizarlo se realizó la convolución de las polarizaciones p y s , la fórmula matemática para la convolución en este caso es la multiplicación de las dos polarizaciones como se observa en la ecuación 2.4.

$$\text{Convolucion}(p - s) = (\text{Pol} - s) * (\text{Pol} - p) \quad (2.4)$$

En la figura 2.17 se observa la pantalla principal del programa en Matlab. Y en la sección 3.6 se encuentra las gráficas de la caracterización del color en CIE-1931 de todas las muestras fabricadas.

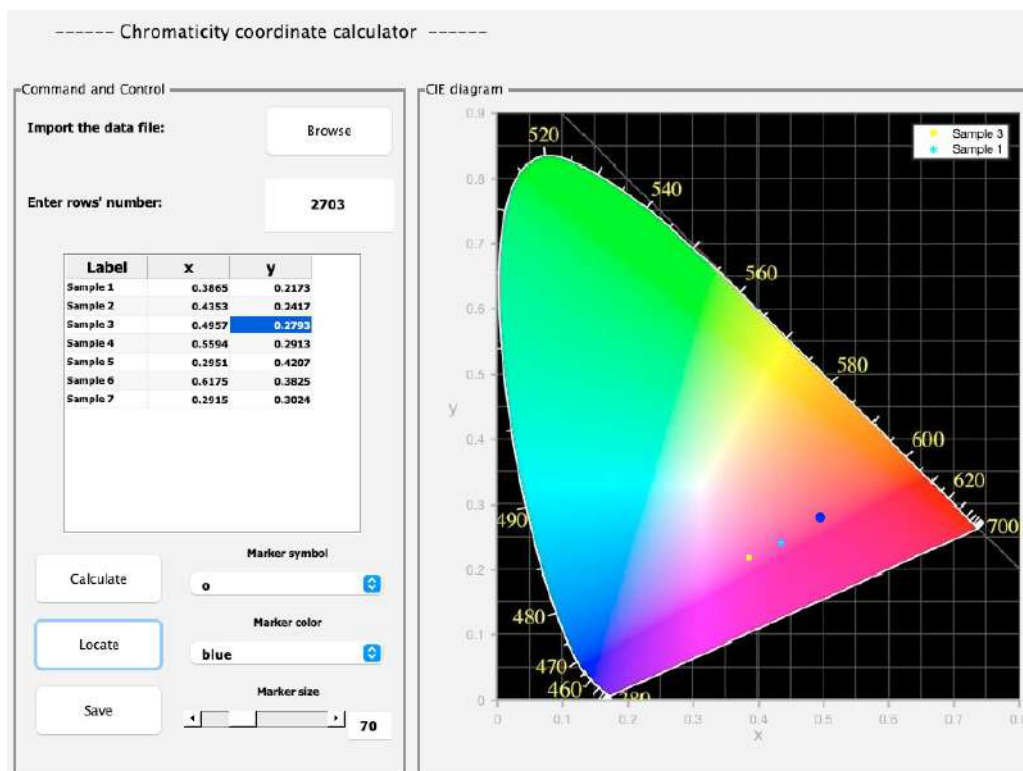


Figure 2.17: Pantalla principal del software de Matlab para calcular el espacio de color CIE-1931.

2.3.6 Software de Reconocimiento

Las estructuras fabricadas de la sección 2.2 tienen naturaleza aleatoria debido a su proceso de fabricación. Para conocer la eficiencia de estas estructuras para ser consideradas como una PUF óptica se necesitó un software de reconocimiento de imagen. Este software libre utiliza el algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) para determinar si la morfología es aleatoria y por tanto no reproducible..

Algoritmo Sift

El algoritmo SIFT es un descriptor de imágenes basado en la comparación, que fue desarrollado por David Lowe. Se lo usa principalmente para la coincidencia de puntos entre diferentes vistas y el reconocimiento de objetos basado en vistas. El algoritmo Sift es invariante a translaciones, rotaciones y transformaciones de escala. Por lo tanto, éste algoritmo es ideal para nuestro propósito, lo cual es verificar si las estructuras fabricadas se las puede considerar como PUF's ópticas.[20]. En la siguiente Figura2.18 se muestra un ejemplo de los resultados del algoritmo.

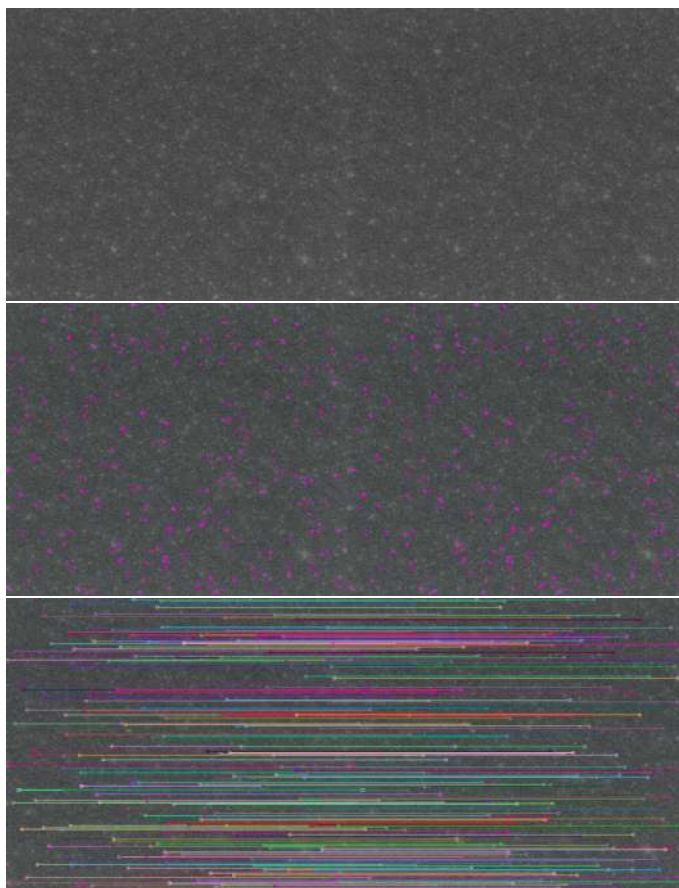


Figure 2.18: Análisis de reconocimiento del algoritmo Sift, para dos imágenes de AFM iguales

Capítulo 3

Resultados Obtenidos

En el presente capítulo se muestran las estructuras fabricadas por pulverización catódica en corriente continua y en radio frecuencia. También se presentan las curvas espectroscópicas (Reflectancia-p, Reflectancia-s, Transmitancia-p y los ángulos elipsométricos Ψ y Δ , estos últimos se observan en el apartado de los Anéxos) de cada una de las muestras fabricadas. Además, la morfología de muestras seleccionadas por medio de AFM y SEM con su respectivo análisis de reconocimiento. Y finalmente, se muestra la caracterización del color de cada estructura mediante el espacio de color CIE1931.

3.1 Muestras Obtenidas por Pulverización Catódica con Magnetron de Corriente Continua (CC) y Radio Frecuencia(RF)

Se realizaron un total de 8 muestras, cada una con diferente tiempo de deposición y diferente distribución de las capas. En la siguiente tabla 3.1 se presenta las muestras realizadas.

Lista de Muestras	
# de Muestra	Estructura
Muestra 1	Vidrio+Nano-Islas Ag (10 a 50 seg)
Muestra 2	Vidrio+Ag(80nm)+ITO(180nm)+Nano-Islas Ag (10 a 50 seg)
Muestra 3	Vidrio+Ag(80nm)+ITO(150nm)+Nano-Islas Ag (10 a 50 seg)
Muestra 4	Vidrio+Ag(80nm)+ITO(220nm)+Nano-Islas Ag (10 a 50 seg)
Muestra 5	Vidrio+Ag(80nm)+ITO(150nm)+Nano-Islas Ag(40seg)+ITO(10-30seg)
Muestra 6	Vidrio+Ag(80nm)+ITO(180nm)+Nano-Islas Ag(30seg)+ITO(10-30seg)
Muestra 7	Vidrio+Nano-Islas Ag(30seg)+ITO(0-30nm)
Muestra 8	Vidrio+Nano-Islas Ag(40seg)+ITO(0-30nm)

Table 3.1: Se observa 8 estructuras realizadas con diferentes capas y tiempos de deposición.

A continuación, se presenta una serie de fotos de las muestras fabricadas, cada una en su parte inferior se observa un número el cual es su tiempo de deposición dependiendo de la muestra.

Muestra 1: Vidrio-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 5 segundos

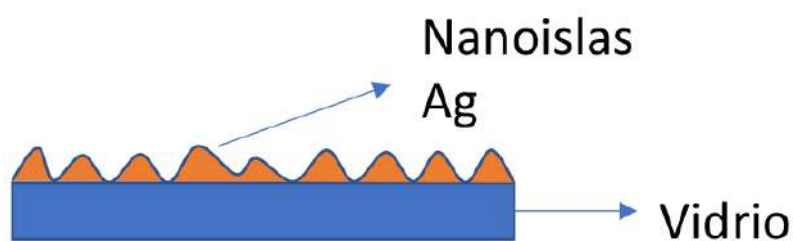


Figure 3.1: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Nano islas de Ag (10-50 seg en pasos de 5 segundos).



Figure 3.2: Foto de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 10-15-20 segundos, respectivamente.

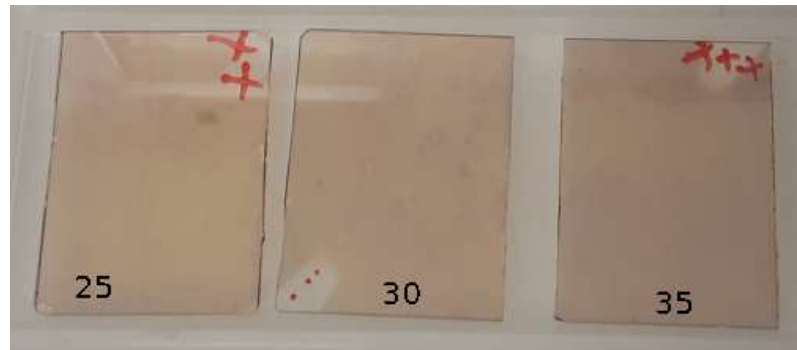


Figure 3.3: Foto de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 25-30-35 segundos, respectivamente.



Figure 3.4: Foto de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 40-45-50 segundos, respectivamente.

Muestra 2: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos

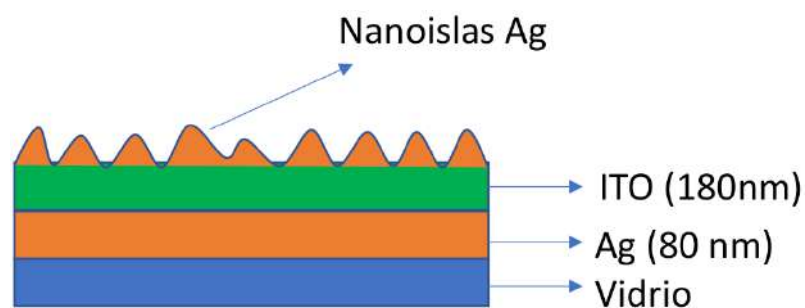


Figure 3.5: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Ag(80nm)+ITO(180nm)-Nano islas de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos.

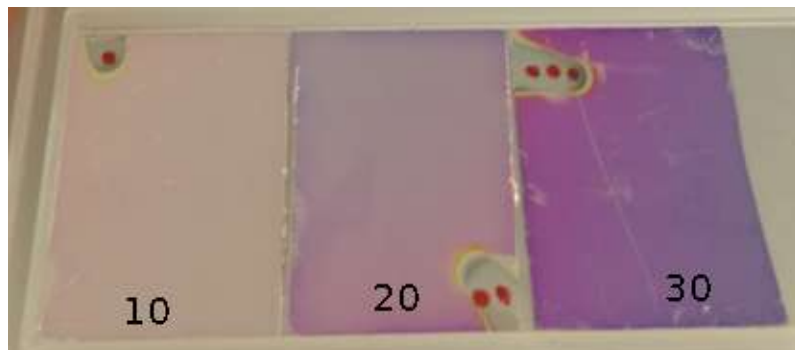


Figure 3.6: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 10-20-30 segundos, respectivamente.

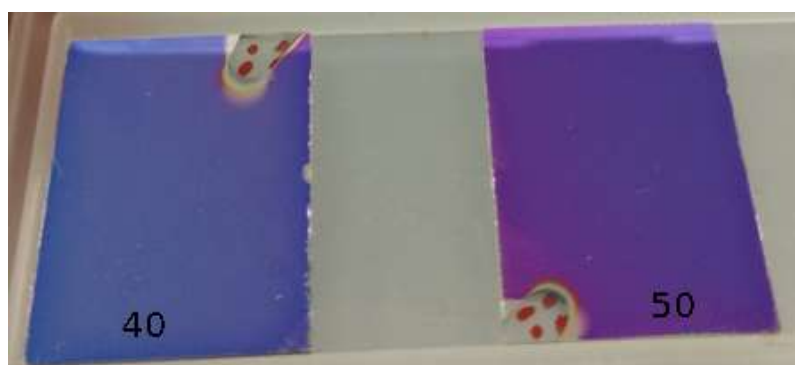


Figure 3.7: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40-50 segundos, respectivamente.

Muestra 3: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(150nm)-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos

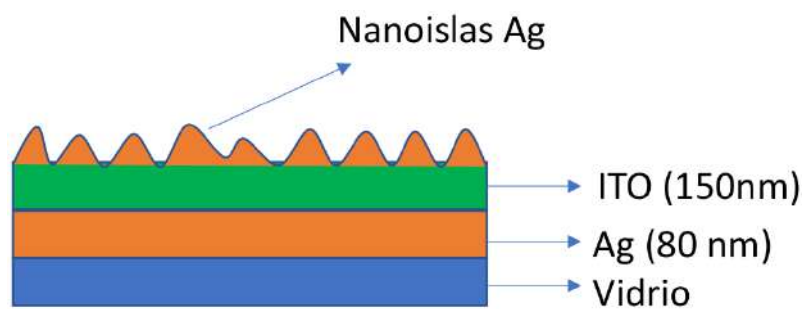


Figure 3.8: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Ag(80nm)+ITO(150nm)-Nano islas de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos.

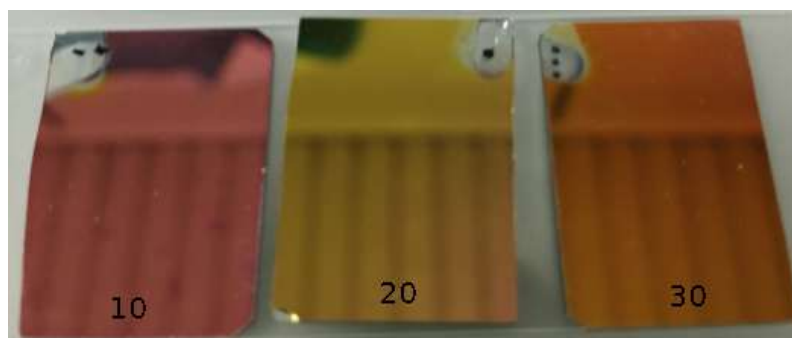


Figure 3.9: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 20-10-30 segundos, respectivamente.

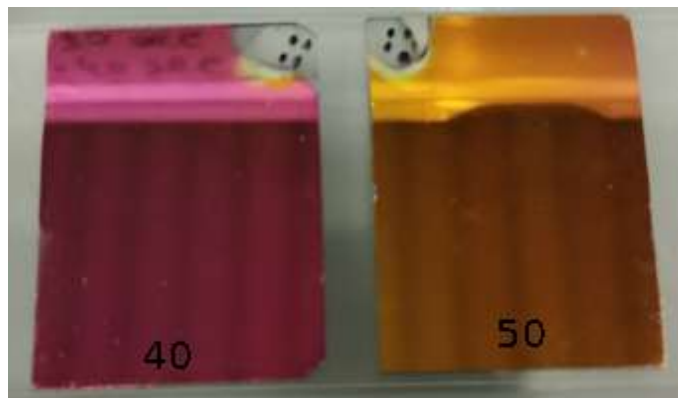


Figure 3.10: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40-50 segundos, respectivamente.

Muestra 4: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(220nm)-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos

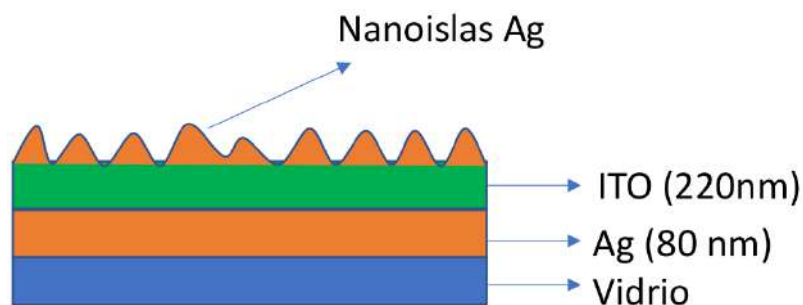


Figure 3.11: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Ag(80nm)+ITO(2200nm)-Nano islas de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos.

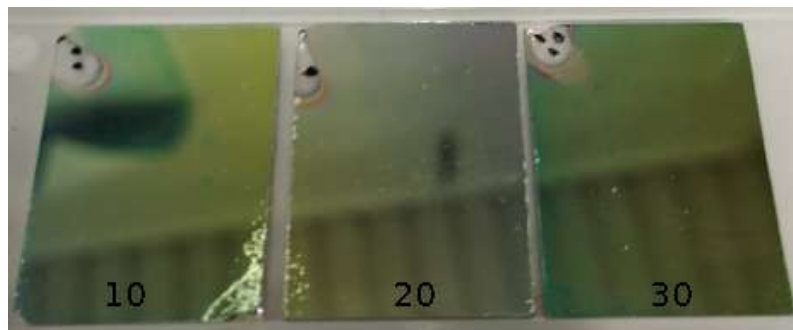


Figure 3.12: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 20-10-30 segundos, respectivamente.

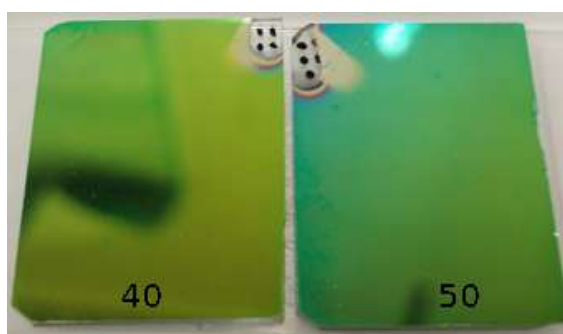


Figure 3.13: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40-50 segundos, respectivamente.

Muestra 5: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(150nm)-Nano Islas de Ag(40seg)-ITO(10-20-30 segundos)

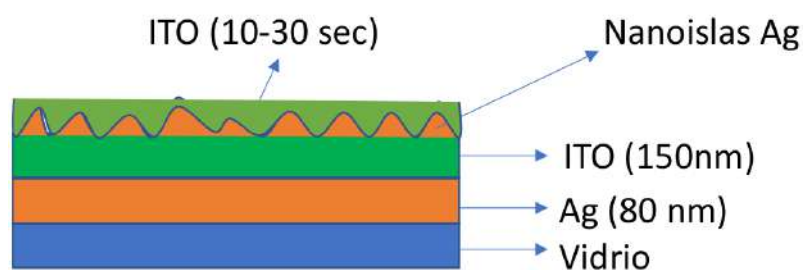


Figure 3.14: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Ag(80nm)+ITO(150nm)-Nano islas 40 segundos - ITO(0-10-20-30nm).



Figure 3.15: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(0nm).



Figure 3.16: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(10nm).

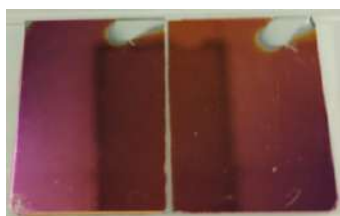


Figure 3.17: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(20nm).



Figure 3.18: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(30nm).

Muestra 6: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(30seg)-ITO(10-20-30 segundos)

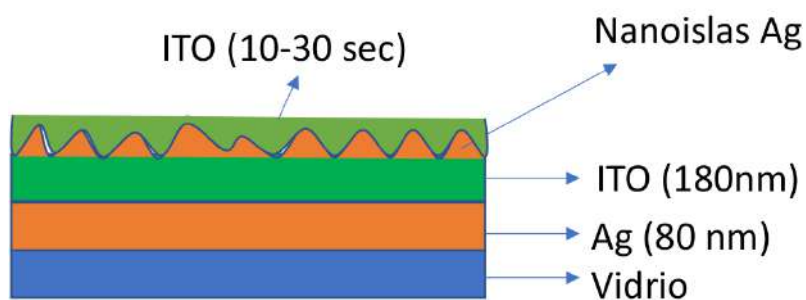


Figure 3.19: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Ag(80nm)+ITO(180nm)-Nano islas 30 segundos - ITO(0-10-20-30nm).



Figure 3.20: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos-ITO(0nm).



Figure 3.21: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos-ITO(10nm).



Figure 3.22: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos-ITO(20nm).



Figure 3.23: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos-ITO(30nm).

Muestra 7: de Vidrio-Nano Islas de Ag(30sec)+ITO(0-30nm)



Figure 3.24: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos+ITO(0nm).



Figure 3.25: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos+ITO(10nm).



Figure 3.26: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos+ITO(20nm).

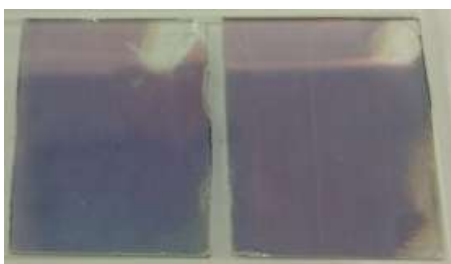


Figure 3.27: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 30 segundos+ITO(30nm).

Muestra 8: de Vidrio-Nano Islas de Ag(40sec)+ITO(0-30nm)

Figure 3.28: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(0nm).

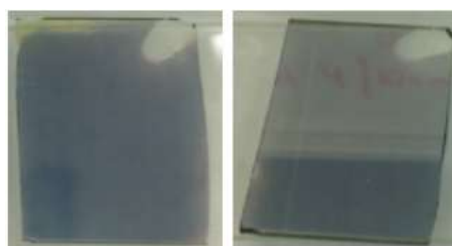


Figure 3.29: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(10nm).



Figure 3.30: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(20nm).

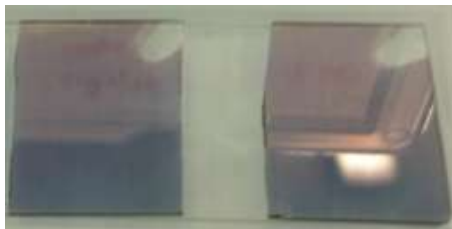


Figure 3.31: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40 segundos-ITO(30nm).

3.2 Resultados Obtenidos por Espectroscopía Elipsométrica

Muestra 1: Vidrio-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en saltos de 5 segundos

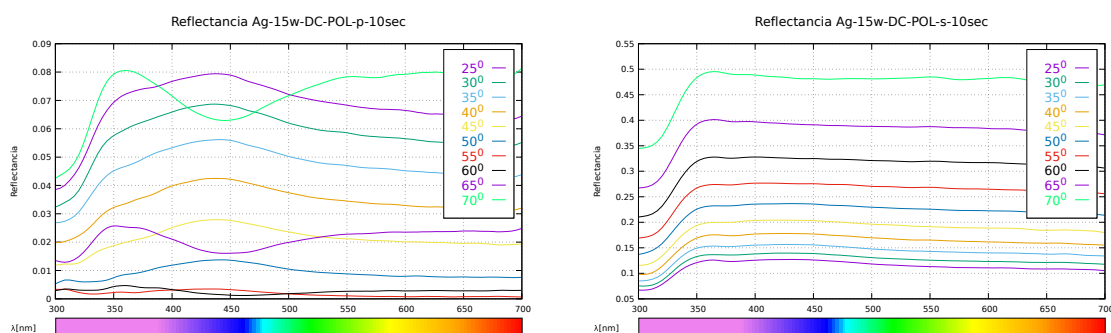


Figure 3.32: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-10-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

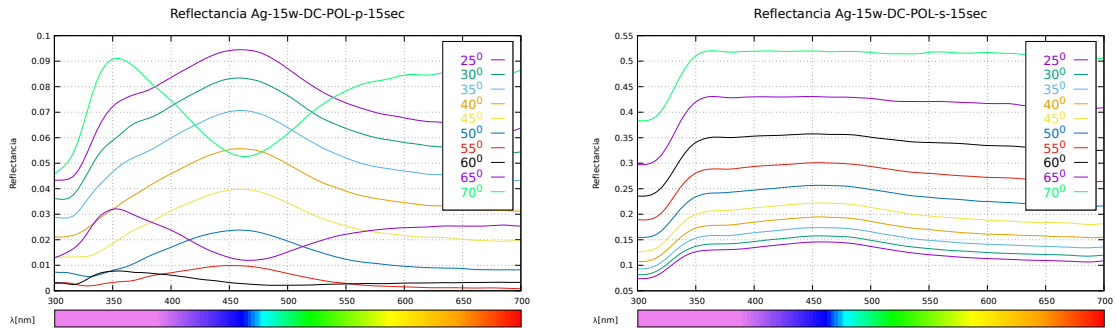


Figure 3.33: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-15-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

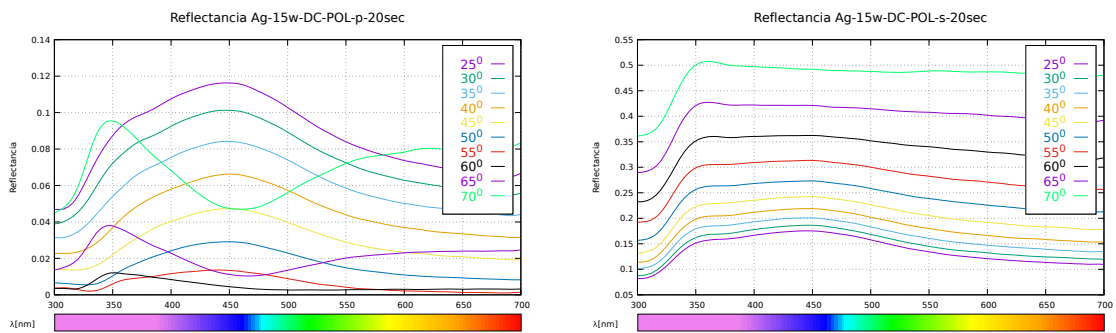


Figure 3.34: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-20-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

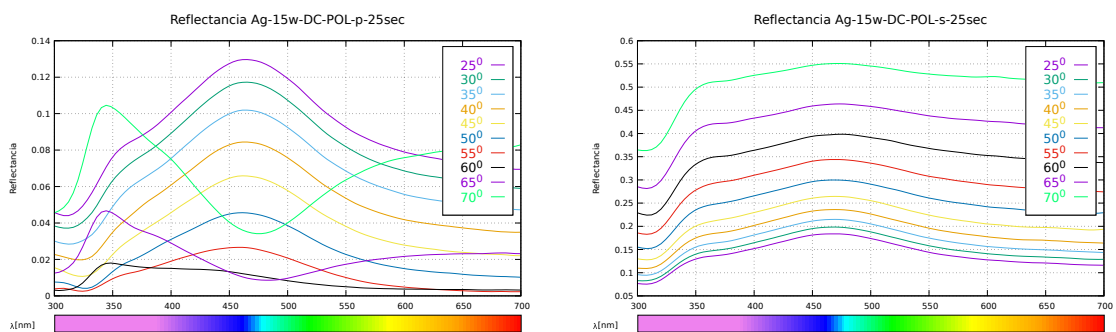


Figure 3.35: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-25-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

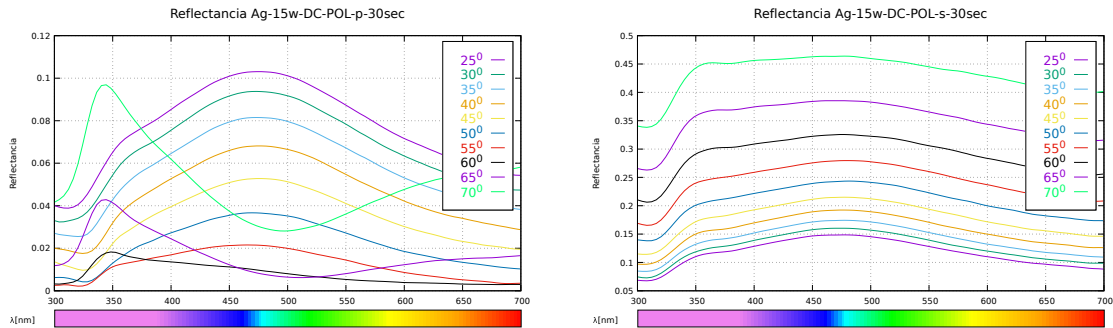


Figure 3.36: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-30-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

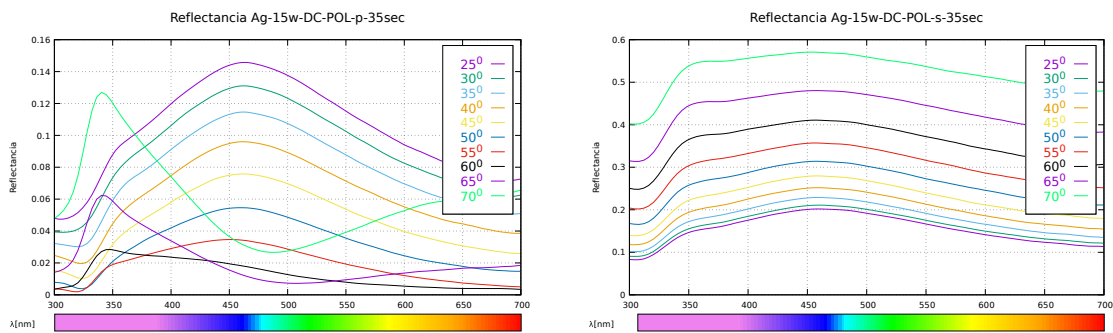


Figure 3.37: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-35-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

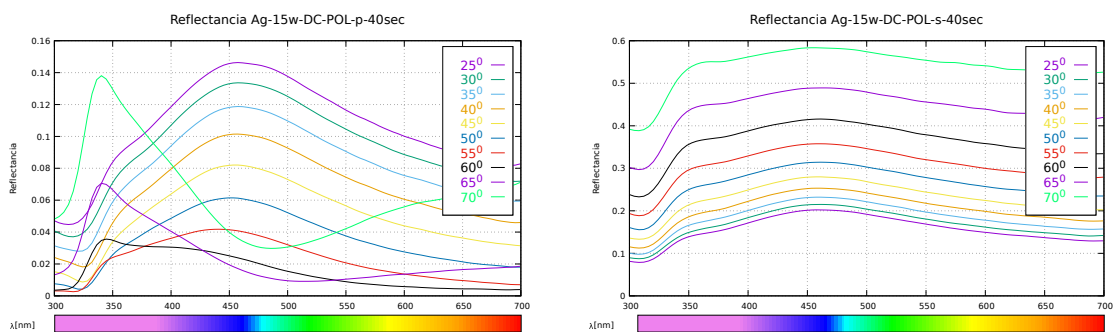


Figure 3.38: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-40-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

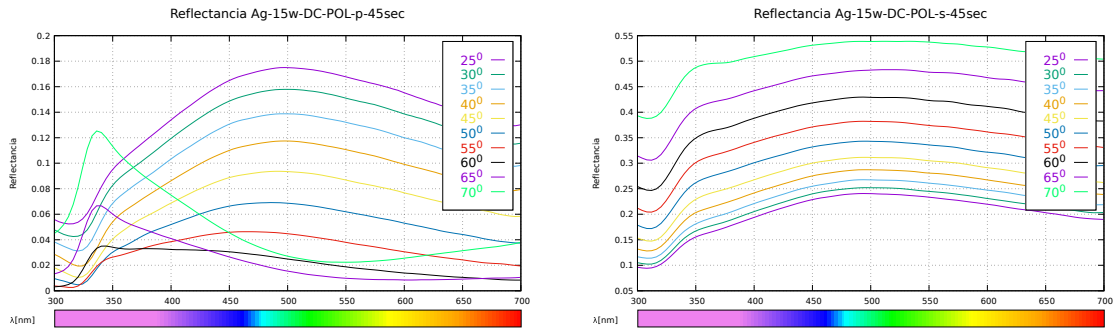


Figure 3.39: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-45-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

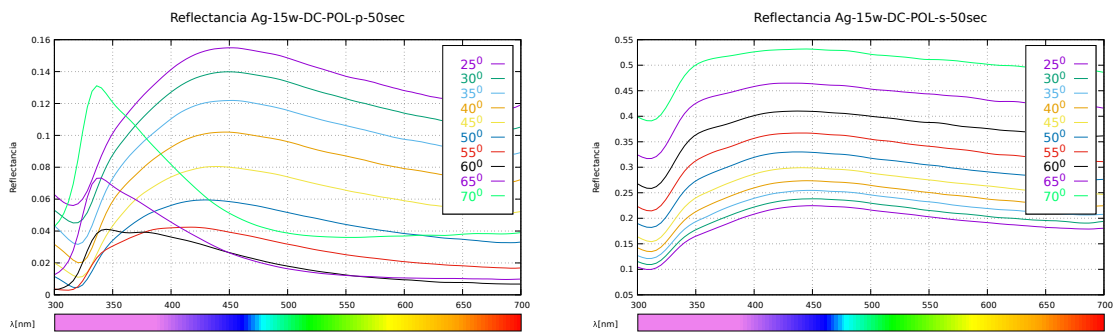


Figure 3.40: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15w-DC-50-segundos). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

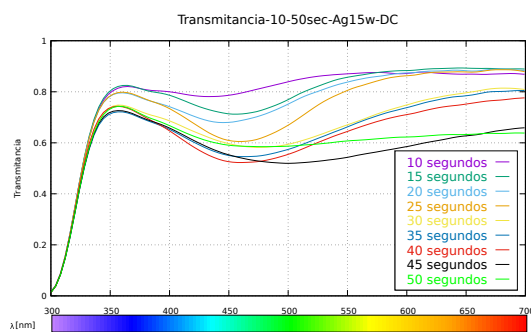


Figure 3.41: Espectro de Transmitancia de una muestra de Vidrio-Nanoislas Ag (15W-DC-POL-p-10-50segundos)

Muestra 2: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag de 0 a 50 segundos en saltos de 10 segundos

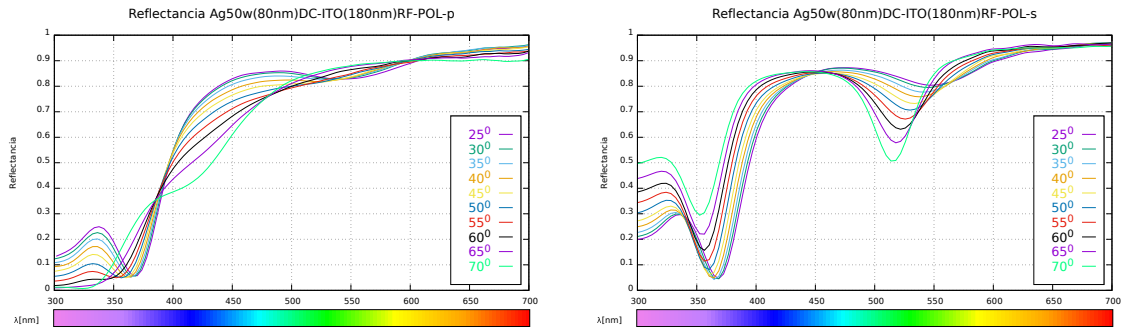


Figure 3.42: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(0sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

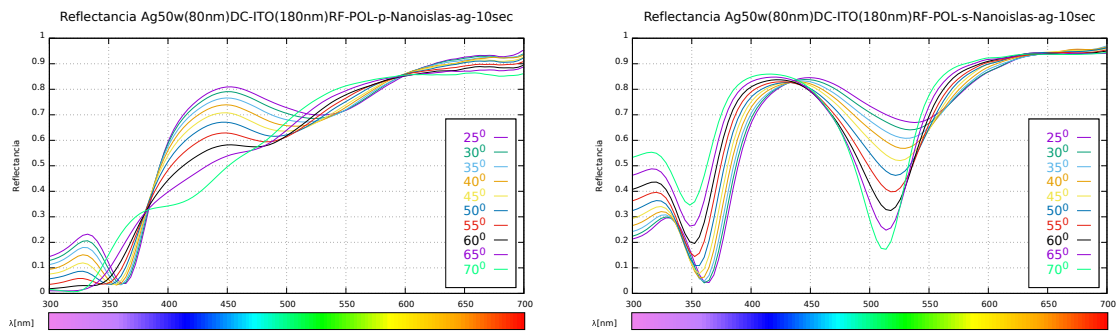


Figure 3.43: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(10sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

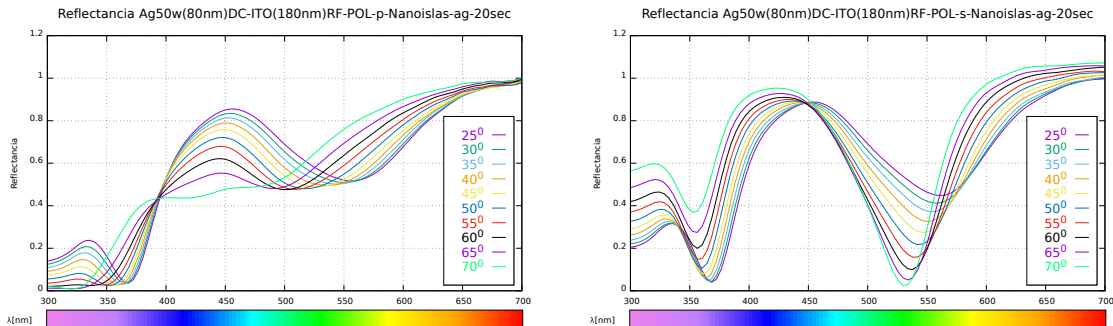


Figure 3.44: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(20sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

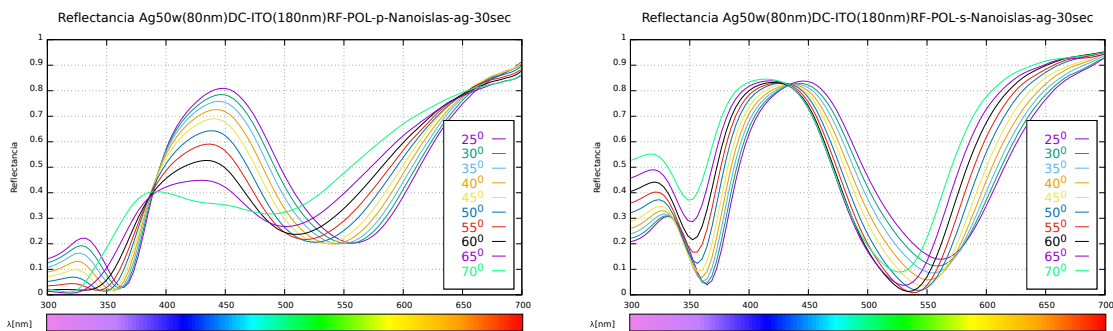


Figure 3.45: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(30sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

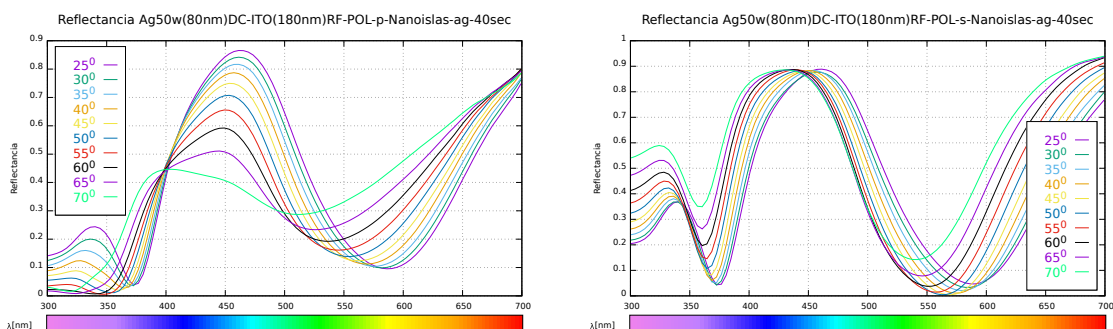


Figure 3.46: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(40sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

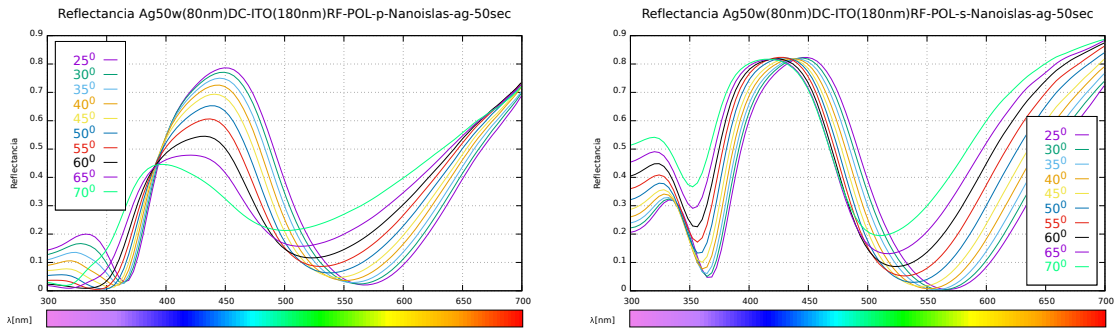


Figure 3.47: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(50sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

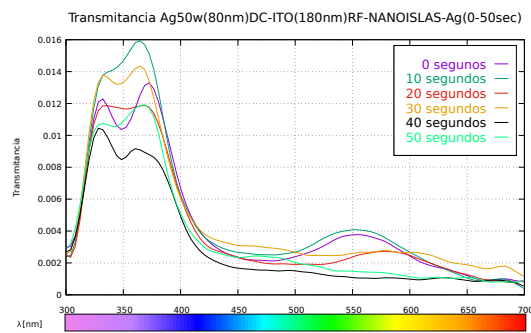


Figure 3.48: Espectro de Transmitancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(0-50sec)

Muestra 3: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(150nm)-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos

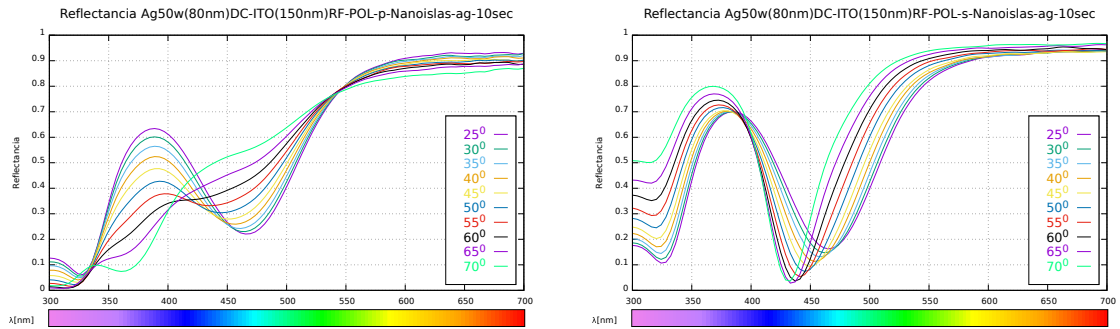


Figure 3.49: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(150nm)-Nano Islas de Ag(0sec). Izquierda Polarización-p y Derecha Polarización-s

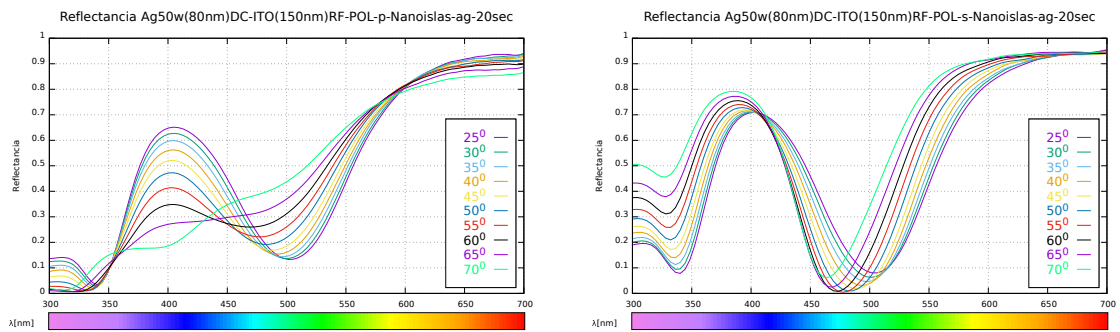


Figure 3.50: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (20 segundos)

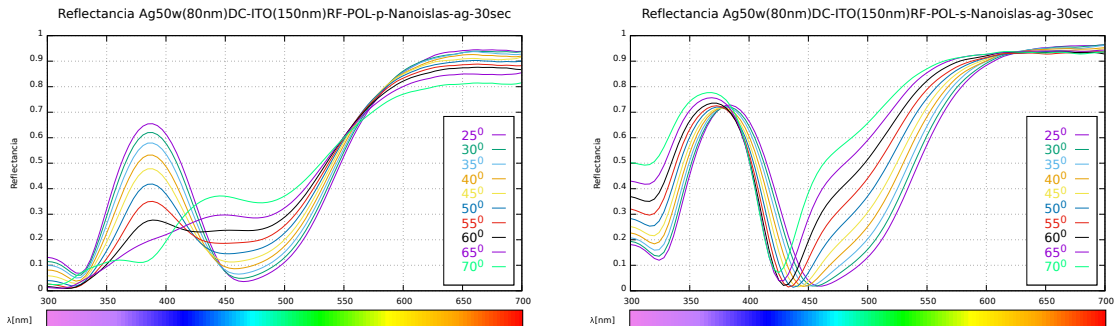


Figure 3.51: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)

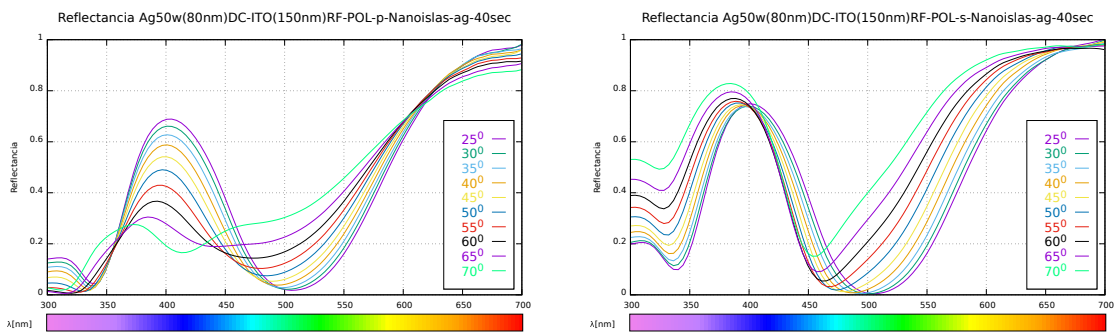


Figure 3.52: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)

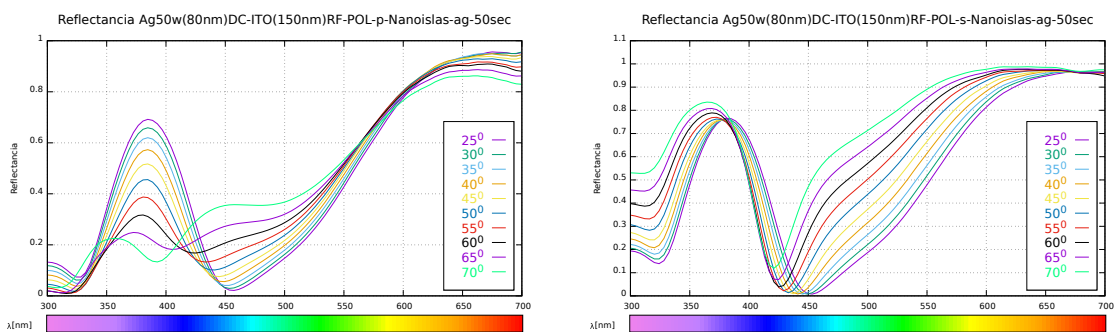


Figure 3.53: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (50 segundos)

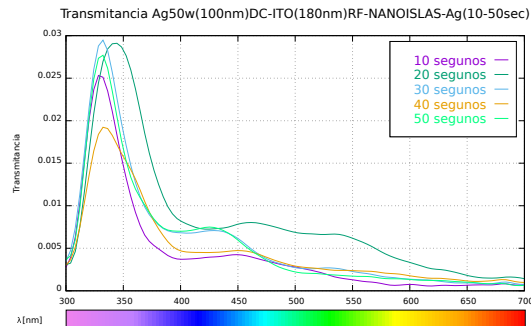


Figure 3.54: Espectro de Transmitancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(10-50sec)

Muestra 4: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(220nm)-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos

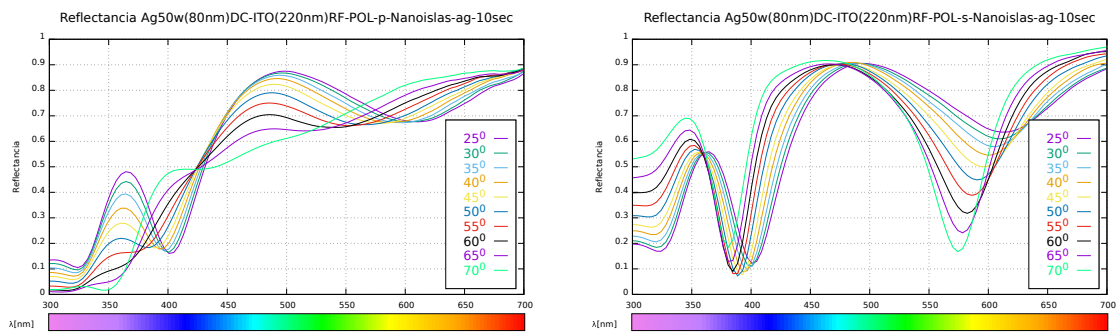


Figure 3.55: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (10 segundos)

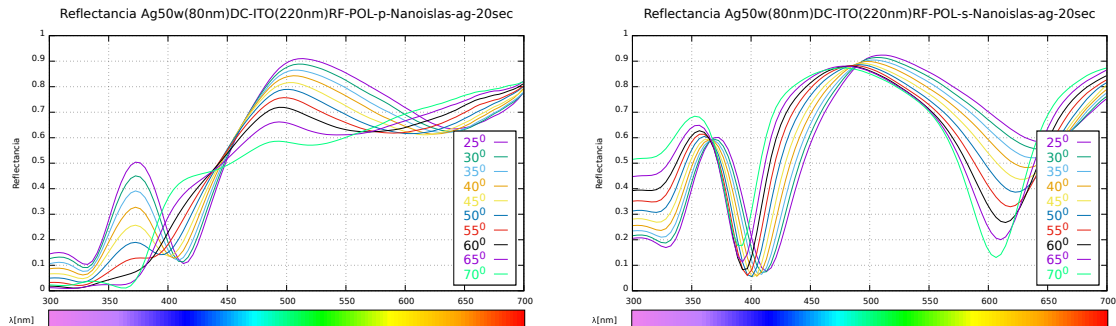


Figure 3.56: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (20 segundos)

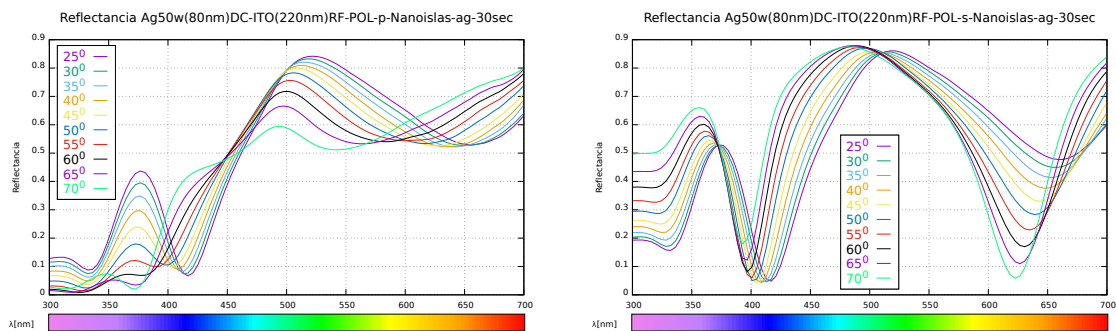


Figure 3.57: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)

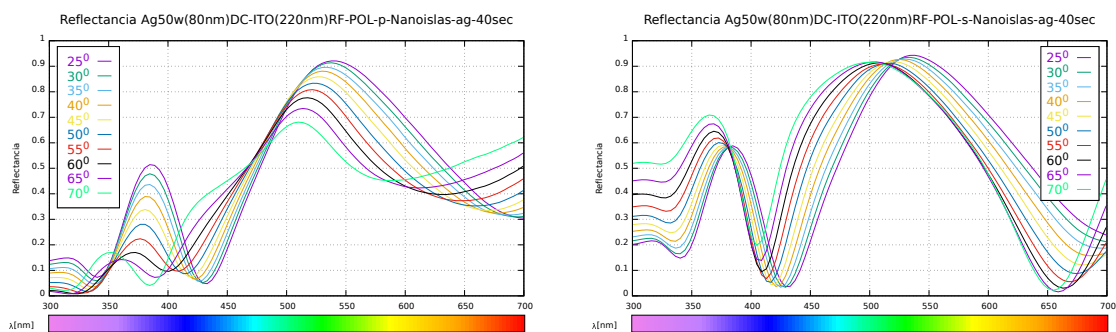


Figure 3.58: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)

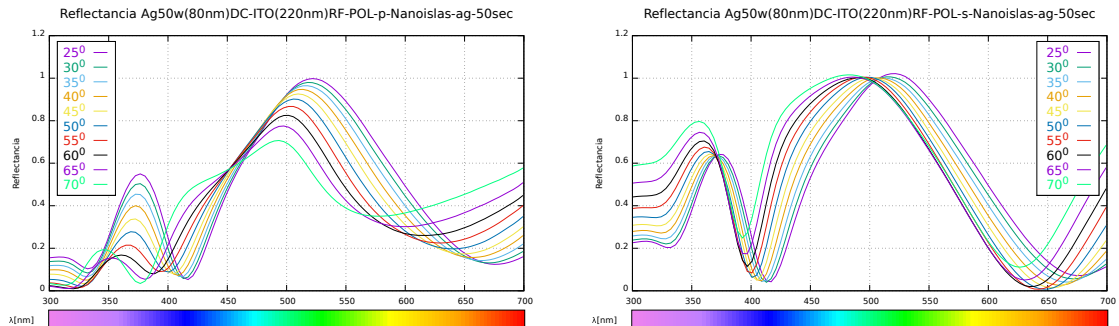


Figure 3.59: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (50 segundos)

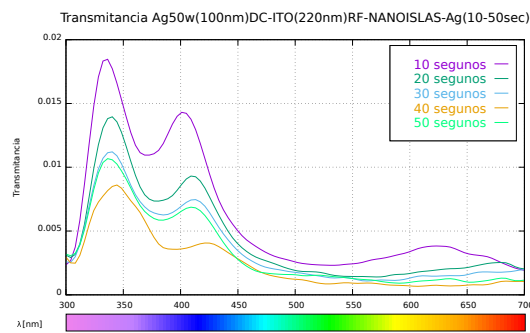


Figure 3.60: Espectro de Transmitancia de una muestra de Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag(10-50sec)

Muestra 5: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(150nm)-Nano Islas de Ag (40 segundos) ITO(0-10-20-30 nm)

Dos muestras similares para 0 nm de ITO.

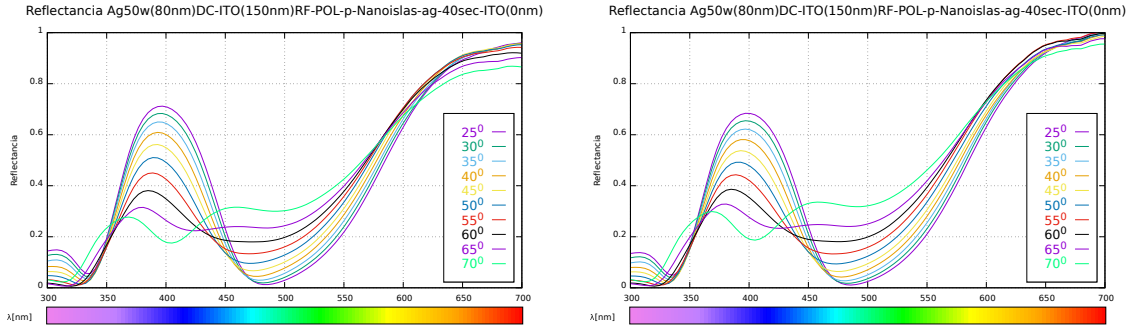


Figure 3.61: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(0nm)

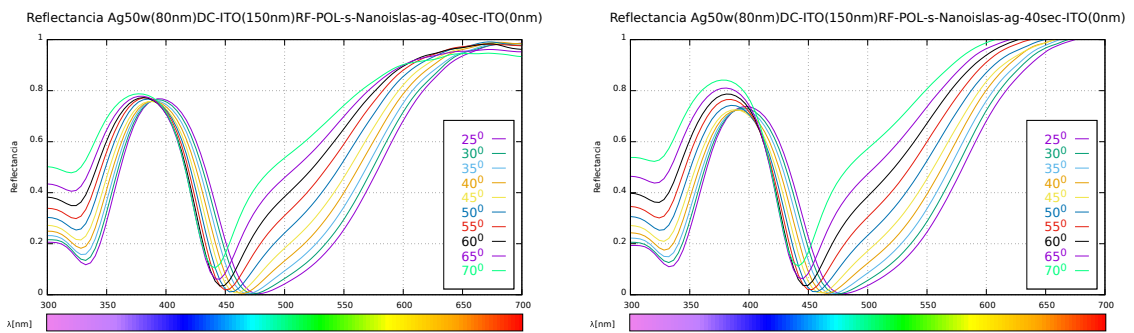


Figure 3.62: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras similares para 10 nm de ITO.

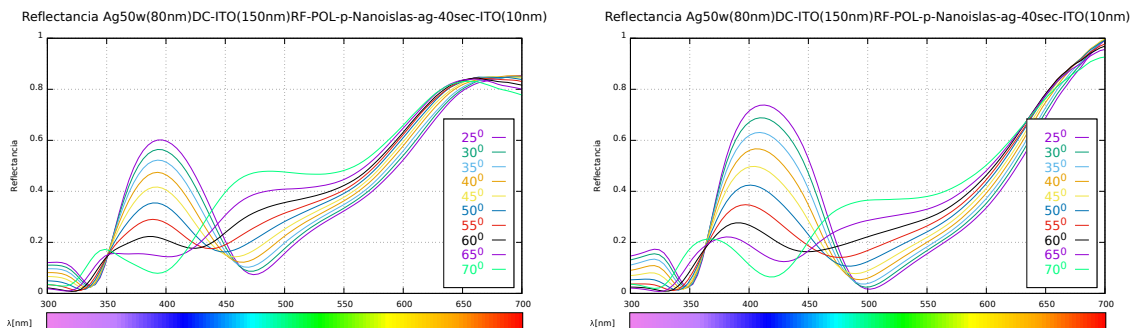


Figure 3.63: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(0nm)

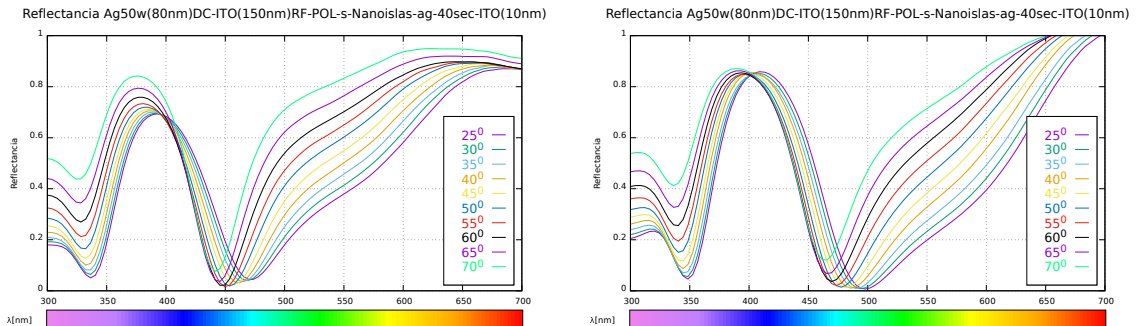


Figure 3.64: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras similares para 20 nm de ITO.

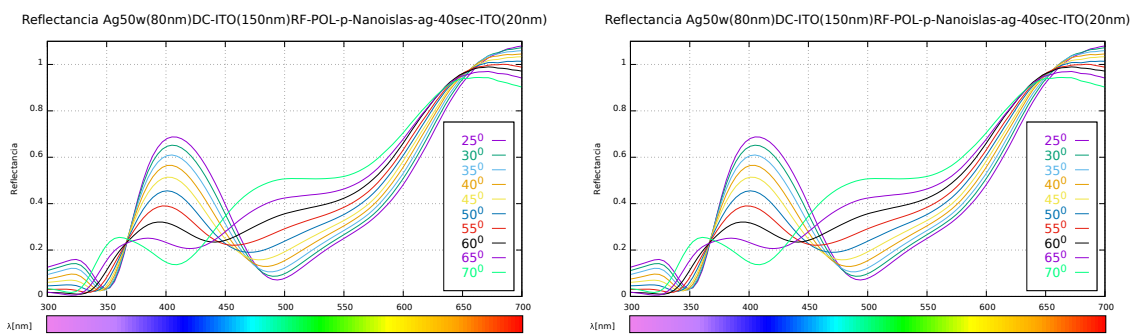


Figure 3.65: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(20nm)

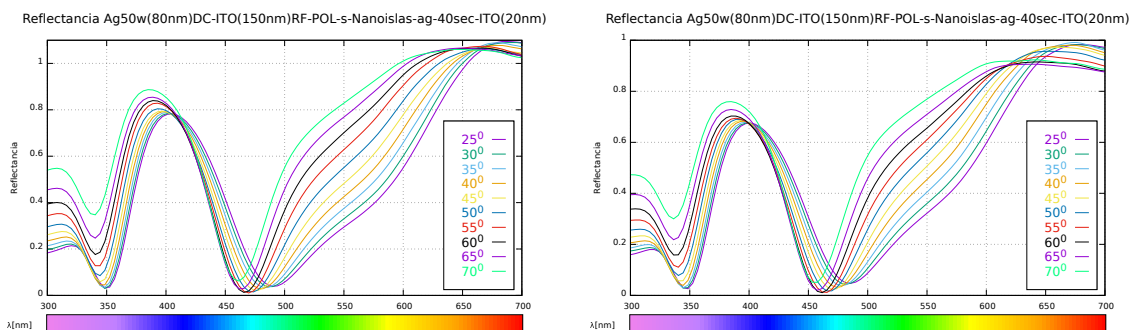


Figure 3.66: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(20nm)

Dos muestras similares para 30 nm de ITO.

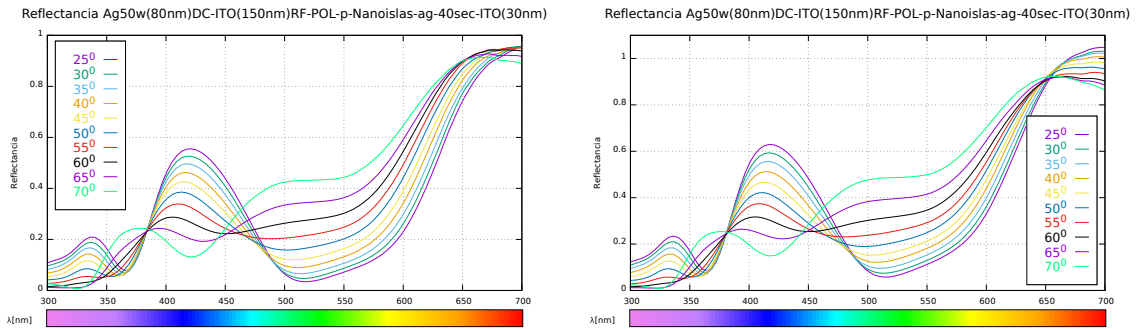


Figure 3.67: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(30nm)

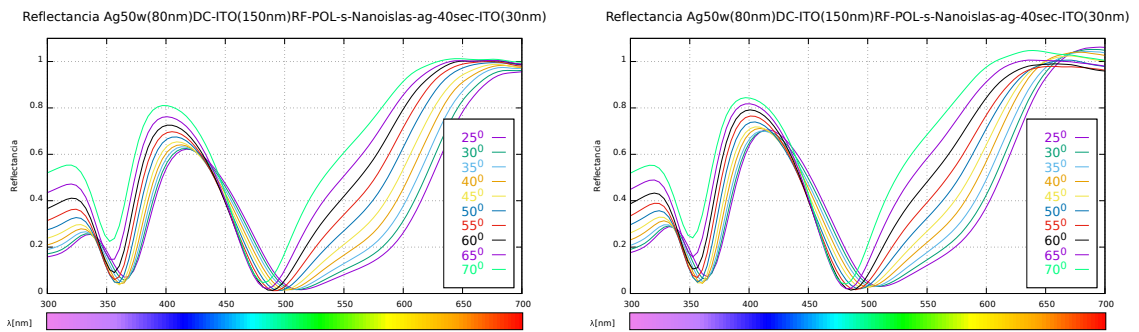


Figure 3.68: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(30nm)

Muestra 6: Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag (30 sec) ITO(10-20-30 nm)

Dos muestras 0 segundos de ITO.

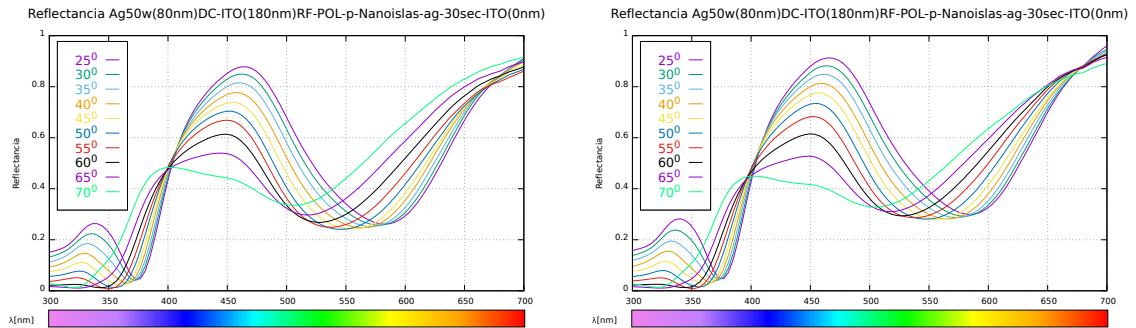


Figure 3.69: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

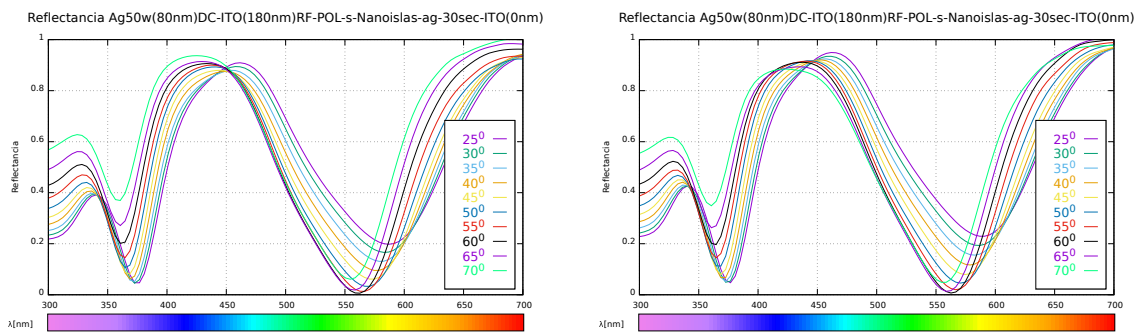


Figure 3.70: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras 10 segundos de ITO.

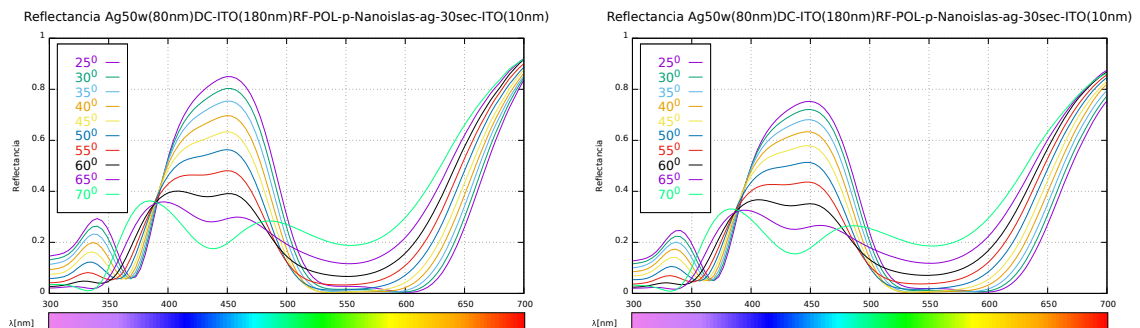


Figure 3.71: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

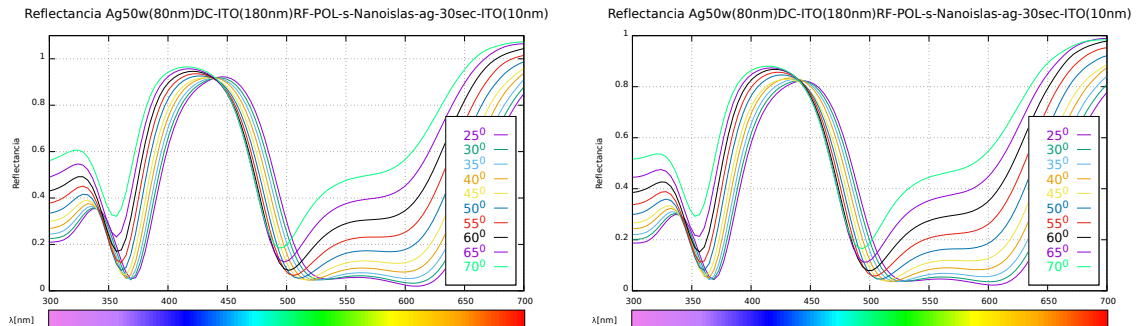


Figure 3.72: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras de 20 segundos de ITO.

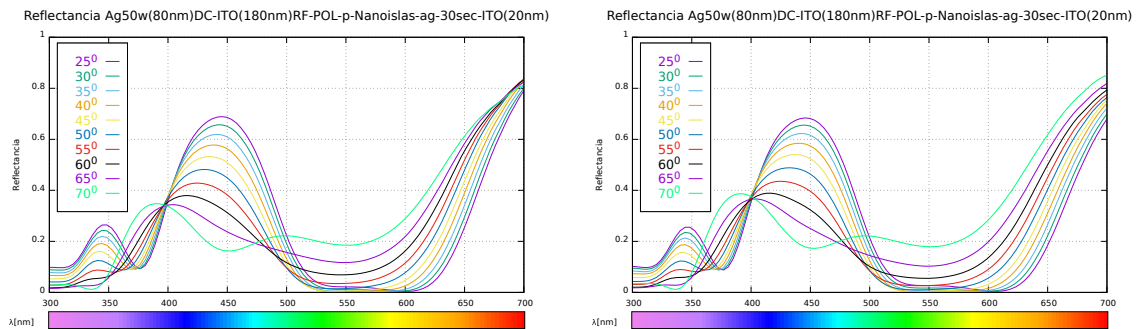


Figure 3.73: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

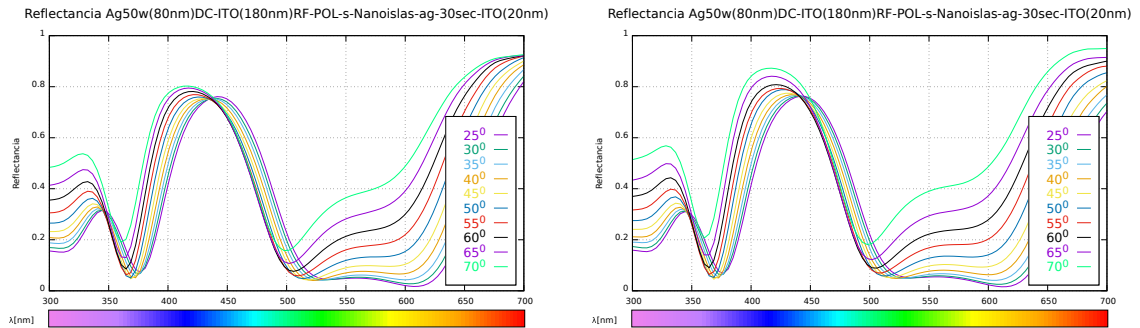


Figure 3.74: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras de 30 segundos de ITO.

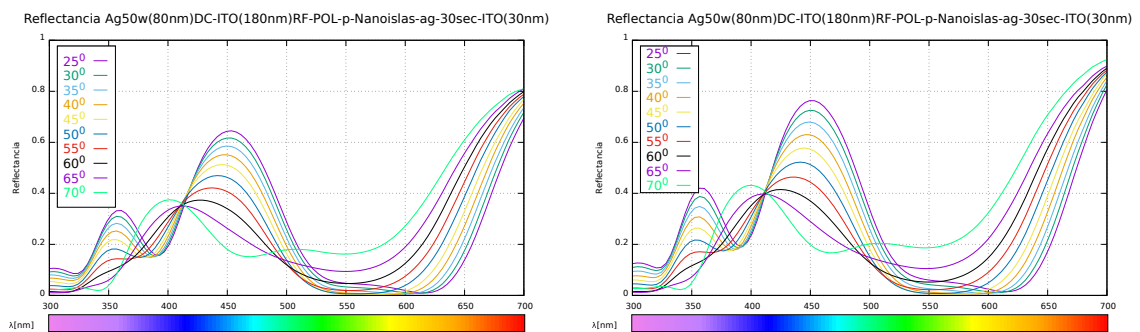


Figure 3.75: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

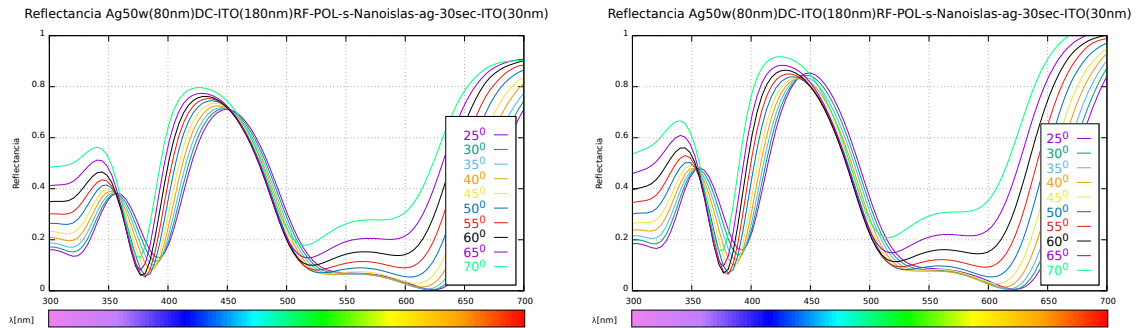


Figure 3.76: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

Muestra 7: Vidrio-Nano islas de Ag (30sec) + ITO(0-10-20-30 nm)

Dos muestras 0 [nm] de ITO.

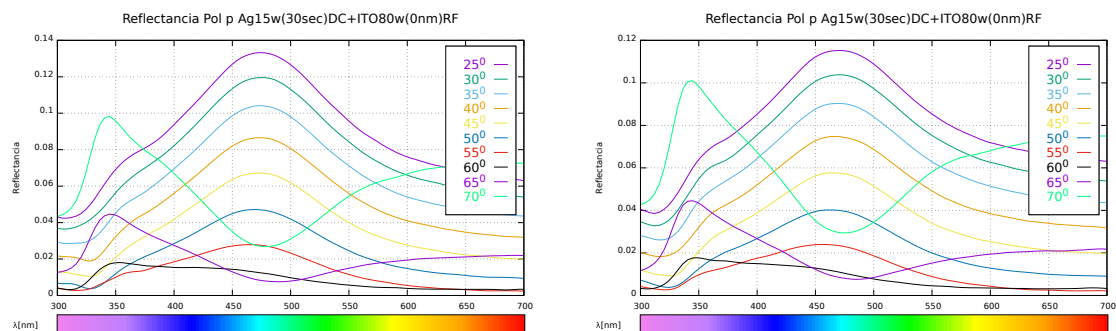


Figure 3.77: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

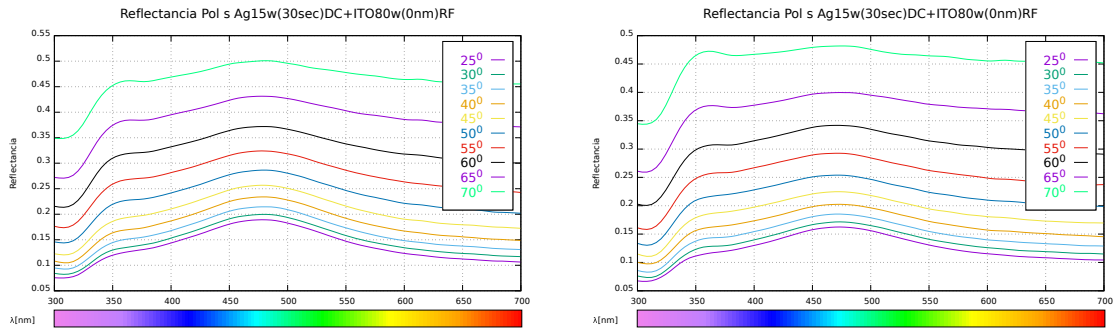


Figure 3.78: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras 10 [nm] de ITO.

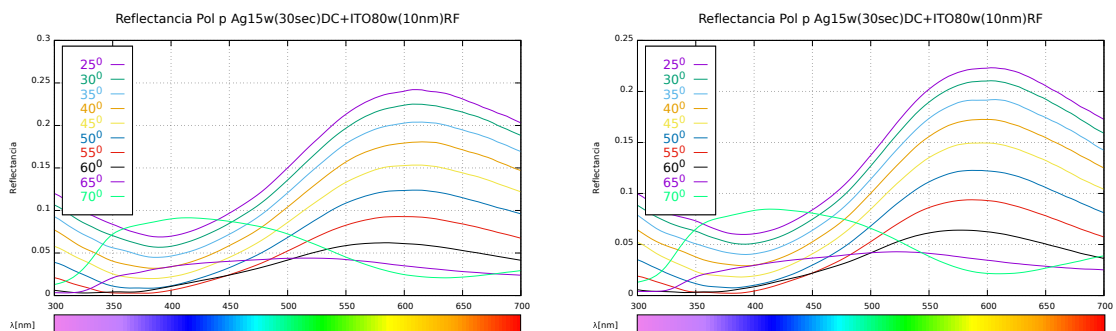


Figure 3.79: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(10nm)

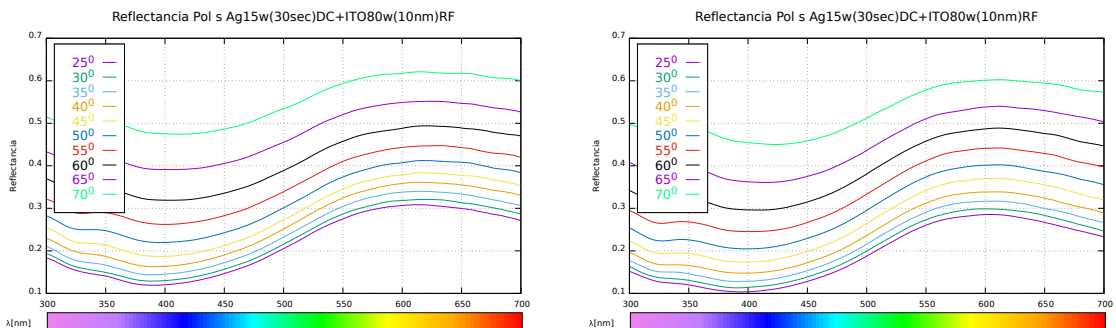


Figure 3.80: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(10nm)

Dos muestras 20 [nm] de ITO.

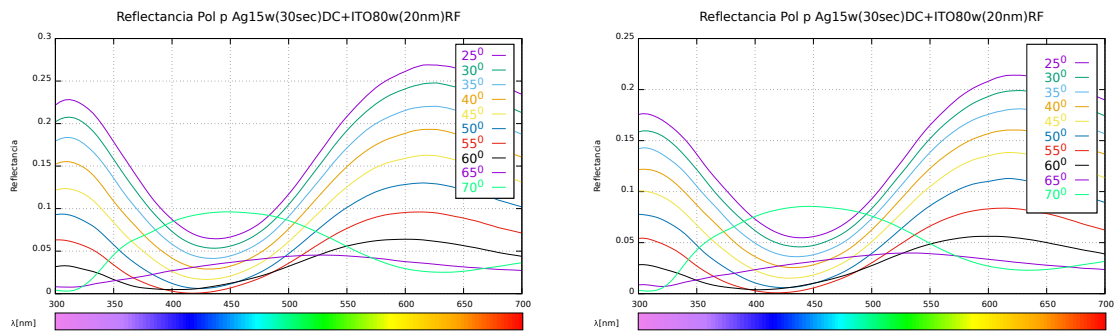


Figure 3.81: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(20nm)

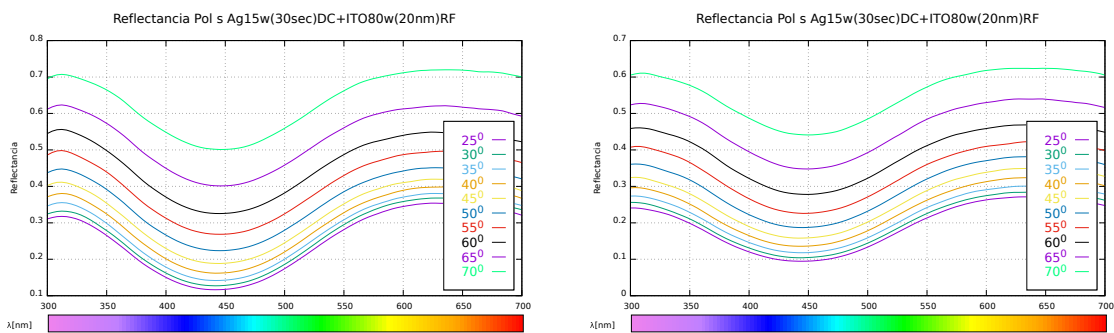


Figure 3.82: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(20nm)

Dos muestras 30 [nm] de ITO.

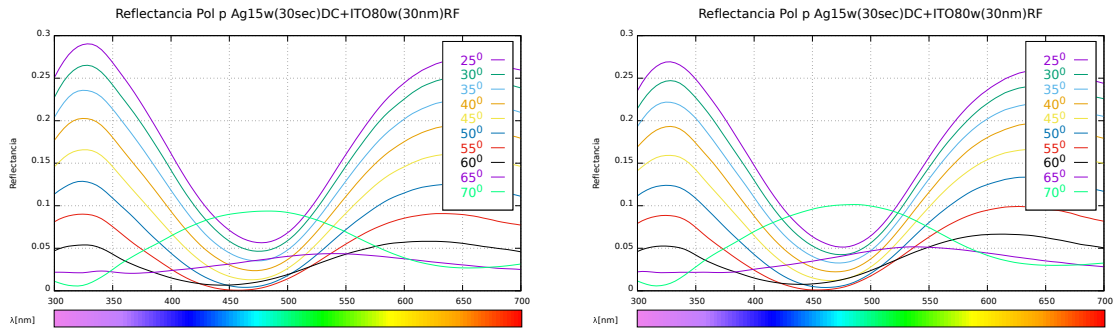


Figure 3.83: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(30nm)

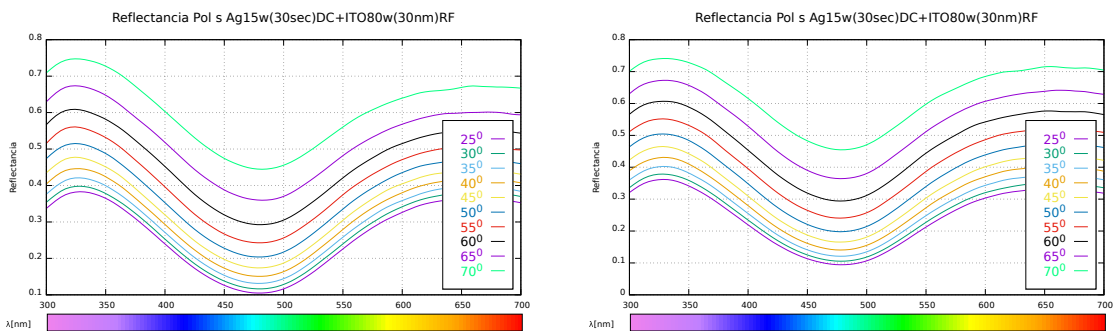


Figure 3.84: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (30 segundos)-ITO(30nm)

Muestra 8: Vidrio-Nano islas de Ag (40sec) + ITO(0-10-20-30 nm)

Dos muestras 0 [nm] de ITO.

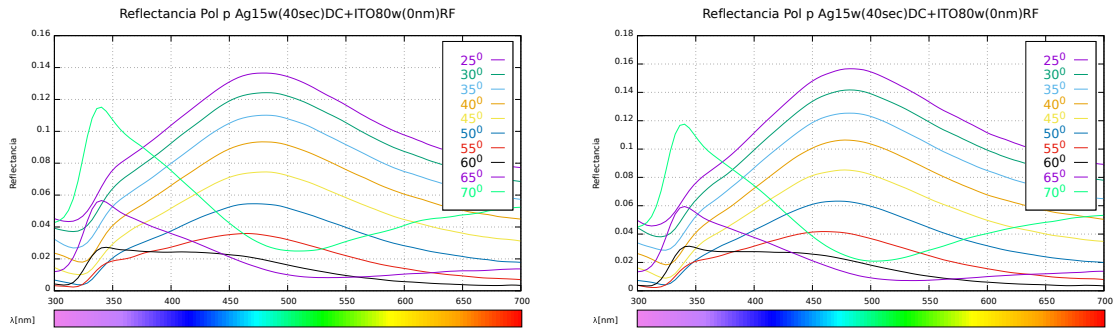


Figure 3.85: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(0nm)

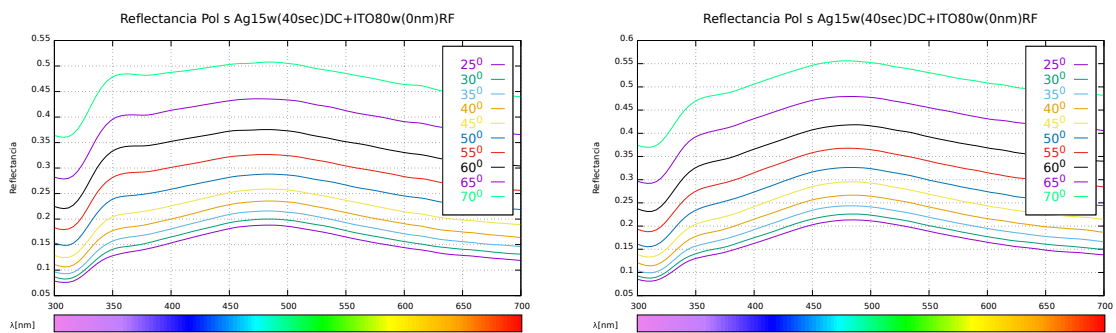


Figure 3.86: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(0nm)

Dos muestras 10 [nm] de ITO.

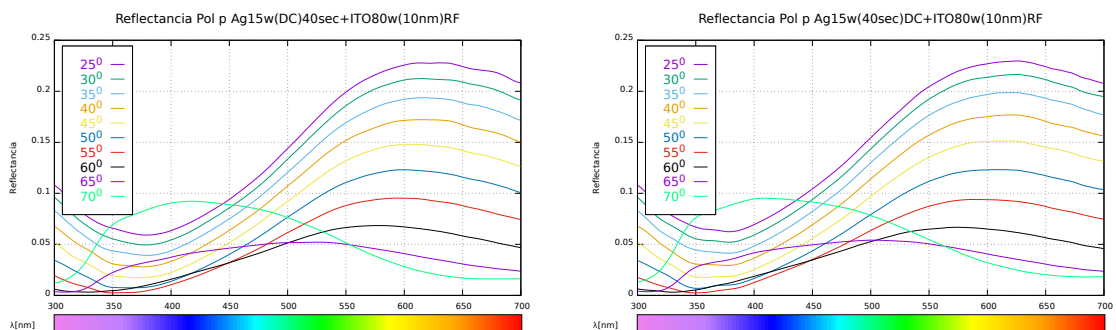


Figure 3.87: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(10nm)

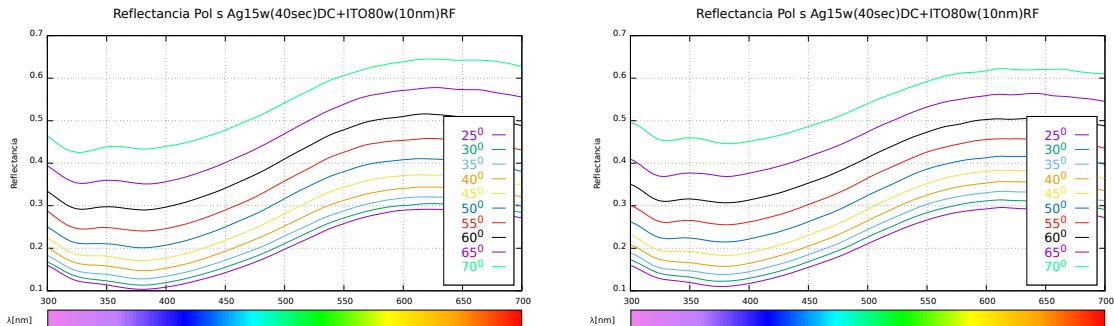


Figure 3.88: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(10nm)

Dos muestras 20 [nm] de ITO.

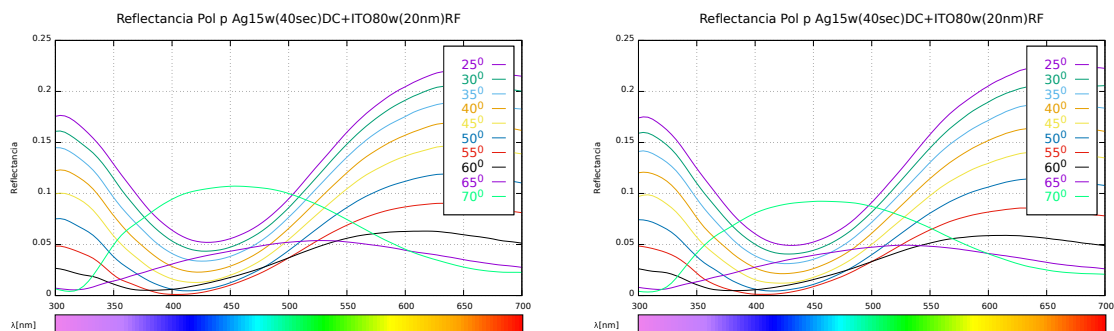


Figure 3.89: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(20nm)

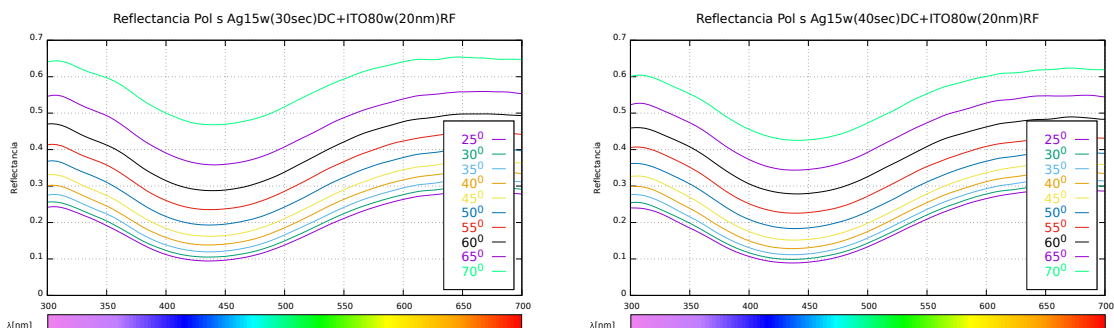


Figure 3.90: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(20nm)

Dos muestras 30 [nm] de ITO.

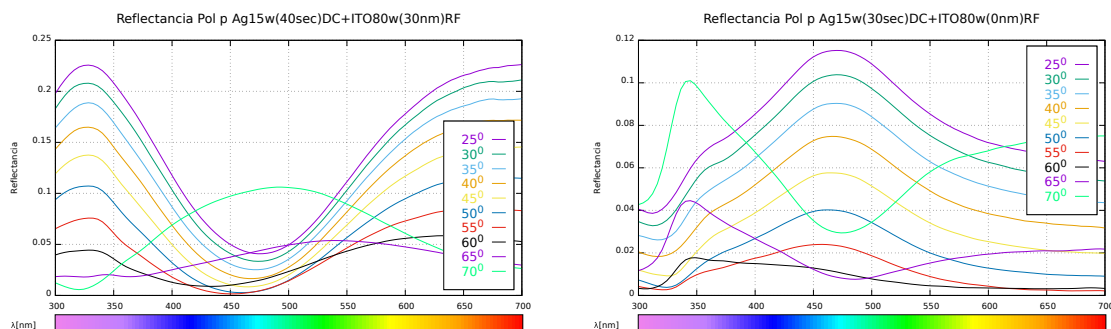


Figure 3.91: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(30nm)

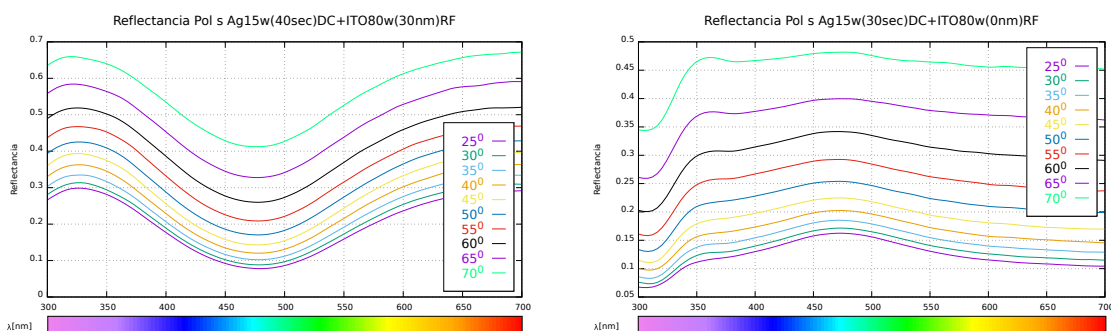


Figure 3.92: Espectro de Reflectancia de una muestra de Vidrio-Ag-ITO-Nano islas (40 segundos)-ITO(30nm)

Los ángulos elipsométricos de las primeras muestras se muestran en el Anéxo 6

3.3 Resultados Obtenidos por Microscopía de Fuerza Atómica

Las muestras candidatas para el análisis AFM fueron: Vidrio-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos. Es decir, las muestras 15,25,35 y 45 segundos no se realizaron análisis AFM.

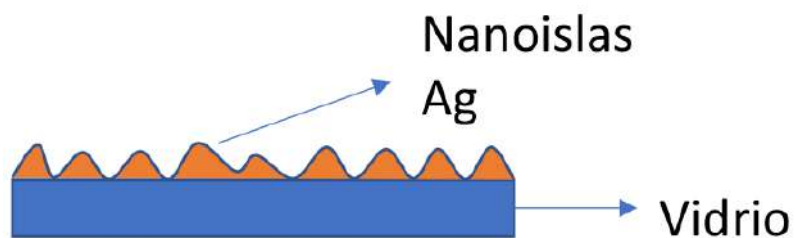
Muestra 1

Figure 3.93: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Nano islas de Ag (10-50 seg en pasos de 5 segundos).



Figure 3.94: Foto de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 10-15-20 segundos, respectivamente.

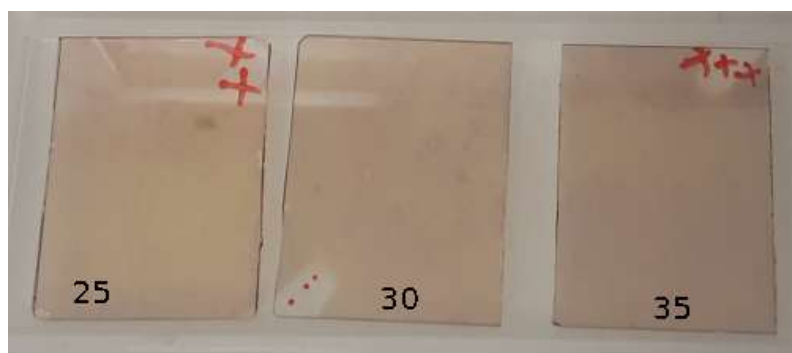


Figure 3.95: Foto de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 25-30-35 segundos, respectivamente.



Figure 3.96: Foto de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 40-45-50 segundos, respectivamente.

10 Segundos

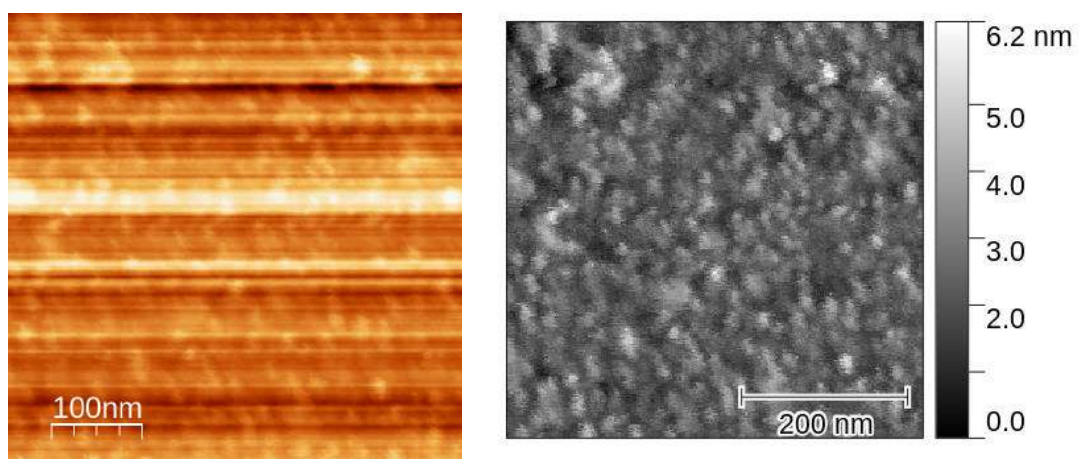


Figure 3.97: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 10 sec obtenida por AFM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida por el software del AFM(WSxM) sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software (WSxM y Gwyddion)

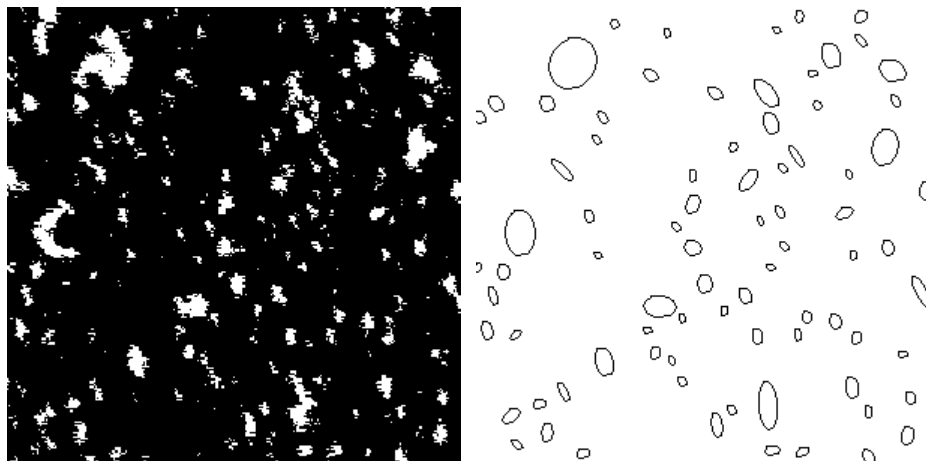
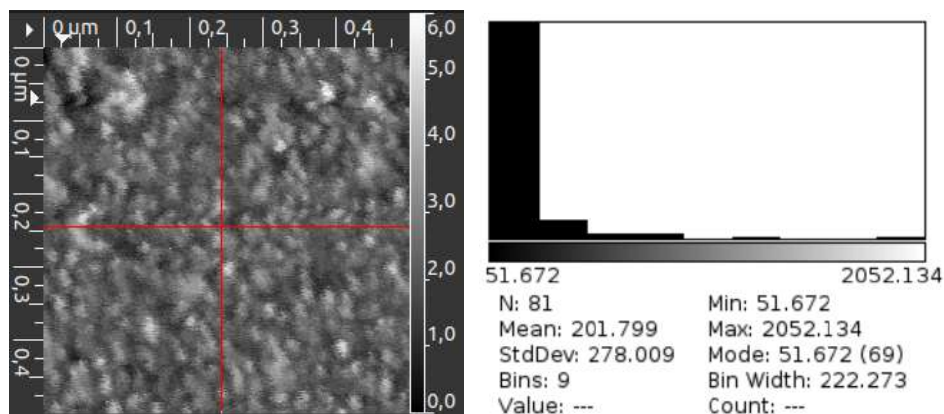


Figure 3.98: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 10 sec. En el lado izquierdo se observa la imagen tratada por el software ImagenJ en blanco y negro(8-bites), Brightness/contrast 35 min-242max, Threshold 130. En el lado derecho se observa la misma imagen con la opción de analyze particles (size 50-infinity nm^2 , show-ellipses)



Perfil Horizontal y Vertical

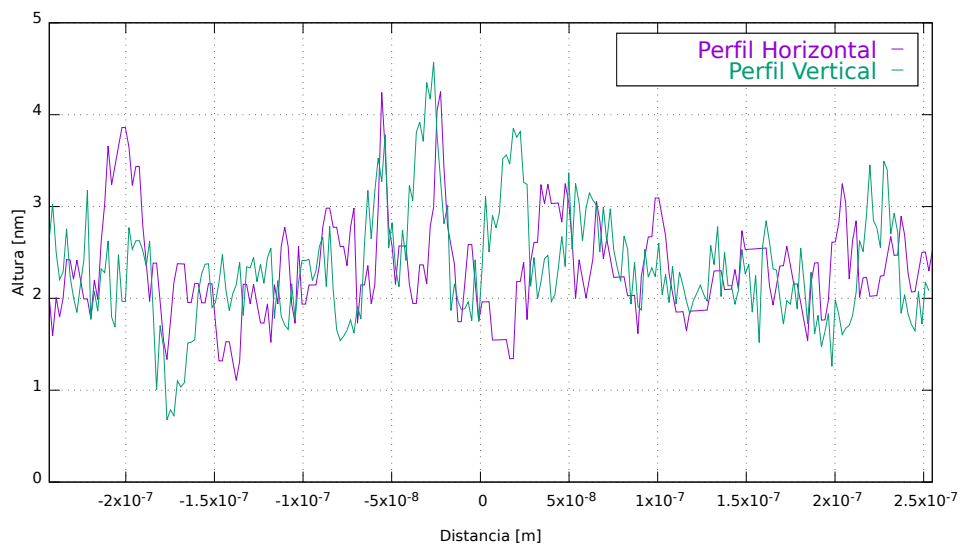


Figure 3.99: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag (15w-DC)10 sec. En la parte superior izquierda se observa el trazo del perfil de una línea horizontal y vertical. En la parte superior derecha se observa el histograma de la distribución del área. Y en la parte inferior, se observa el gráfico del perfil de las líneas horizontal y vertical.

20 Segundos

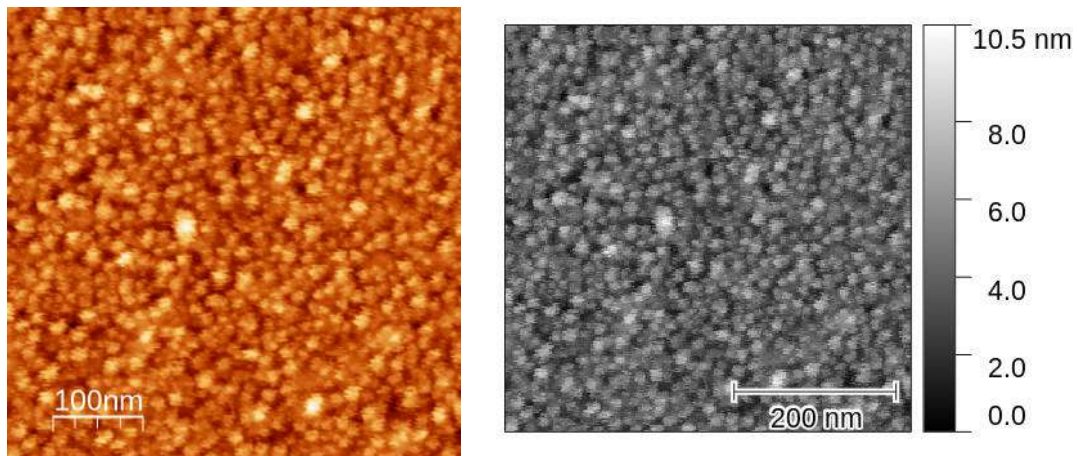


Figure 3.100: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 20 segundos obtenida por AFM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida por el software del AFM(WSxM) sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software (WSxM y Gwyddion)

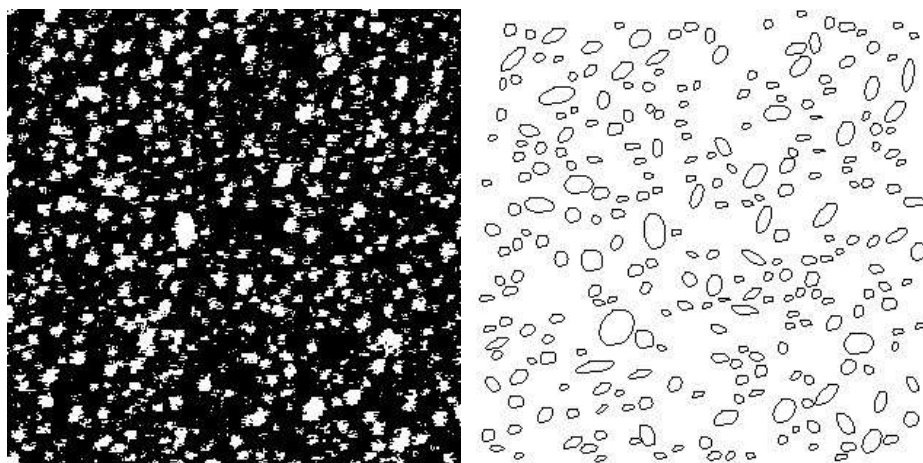
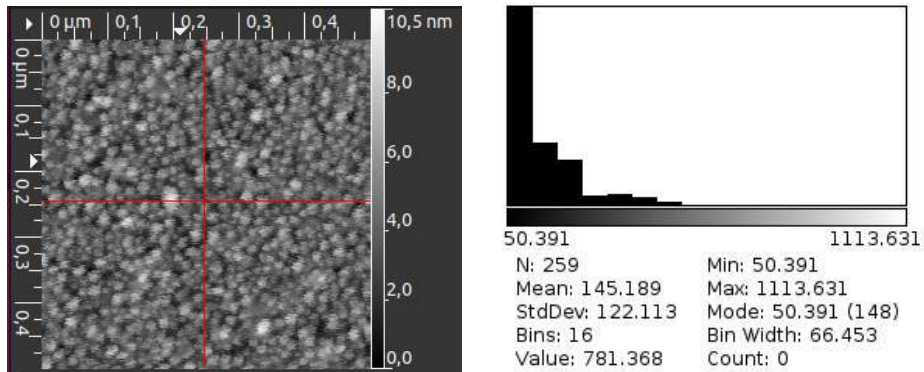


Figure 3.101: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 20 segundos. En el lado izquierdo se observa la imagen tratada por el software ImagenJ en blanco y negro(8-bites), Brightness/contrast 35 min-242max, Threshold 130. En el lado derecho se observa la misma imagen con la opción de analyze particles (size 50-infinity nm^2 , show-ellipses)



Perfil Horizontal y Vertical

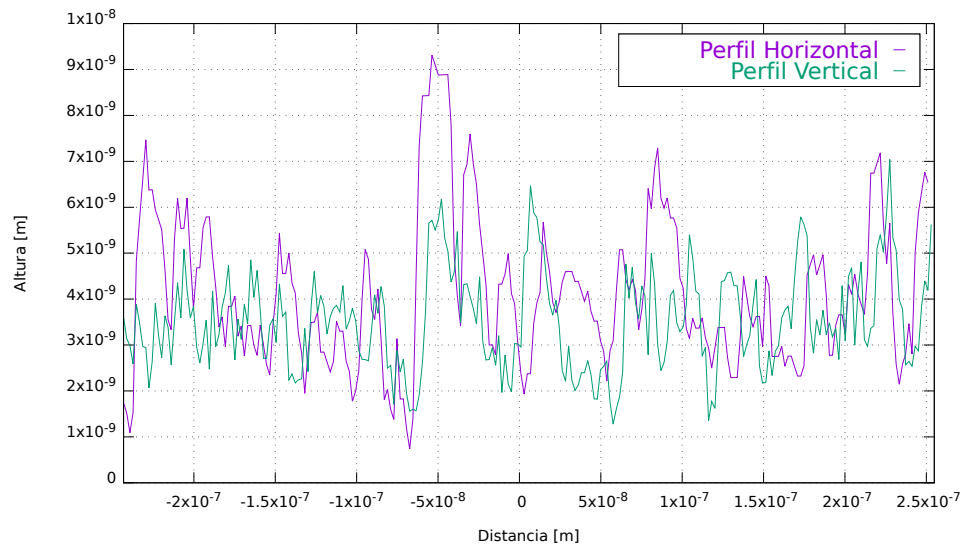


Figure 3.102: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag (15w-DC)20 segundos. En la parte superior izquierda se observa el trazo del perfil de una línea horizontal y vertical. En la parte superior derecha se observa el histograma de la distribución del área. Y en la parte inferior, se observa el gráfico del perfil de las líneas horizontal y vertical.

30 Segundos

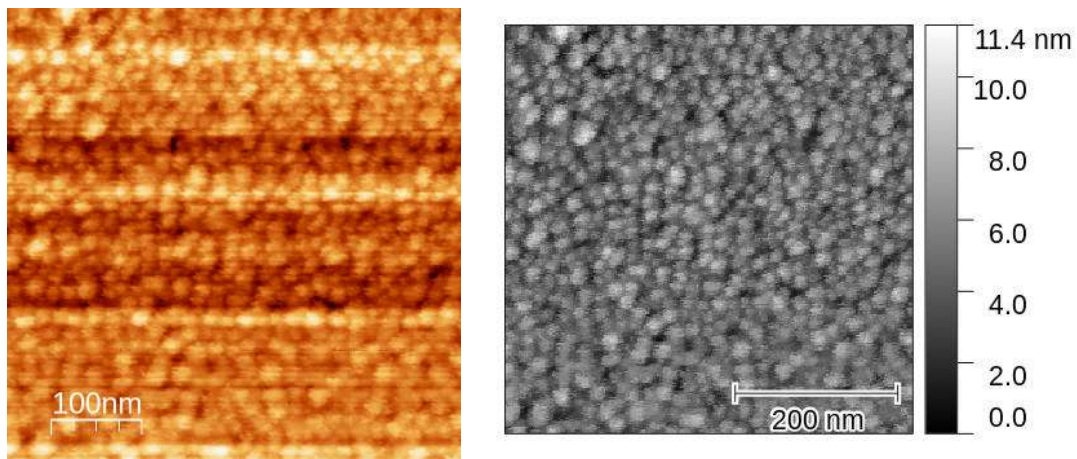


Figure 3.103: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 30 segundos obtenida por AFM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida por el software del AFM(WSxM) sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software (WSxM y Gwyddion)

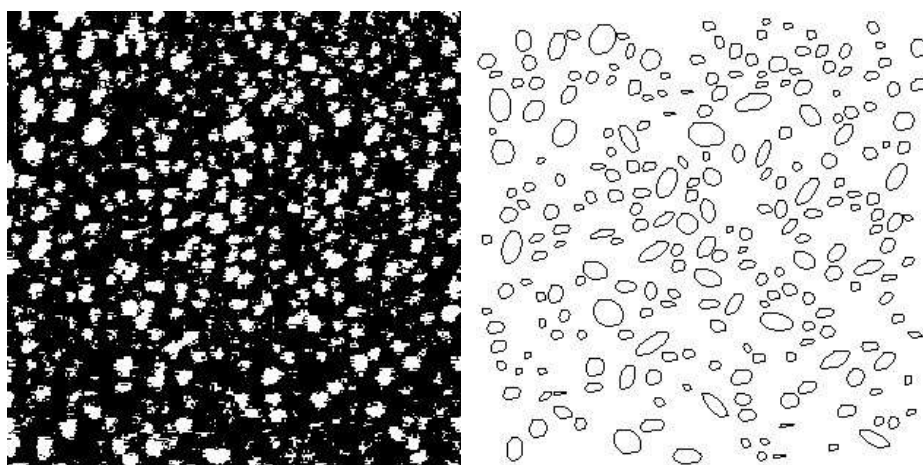
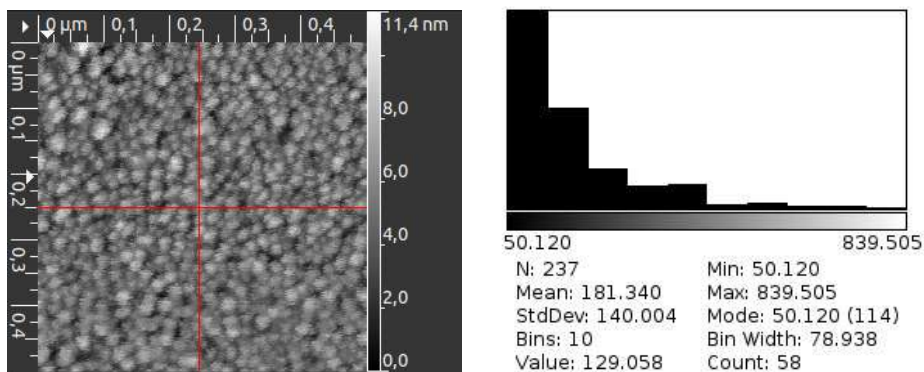


Figure 3.104: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 30 segundos. En el lado izquierdo se observa la imagen tratada por el software ImagenJ en blanco y negro(8-bites), Brightness/contrast 35 min-242max, Threshold 130. En el lado derecho se observa la misma imagen con la opción de analyze particles (size 50-infinity nm^2 , show-ellipses)



Perfil Horizontal y Vertical

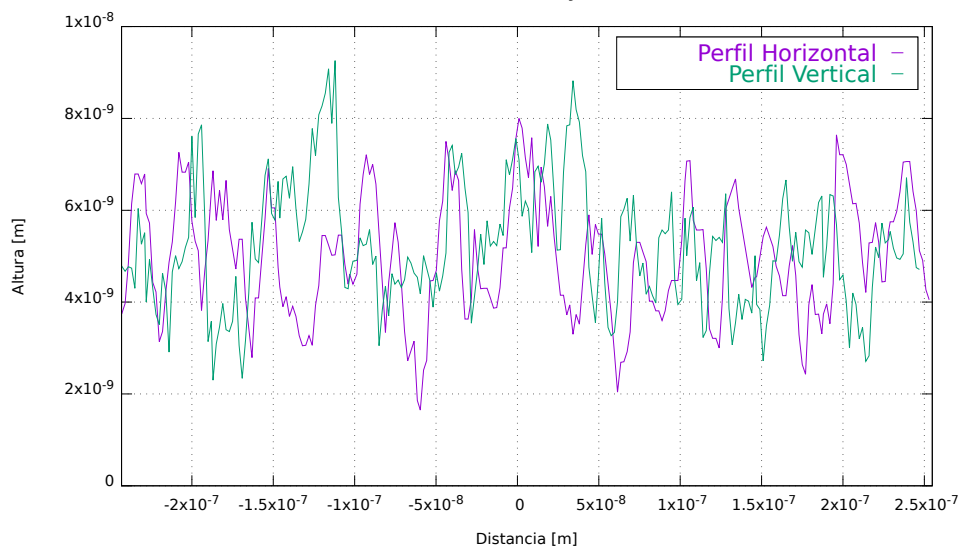


Figure 3.105: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag (15w-DC)30 segundos. En la parte superior izquierda se observa el trazo del perfil de una línea horizontal y vertical. En la parte superior derecha se observa el histograma de la distribución del área. Y en la parte inferior, se observa el gráfico del perfil de las líneas horizontal y vertical.

40 Segundos

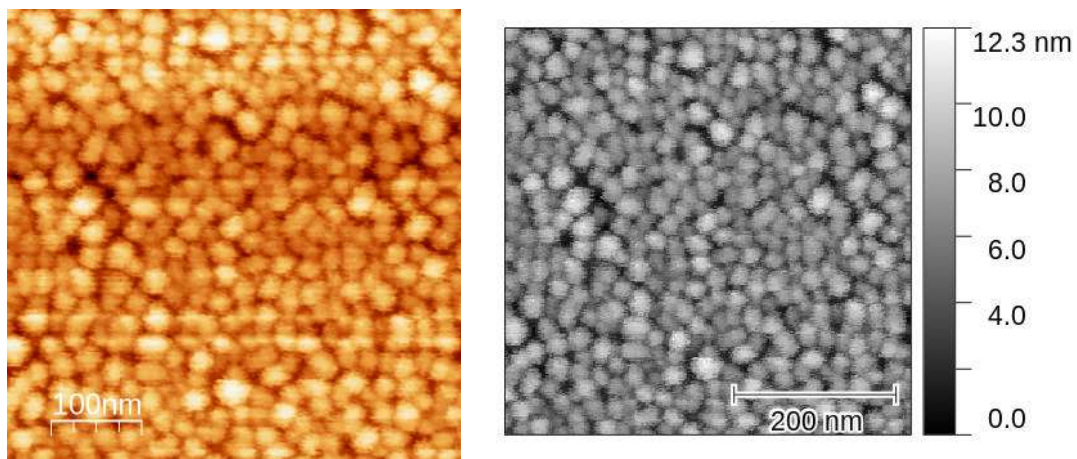


Figure 3.106: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 40 segundos obtenida por AFM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida por el software del AFM(WSxM) sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software (WSxM y Gwyddion)

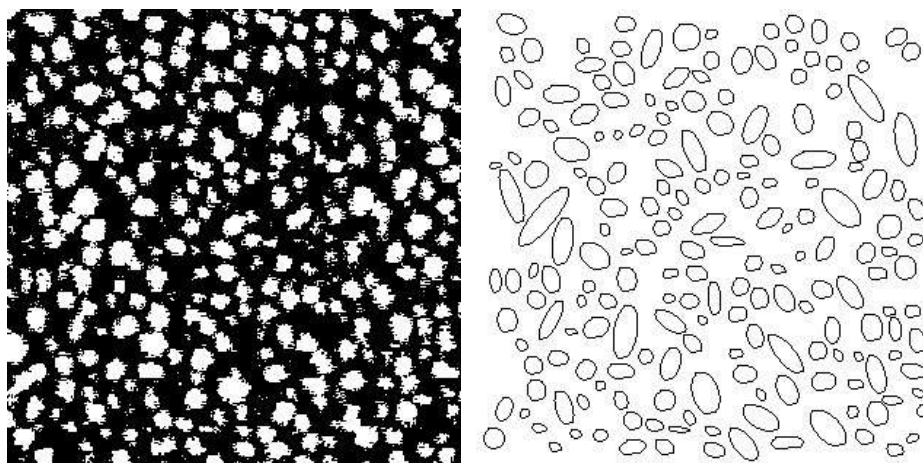
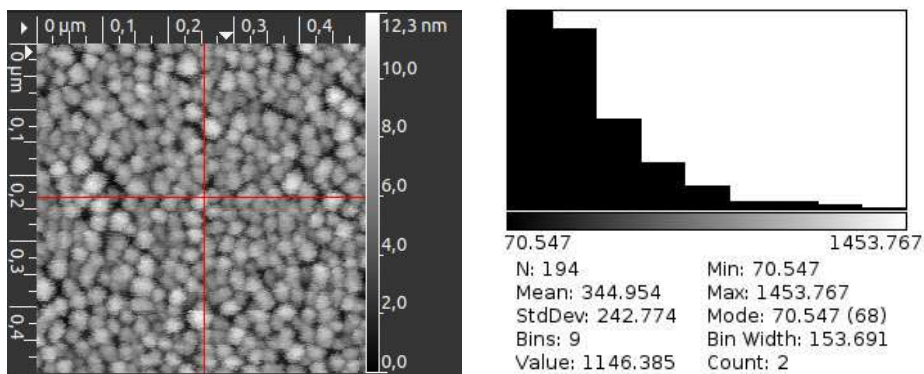


Figure 3.107: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 40 segundos. En el lado izquierdo se observa la imagen tratada por el software ImagenJ en blanco y negro(8-bites), Brightness/contrast 35 min-242max, Threshold 130. En el lado derecho se observa la misma imagen con la opción de analyze particles (size 50-infinity nm^2 , show-ellipses)



Perfil Horizontal y Vertical

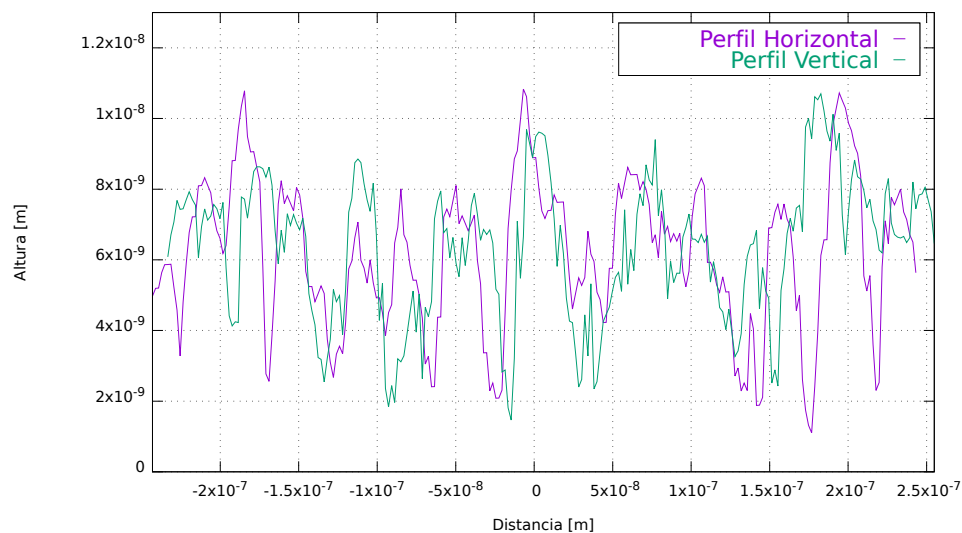


Figure 3.108: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag (15w-DC)40 segundos. En la parte superior izquierda se observa el trazo del perfil de una línea horizontal y vertical. En la parte superior derecha se observa el histograma de la distribución del área. Y en la parte inferior, se observa el gráfico del perfil de las líneas horizontal y vertical.

50 Segundos

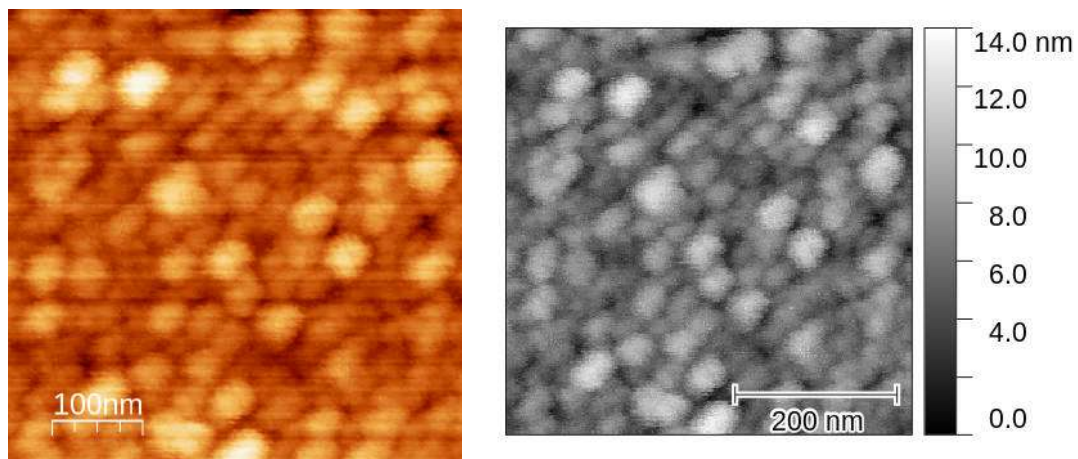


Figure 3.109: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 50 segundos obtenida por AFM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida por el software del AFM(WSxM) sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software (WSxM y Gwyddion)

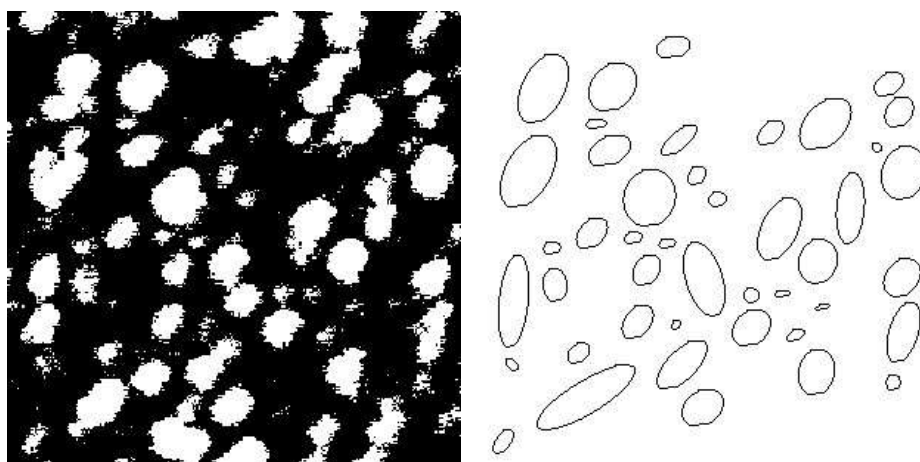


Figure 3.110: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 50 segundos. En el lado izquierdo se observa la imagen tratada por el software ImagenJ en blanco y negro(8-bites), Brightness/contrast 35 min-242max, Threshold 130. En el lado derecho se observa la misma imagen con la opción de analyze particles (size 50-infinity nm^2 , show-ellipses)

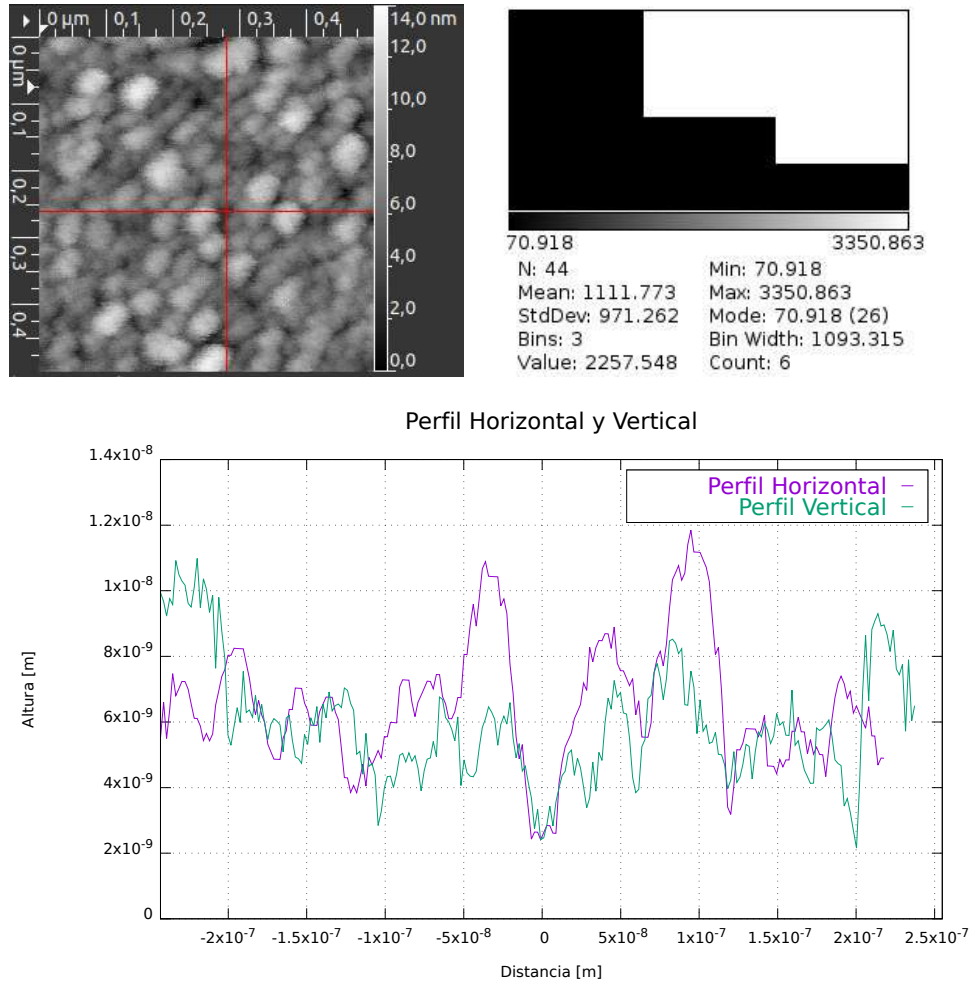


Figure 3.111: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag (15w-DC)50 segundos. En la parte superior izquierda se observa el trazo del perfil de una línea horizontal y vertical. En la parte superior derecha se observa el histograma de la distribución del área. Y en la parte inferior, se observa el gráfico del perfil de las líneas horizontal y vertical.

3.4 Resultados Obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Se utilizó la técnica SEM para observar la morfología de las Muestras Vidrio-Ag(80nm)-ITO(180nm)-Nano Islas de Ag de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos.

Muestra 2

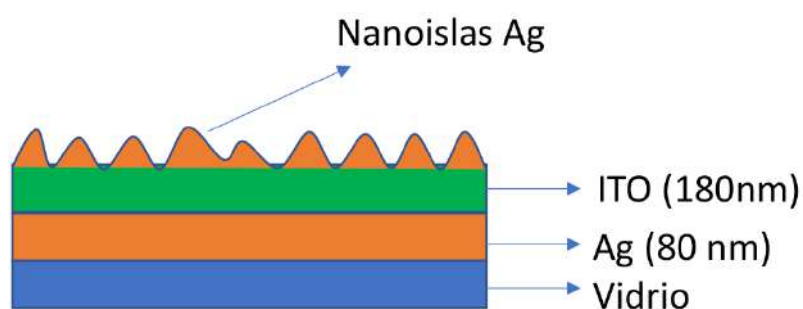


Figure 3.112: Bosquejo de las muestras de Vidrio-Ag(80nm)+ITO(180nm)-Nano islas de 10 a 50 segundos en pasos de 10 segundos.

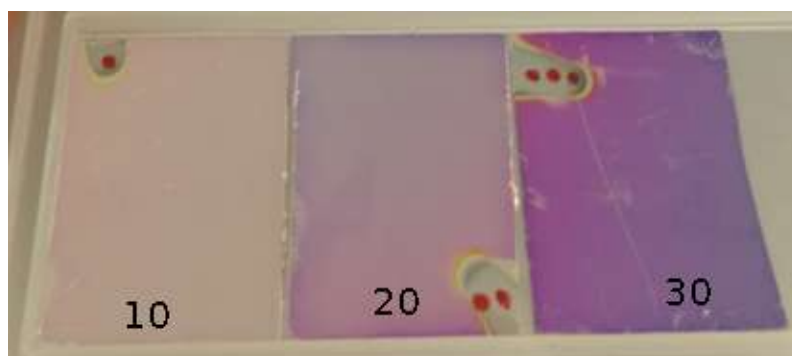


Figure 3.113: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 10-20-30 segundos, respectivamente.

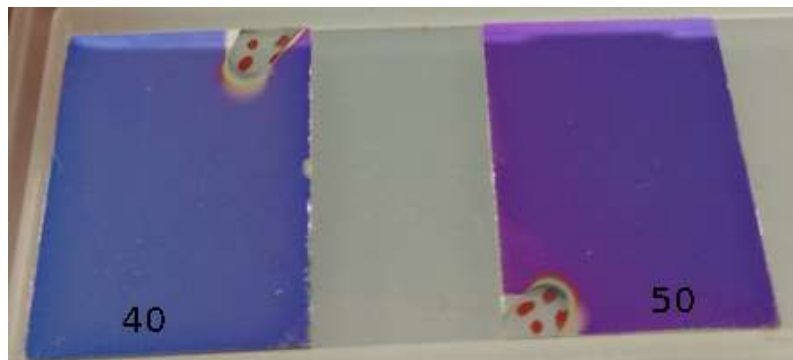


Figure 3.114: Foto de las muestras de Vidrio-Ag-ITO-Nanoislas de Ag de 40-50 segundos, respectivamente.

10 Segundos

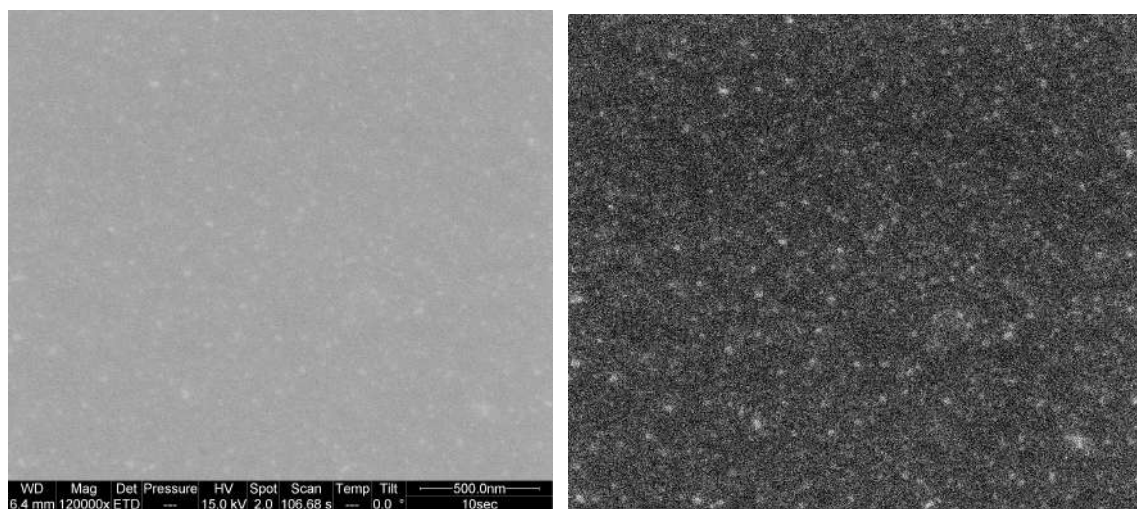


Figure 3.115: Muestra Vidrio-Ag-ITO-Nano islas de Ag(15w-DC) para 10 segundos obtenida por SEM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software ImagenJ

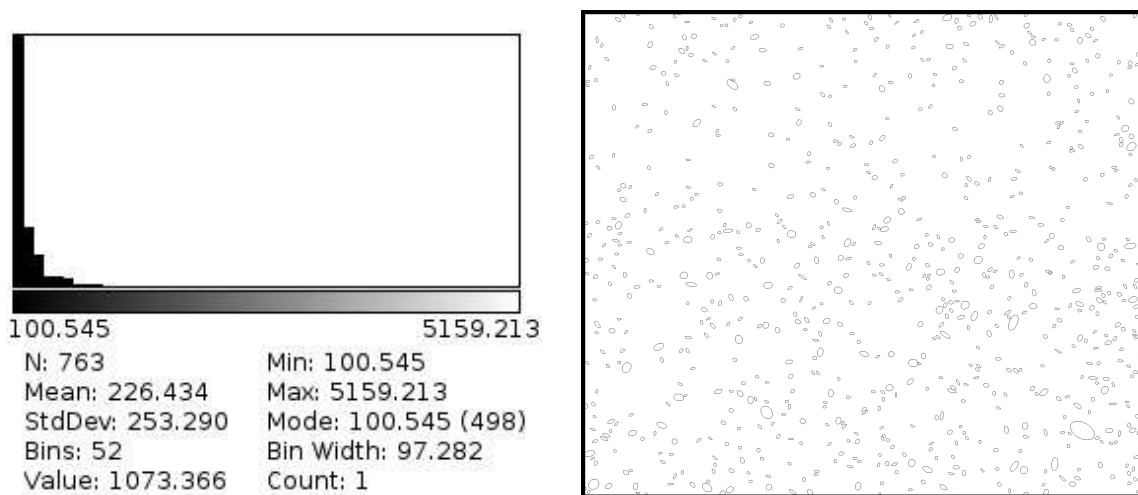


Figure 3.116: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 10 segundos. En el lado izquierdo se observa el histograma de la distribución de área. En el lado derecho se observa la imagen con la opción de analyze particles (size 10-infinity nm^2)

20 Segundos

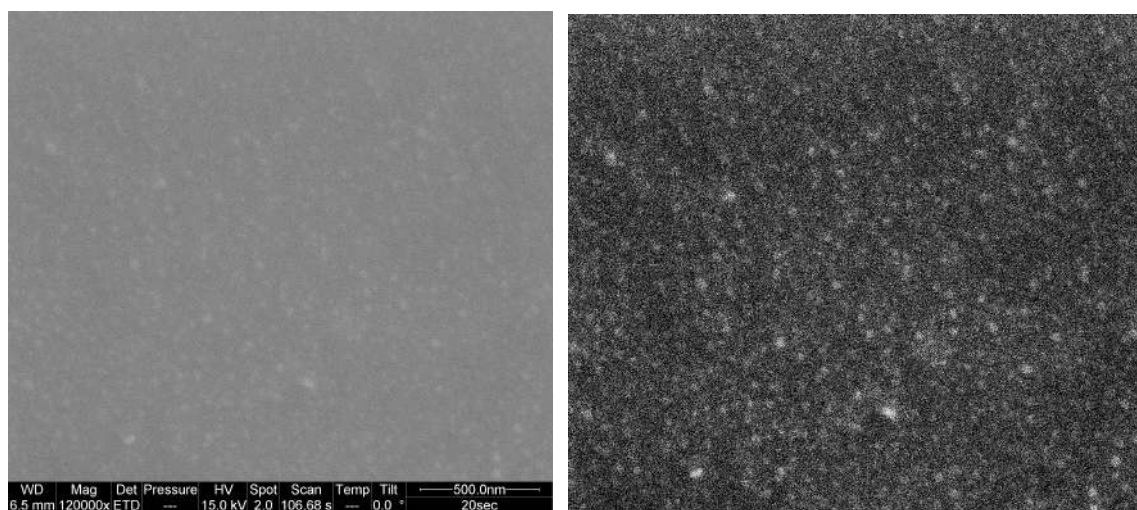


Figure 3.117: Muestra Vidrio-Ag-ITO-Nano islas de Ag(15w-DC) para 20 segundos obtenida por SEM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software ImagenJ

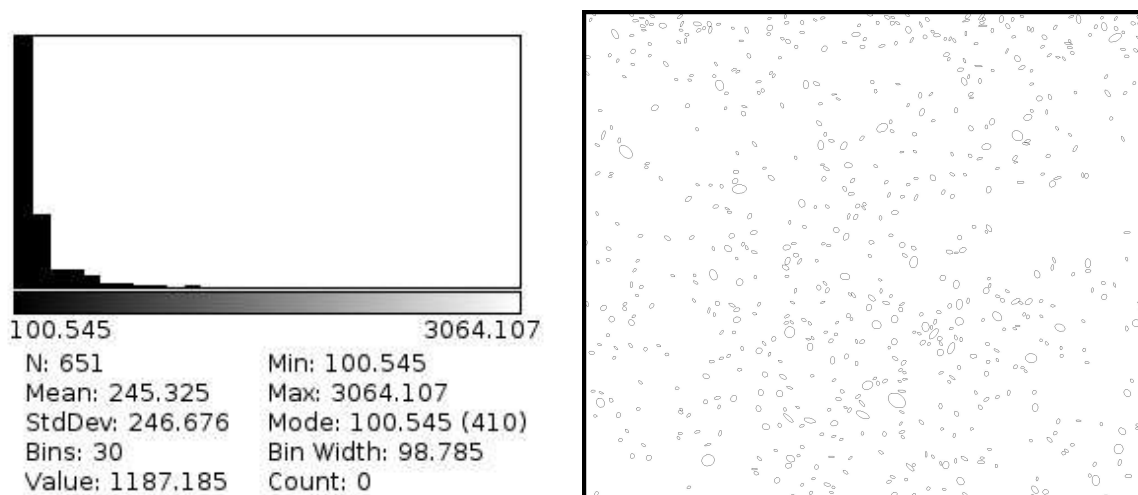


Figure 3.118: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 20 segundos. En el lado izquierdo se observa el histograma de la distribución de área. En el lado derecho se observa la imagen con la opción de analyze particles (size 15-infinity nm^2)

30 Segundos

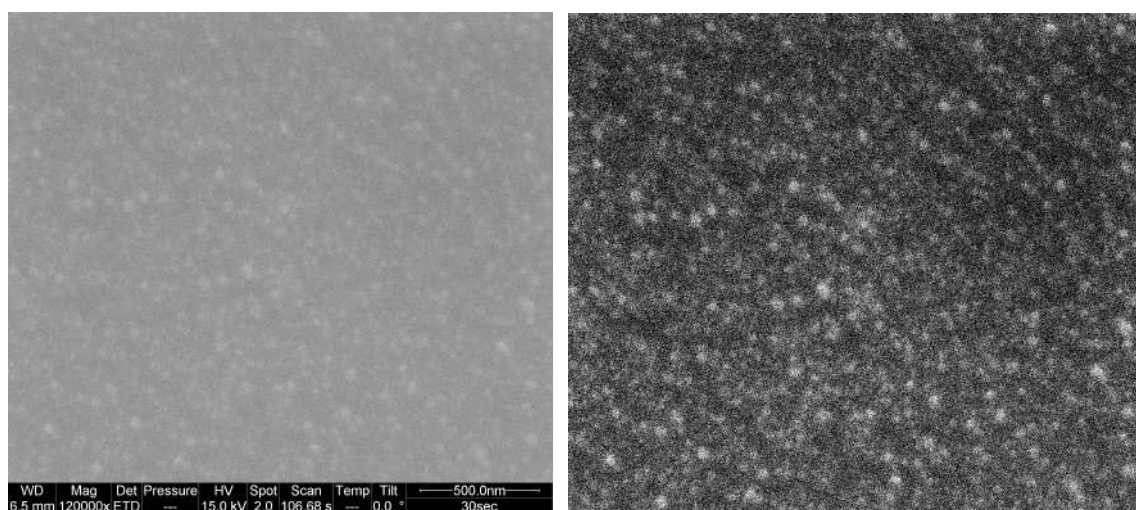


Figure 3.119: Muestra Vidrio-Ag-ITO-Nano islas de Ag(15w-DC) para 30 segundos obtenida por SEM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software ImagenJ

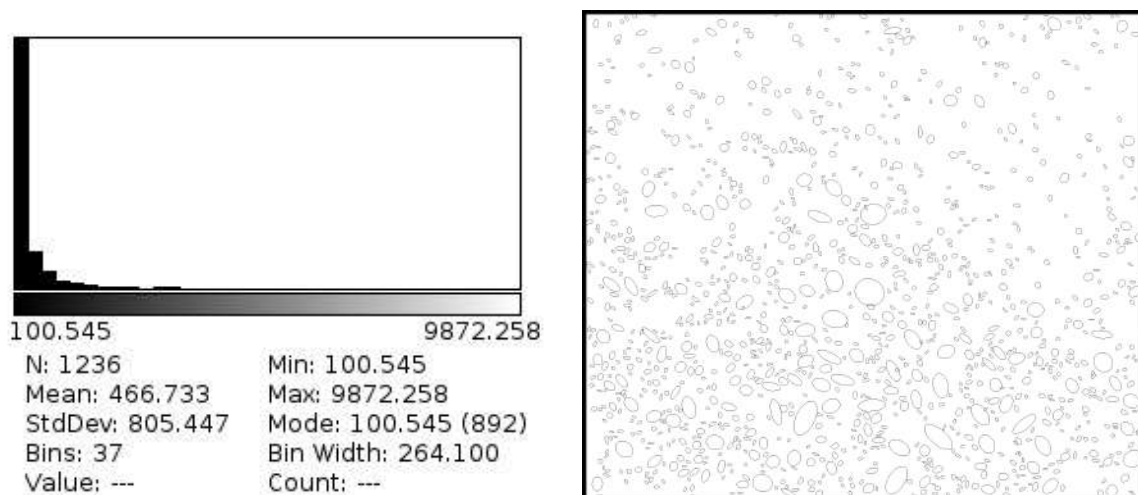


Figure 3.120: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 30 segundos. En el lado izquierdo se observa el histograma de la distribución de área. En el lado derecho se observa la imagen con la opción de analyze particles (size 20-infinity nm^2)

40 Segundos

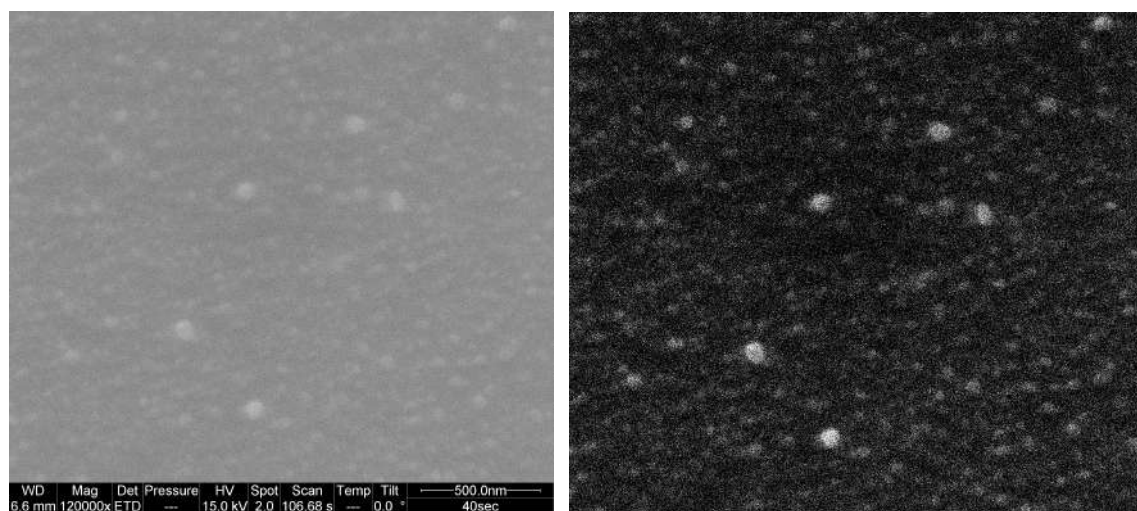


Figure 3.121: Muestra Vidrio-Ag-ITO-Nano islas de Ag(15w-DC) para 40 segundos obtenida por SEM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software ImagenJ

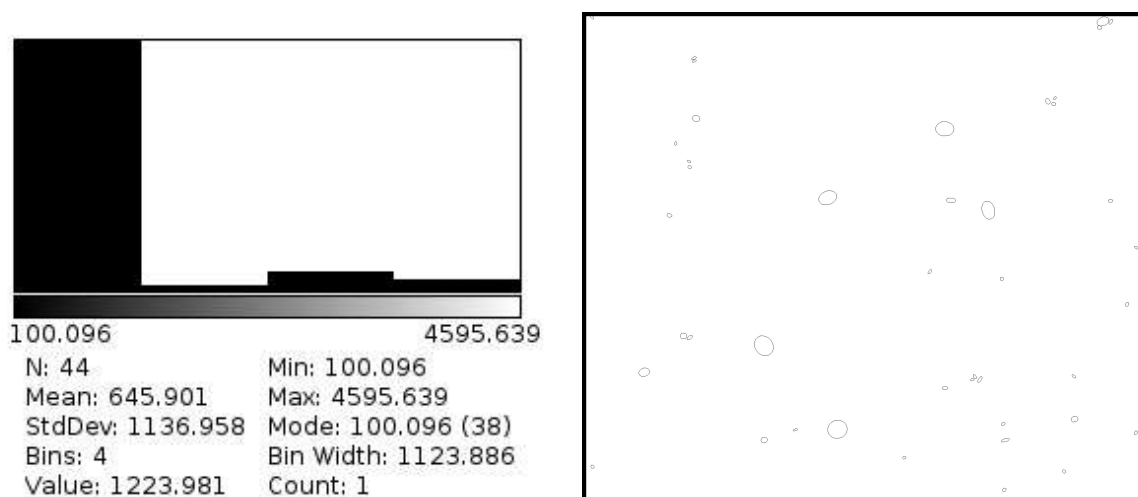


Figure 3.122: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 40 segundos. En el lado izquierdo se observa el histograma de la distribución de área. En el lado derecho se observa la imagen con la opción de analyze particles (size 30-infinity nm^2)

50 Segundos

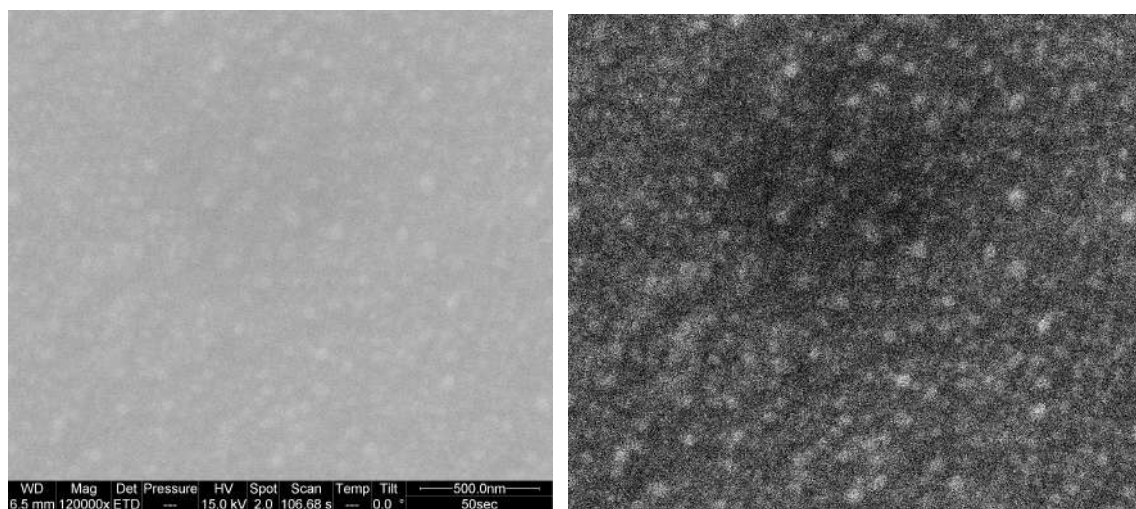


Figure 3.123: Muestra Vidrio-Ag-ITO-Nano islas de Ag(15w-DC) para 50 segundos obtenida por SEM. En el lado izquierdo se observa la imagen obtenida sin procesar. En el lado derecho se observa la imagen procesada por el software ImagenJ

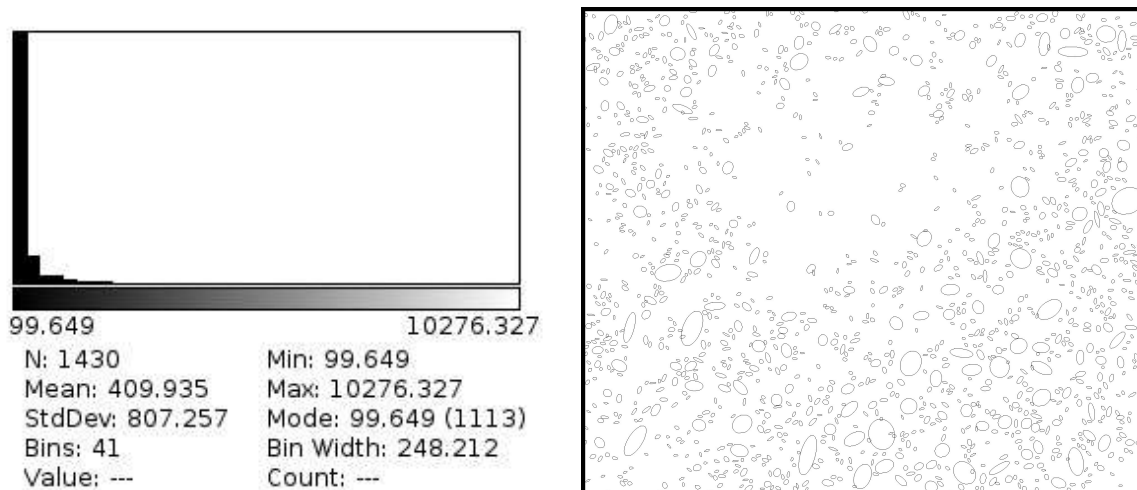


Figure 3.124: Muestra Vidrio-Nano islas de Ag(15w-DC) 50 segundos. En el lado izquierdo se observa el histograma de la distribución de área. En el lado derecho se observa la imagen con la opción de analyze particles (size 50-infinity nm^2)

3.5 Análisis de Reconocimiento

En la presente sección se va a presentar los resultados obtenidos por el software de reconocimiento descrito en la sección 3.5. Las muestras candidatas para el análisis son: las formadas por Vidrio+Nano-Islas de Ag (10-50 segundos) 3.1 y las formadas por Vidrio+Ag(80nm)+ITO(150NM)+Nano-Islas Ag(10 a 50 seg) 3.1. El análisis morfológico de las primeras muestras se las realizó con el AFM 1.6 y el análisis morfológico de las segundas muestras se las realizó mediante el SEM 1.7.

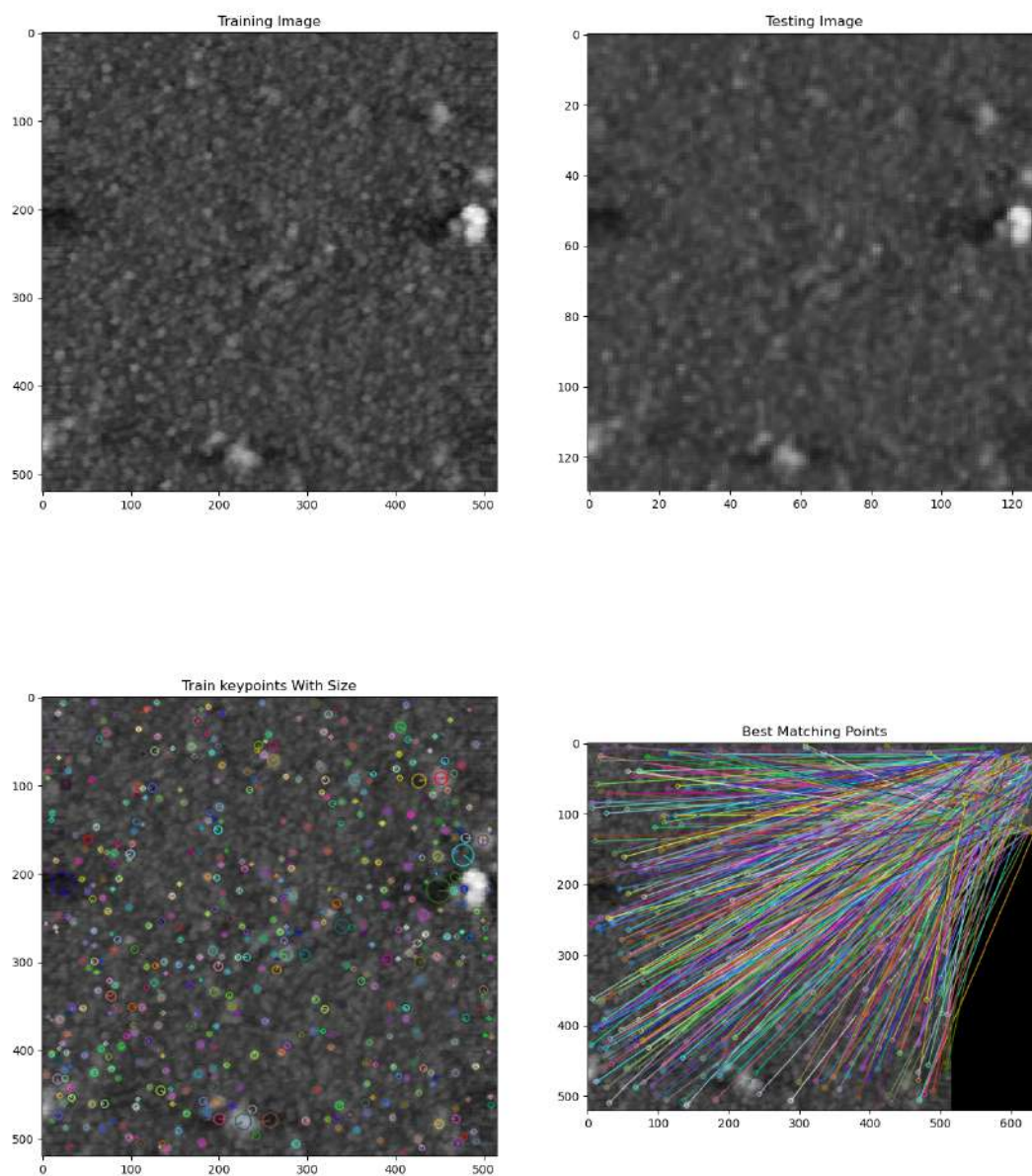
Muestra 1: Vidrio+Nano-Islas de Ag (10-50 segundos)

Figure 3.125: Muestra Vidrio-Nano islas de 10 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 0 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

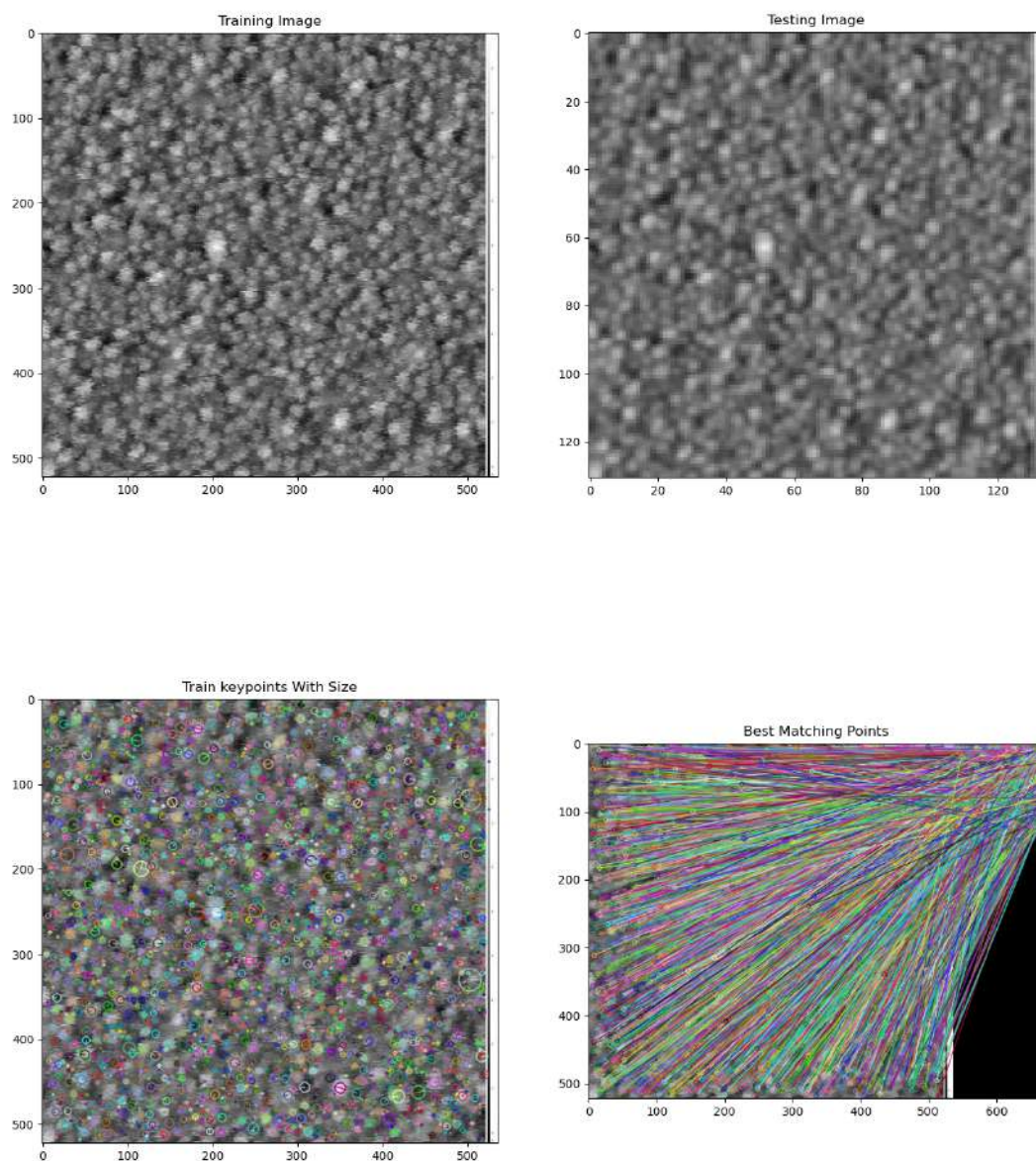


Figure 3.126: Muestra Vidrio-Nano islas de 20 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 0 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

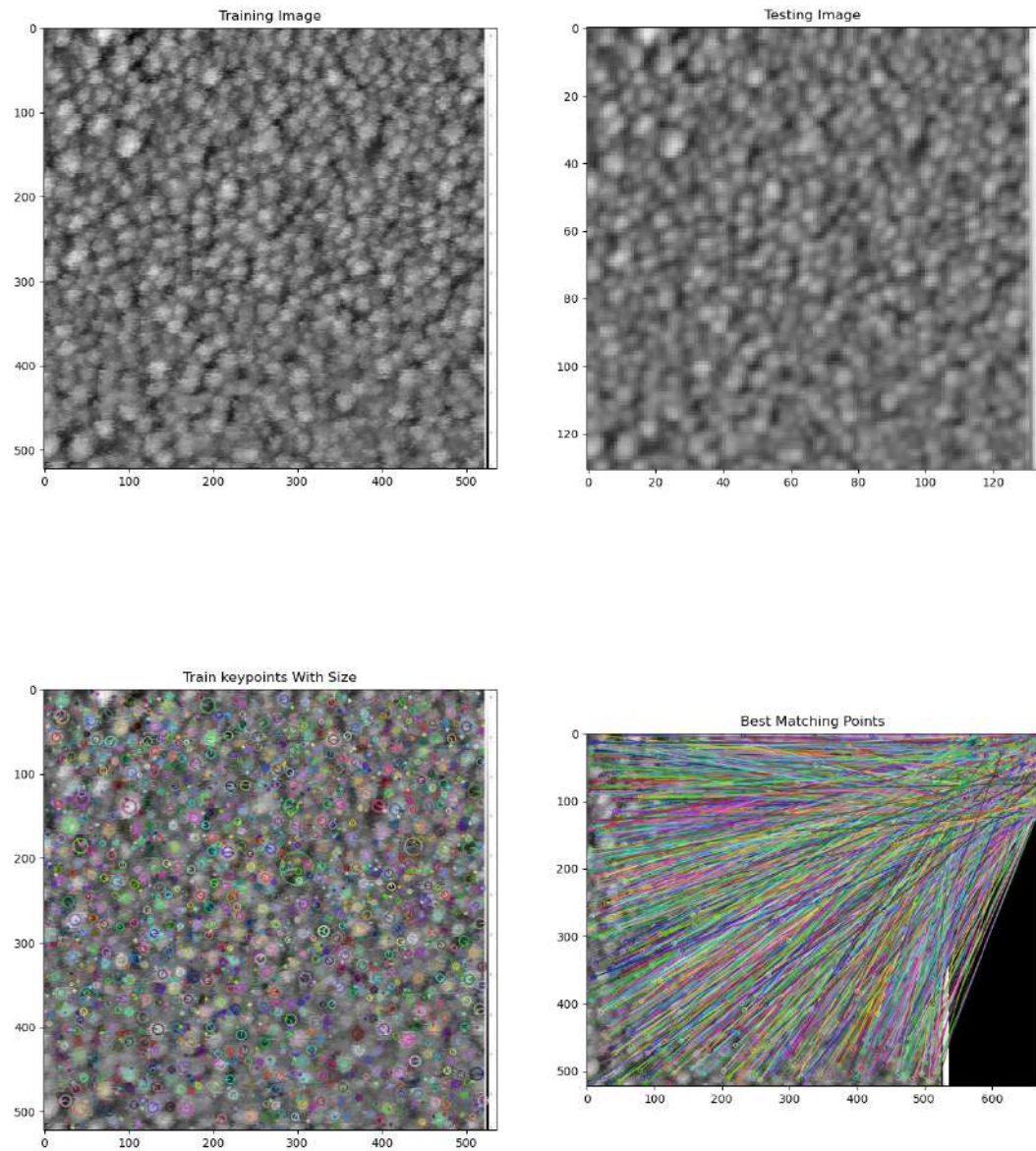


Figure 3.127: Muestra Vidrio-Nano islas de 30 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 0 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

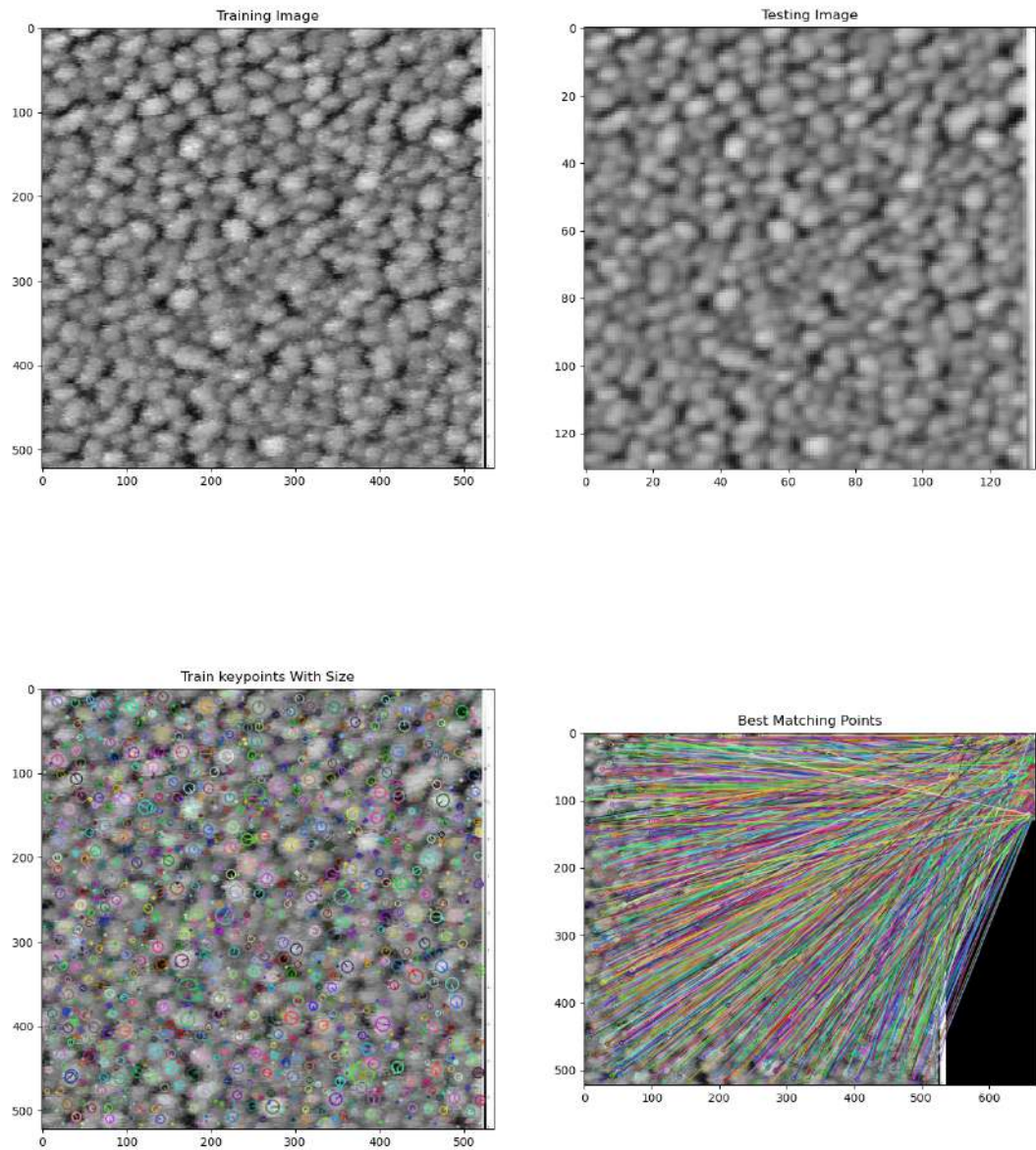


Figure 3.128: Muestra Vidrio-Nano islas de 40 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 0 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

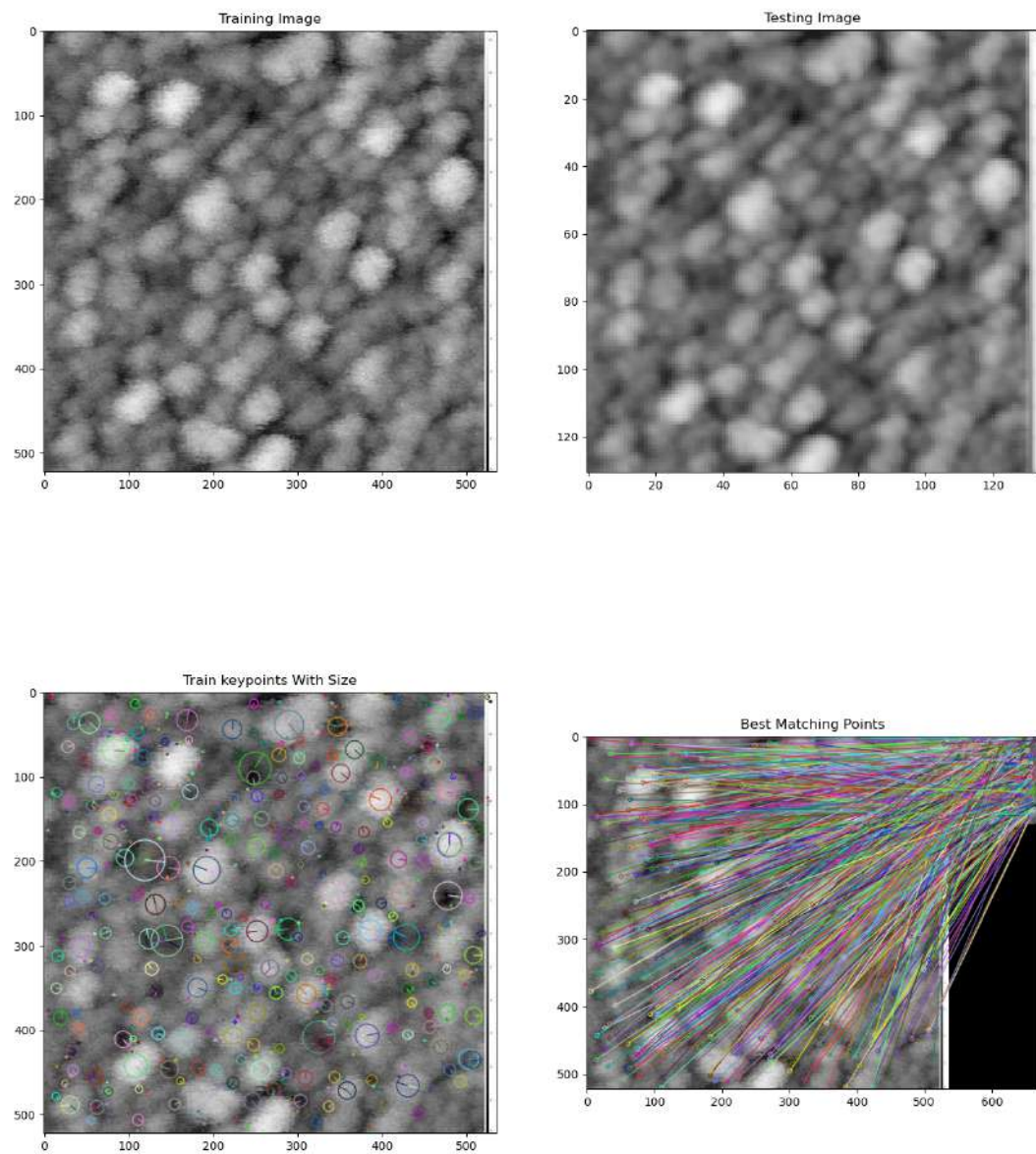


Figure 3.129: Muestra Vidrio-Nano islas de 50 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 0 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

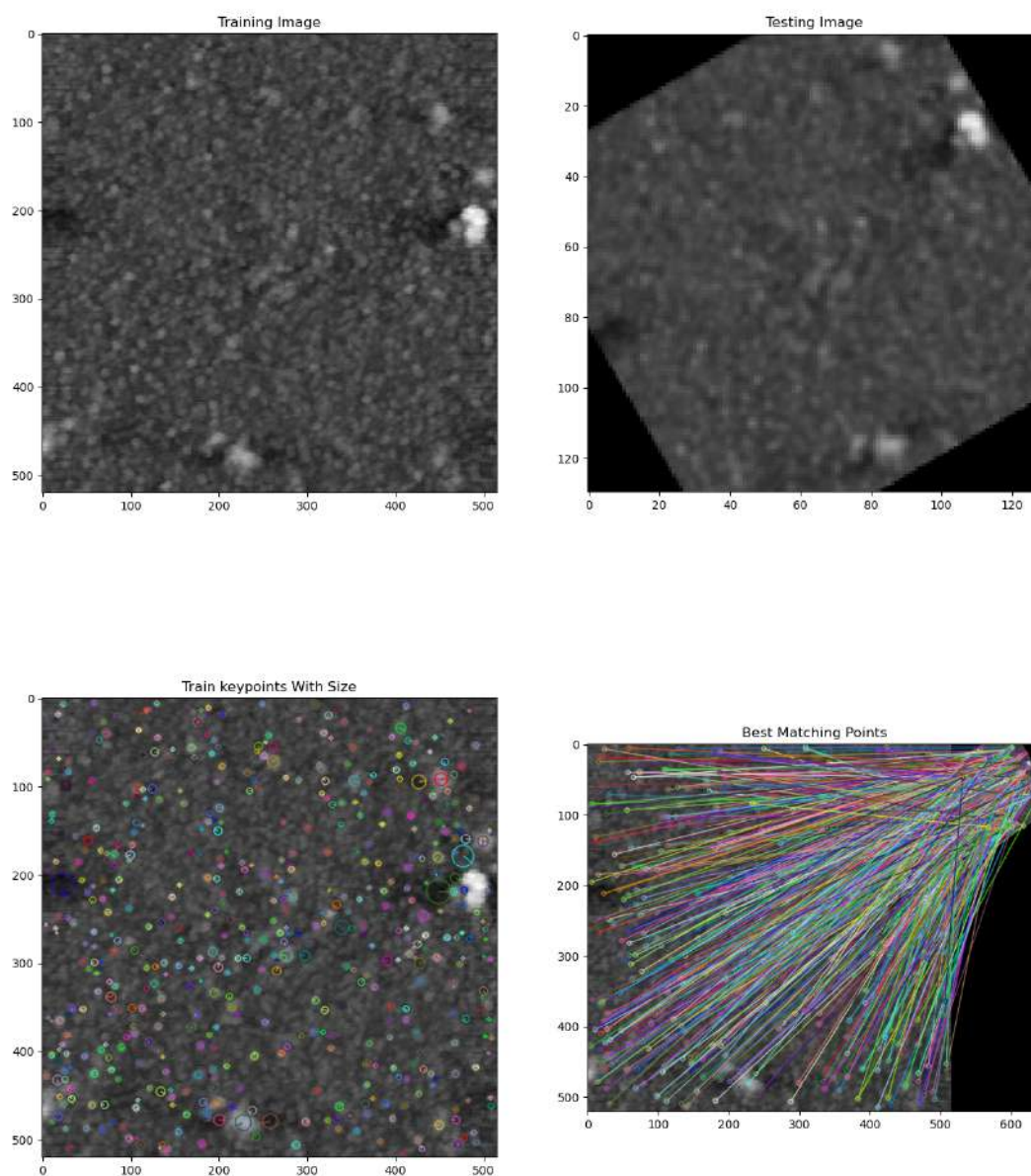


Figure 3.130: Muestra Vidrio-Nano islas de 10 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 30 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

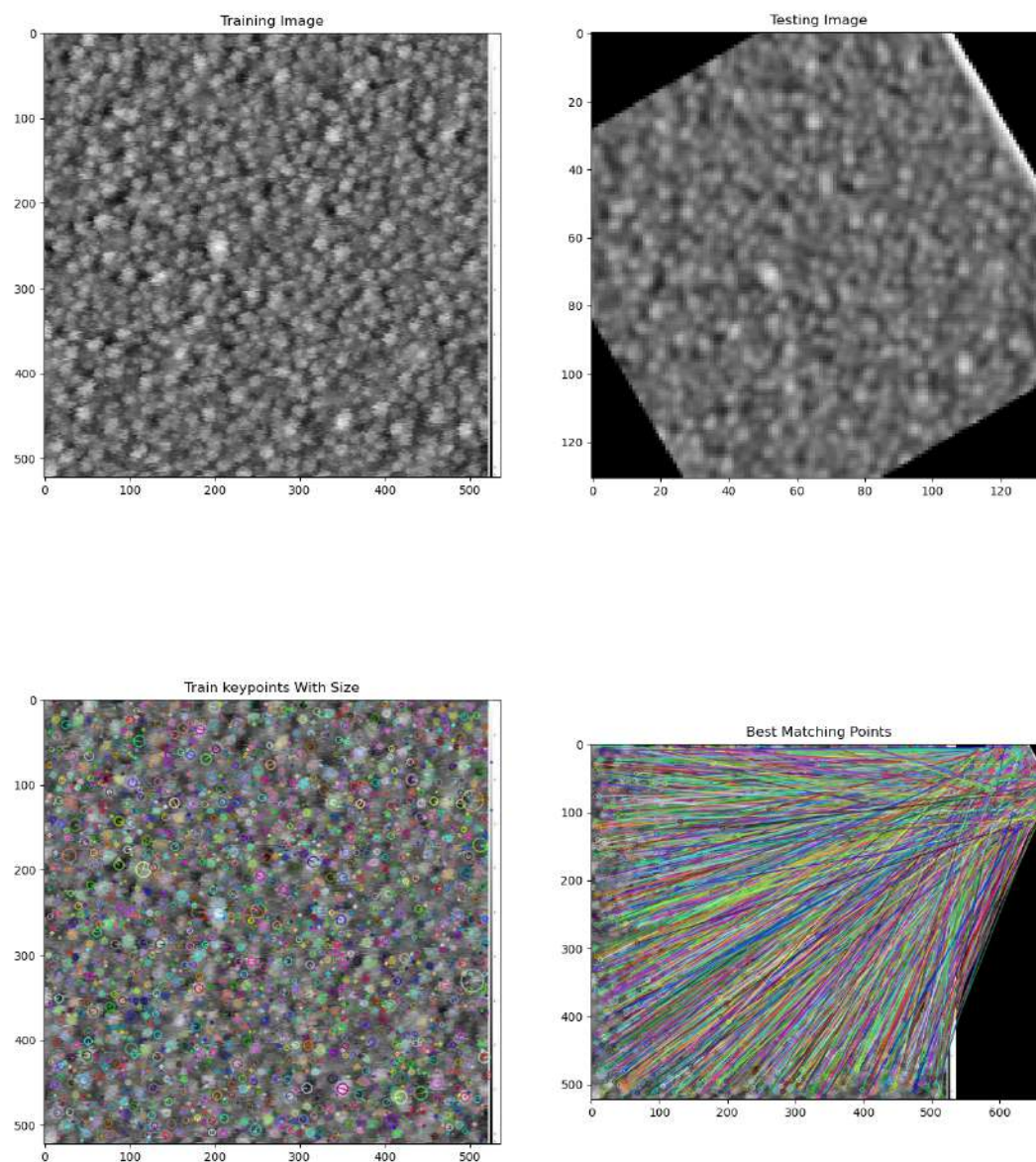


Figure 3.131: Muestra Vidrio-Nano islas de 20 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 30 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

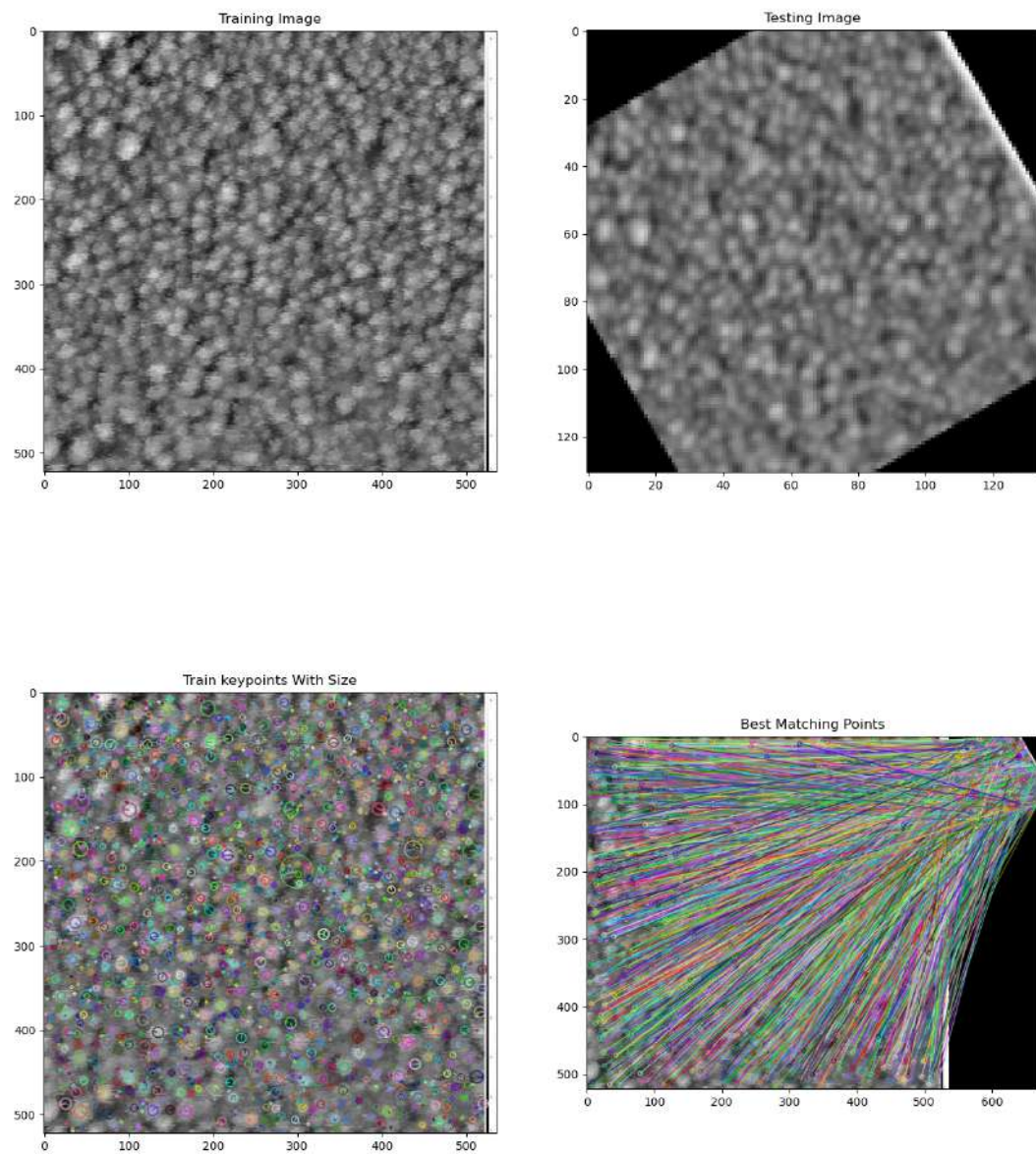


Figure 3.132: Muestra Vidrio-Nano islas de 30 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 30 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

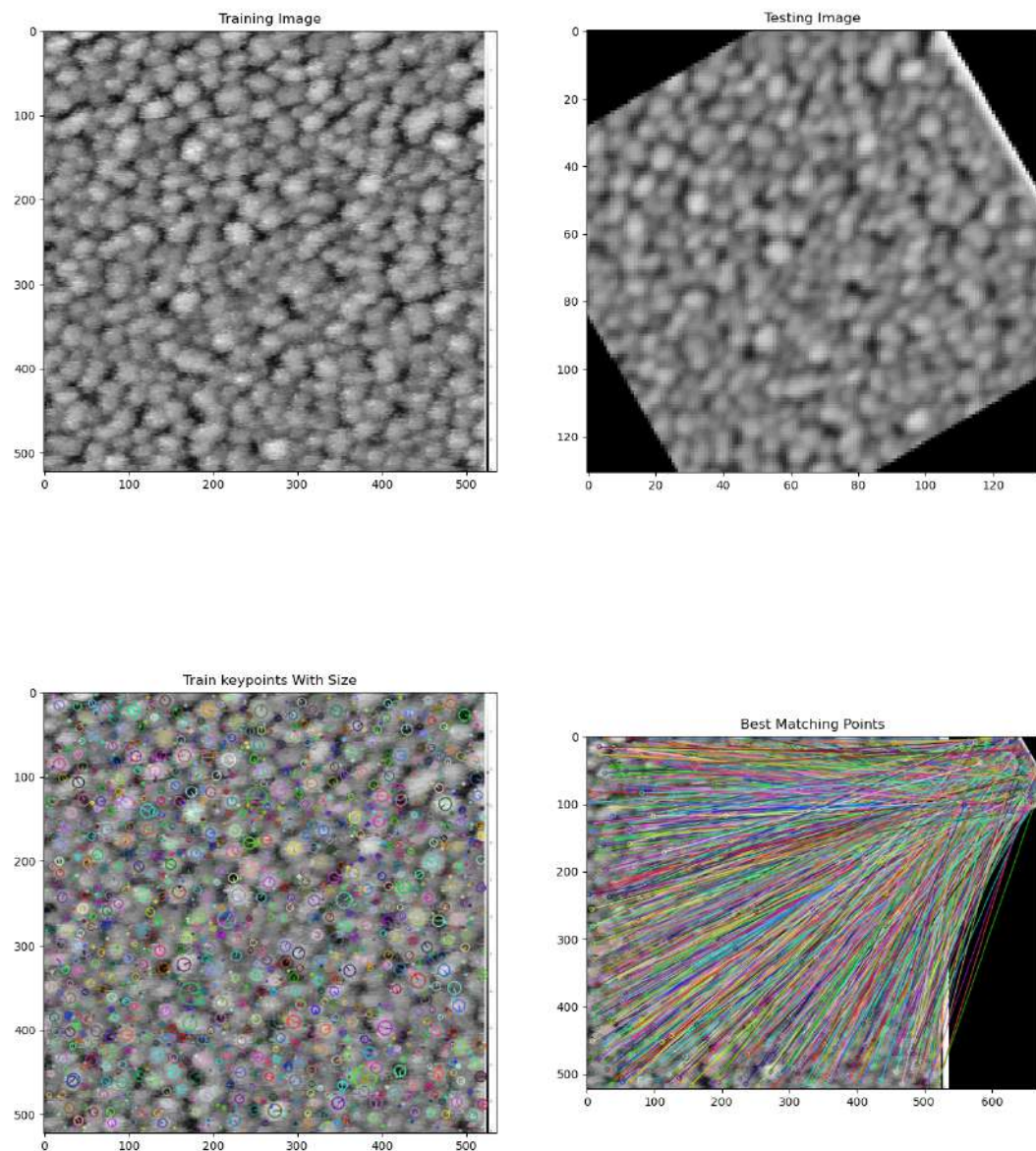


Figure 3.133: Muestra Vidrio-Nano islas de 40 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 30 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

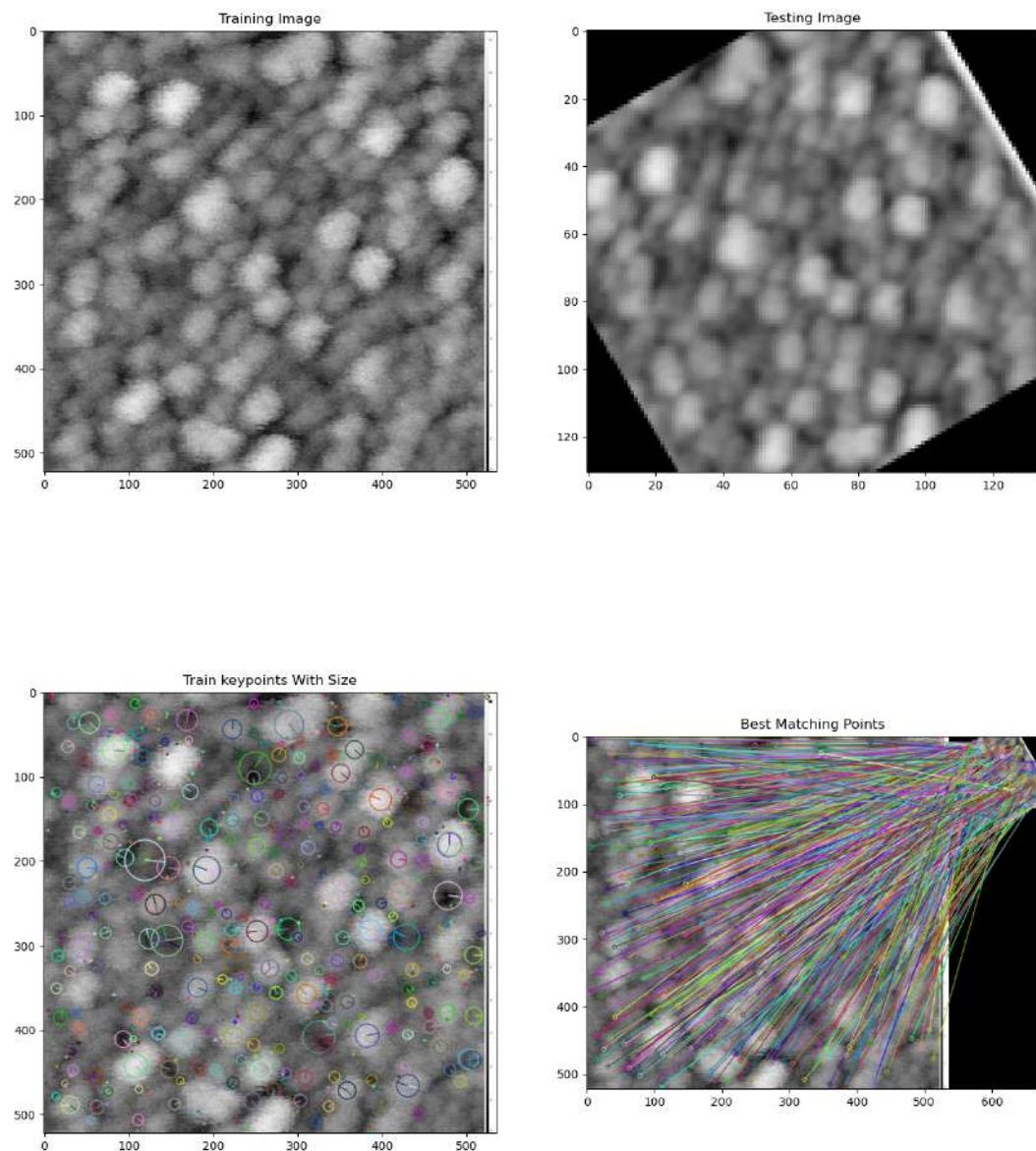


Figure 3.134: Muestra Vidrio-Nano islas de 50 segundos de deposición. En la parte superior izquierda se observa estructura sin rotación, en la parte superior derecha la misma estructura rotada 30 grados. En la parte inferior izquierda se observa la estructura con pequeños círculos de reconocimiento y en la parte inferior derecha se observa las coincidencias unidas por una línea recta.

Reconocimiento de Estructuras					
Tiempo	Imagen Original	Rotada 0°	Rotada 30°	Porcentaje de reconocimiento 0°	Porcentaje de Reconocimiento 30°
10 seg	701	101	98	100%	13%
20 seg	3226	755	621	100%	19%
30 seg	2669	754	619	100%	23%
40 seg	2053	695	600	100%	29%
50 seg	636	244	212	100%	33%

Table 3.2: Se observa las coincidencias obtenidas por el algoritmo Sift al rotar la misma figura 30 grados

3.6 Resultados Obtenidos por Caracterización Mediante el espacio de color CIE 1931

Muestra 1

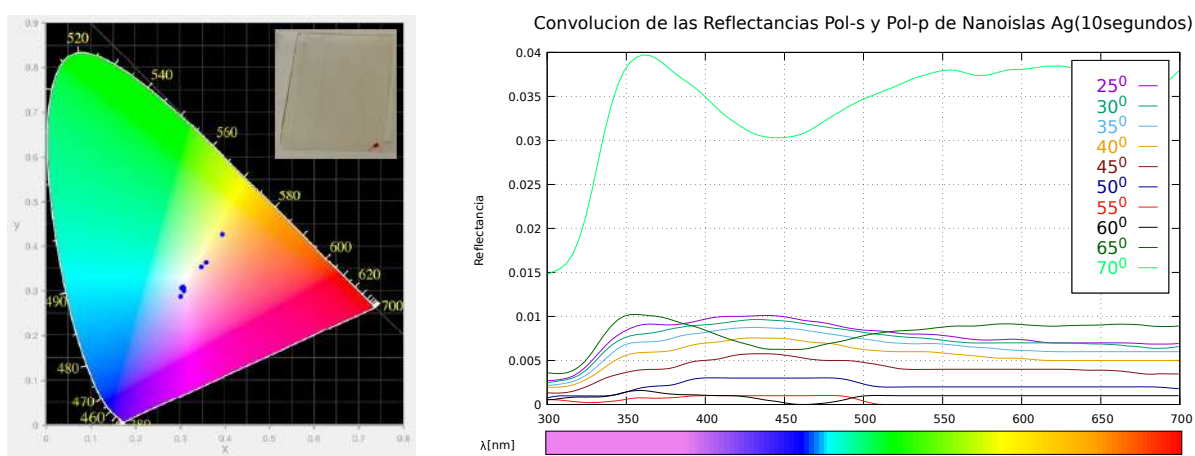


Figure 3.135: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)10segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

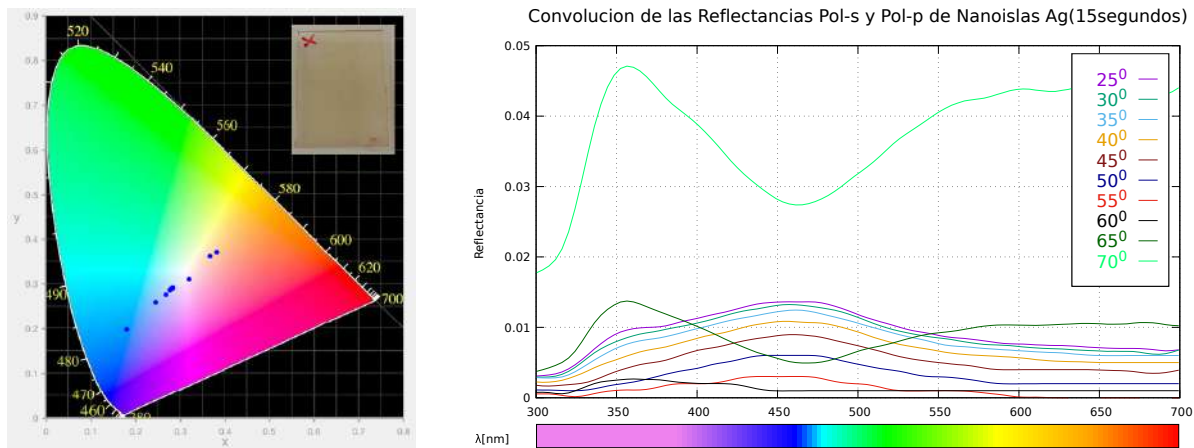


Figure 3.136: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)15segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

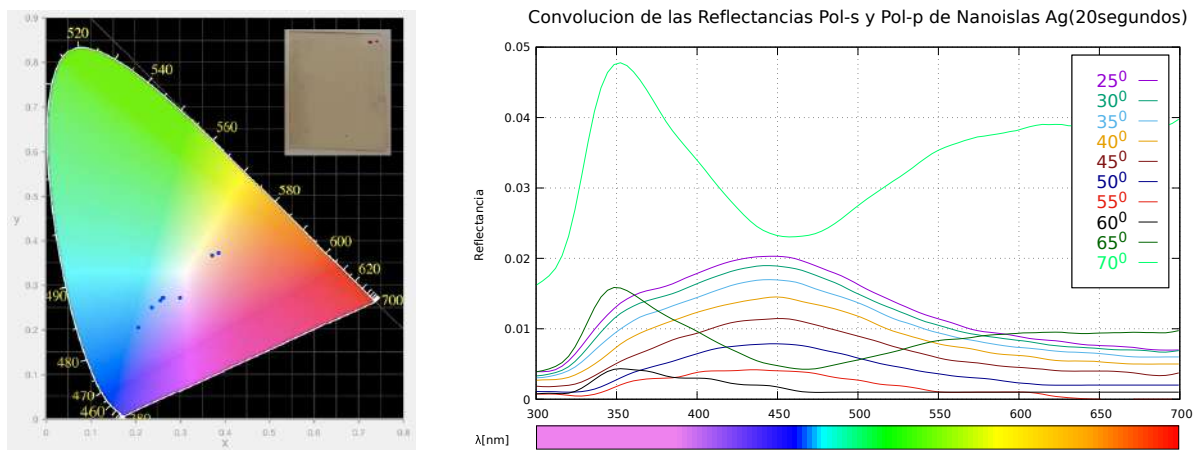


Figure 3.137: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)20segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

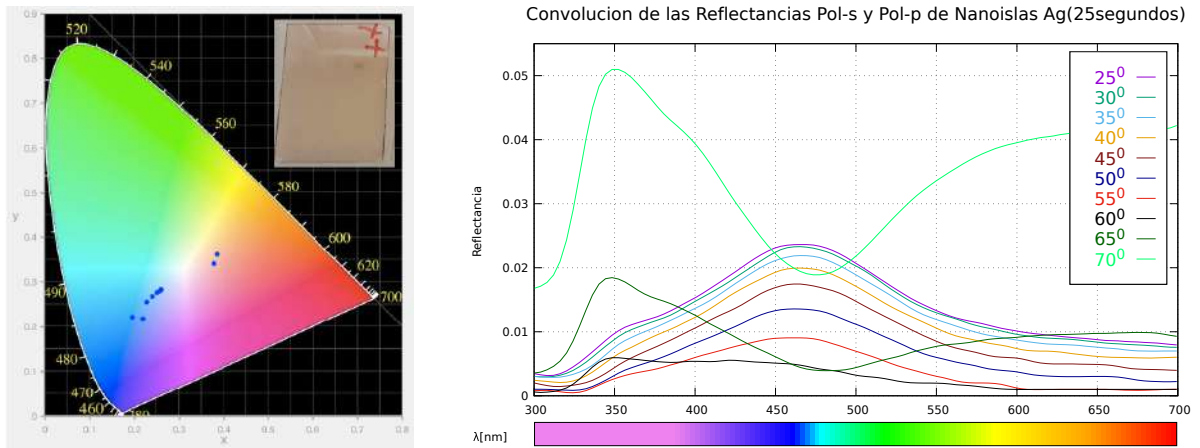


Figure 3.138: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)25segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

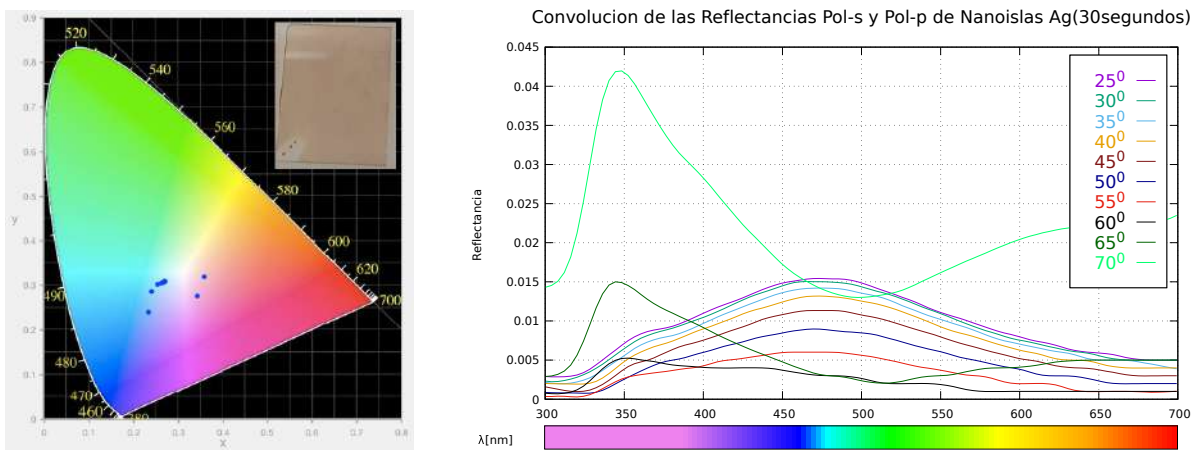


Figure 3.139: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)30segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

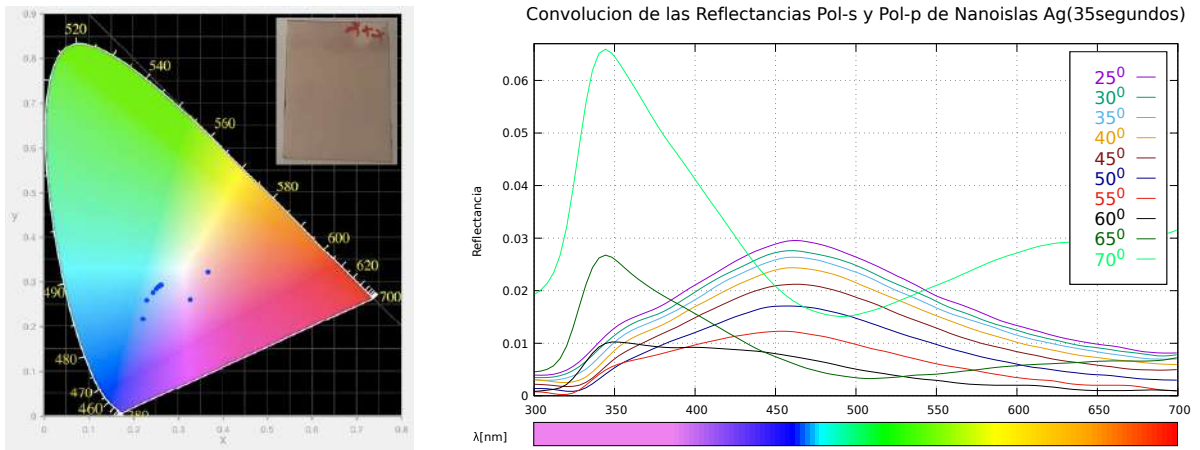


Figure 3.140: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)35segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

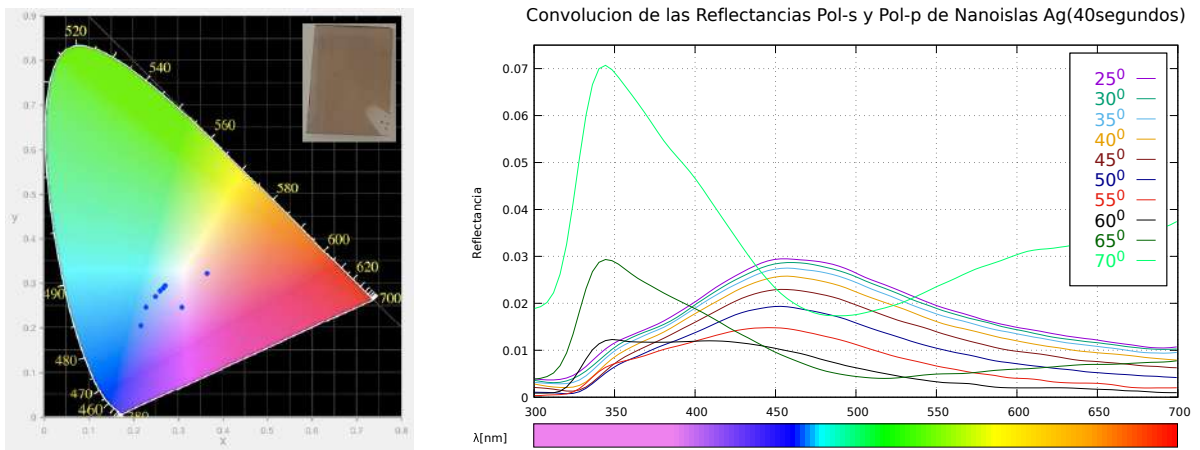


Figure 3.141: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)40segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

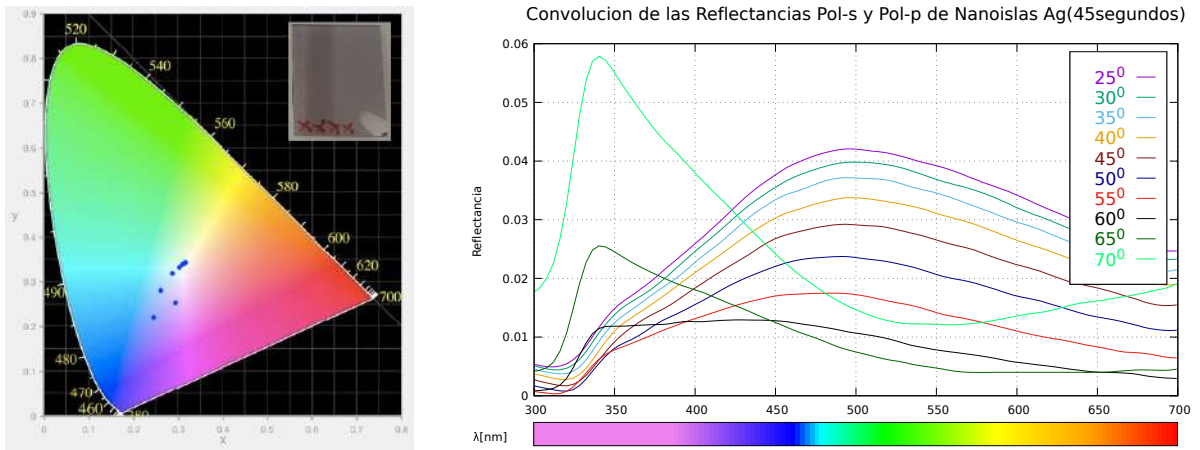


Figure 3.142: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)45segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

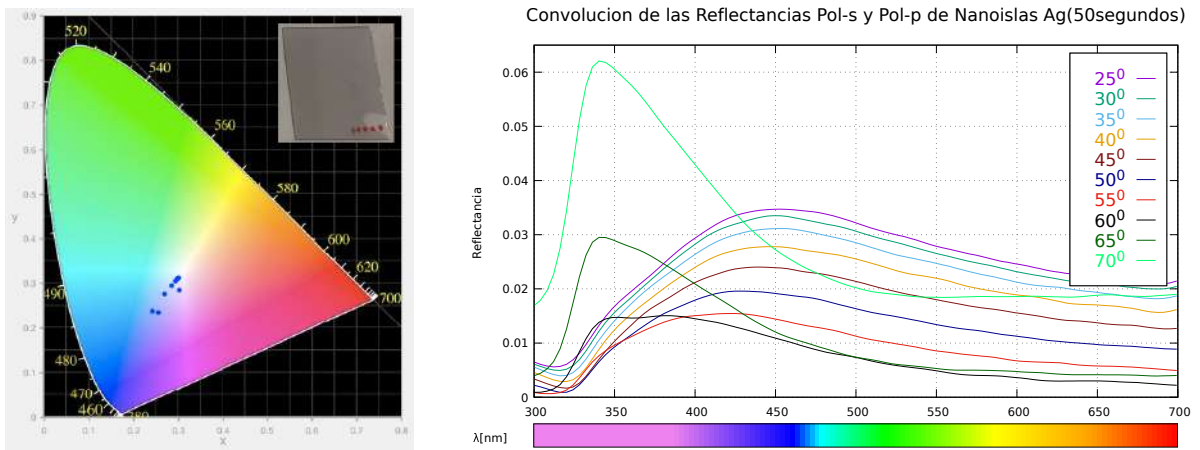


Figure 3.143: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de vidrio+NanoislasAg(15w-DC)50segundos desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

Muestra 2

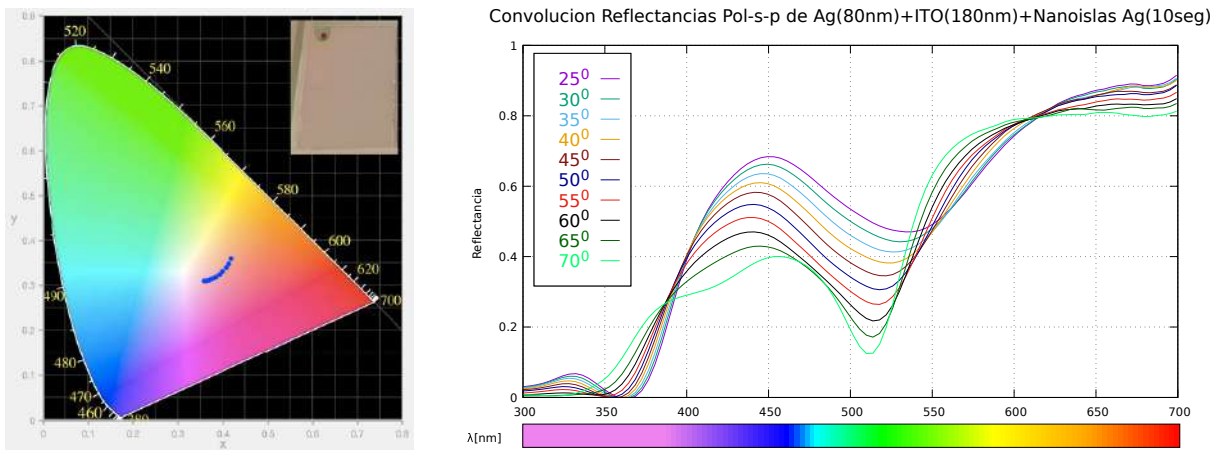


Figure 3.144: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(10segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

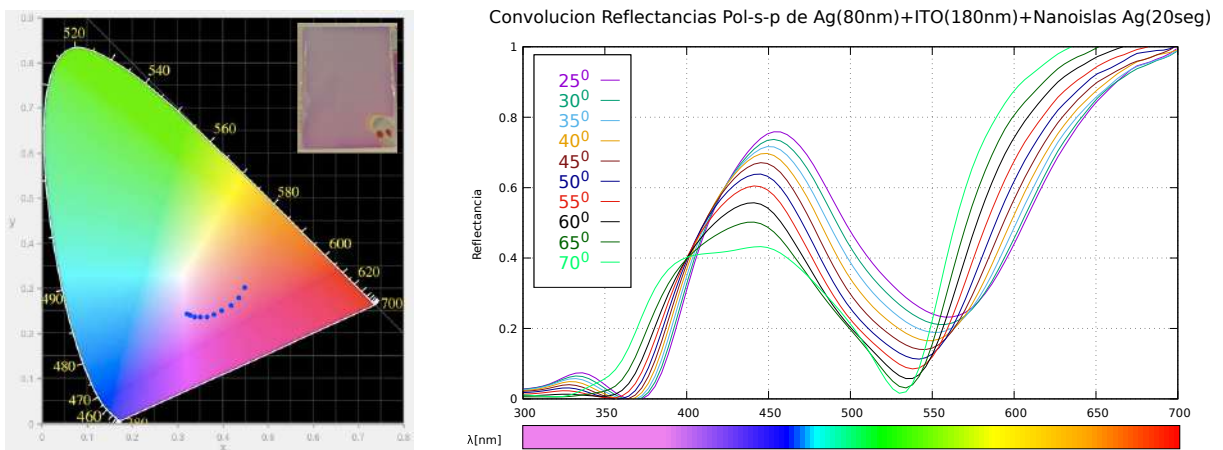


Figure 3.145: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(20segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

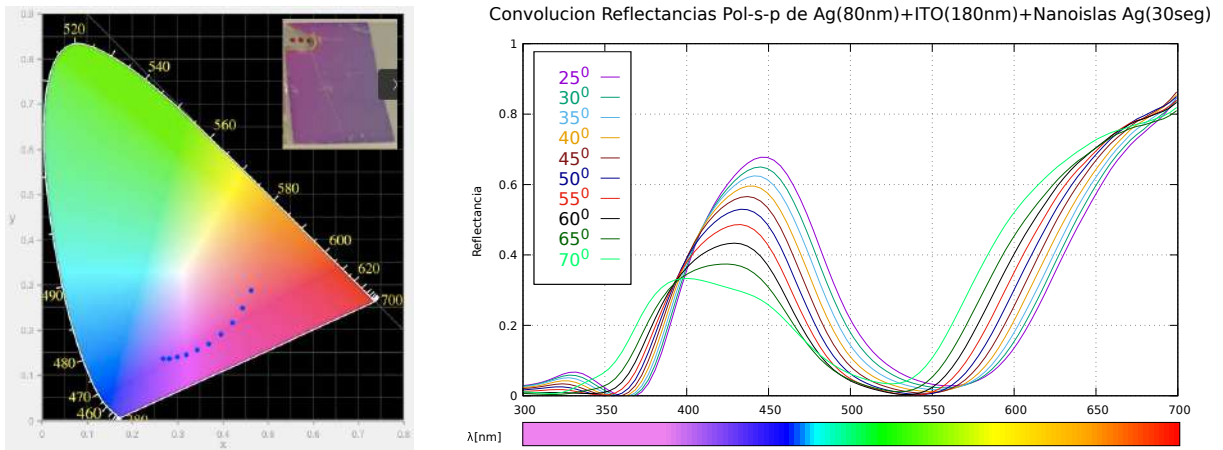


Figure 3.146: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

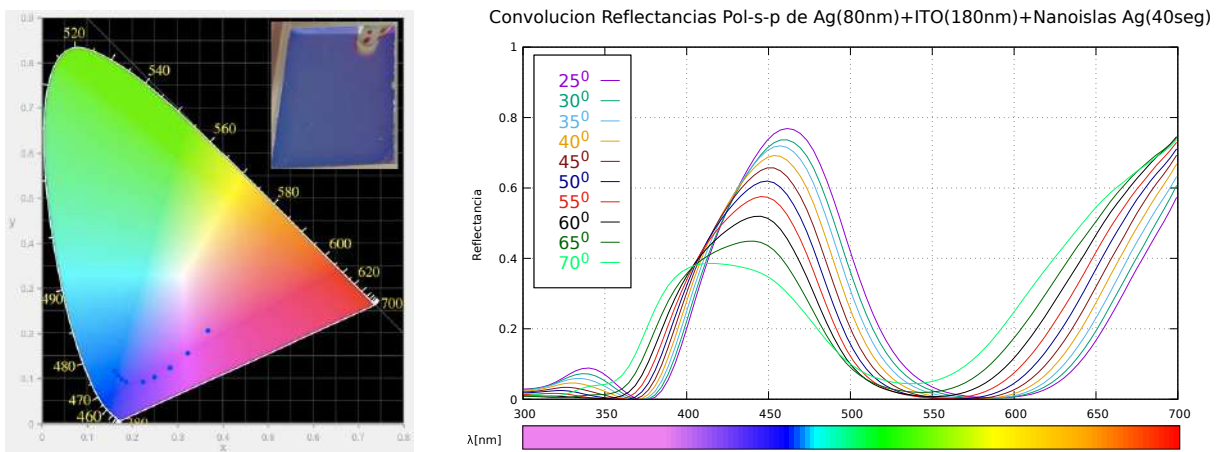


Figure 3.147: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(40segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

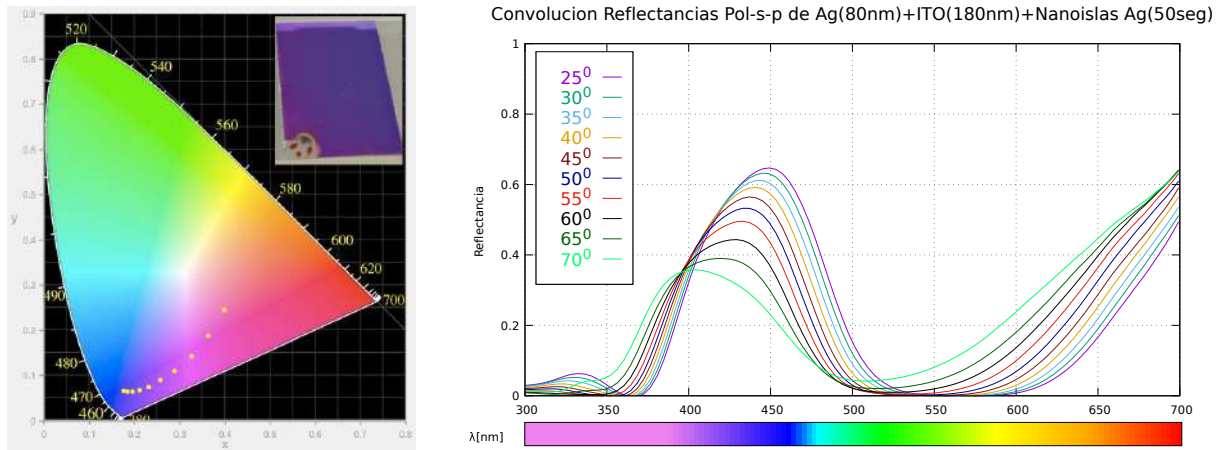


Figure 3.148: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(50segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

Muestra 3

150 ITO

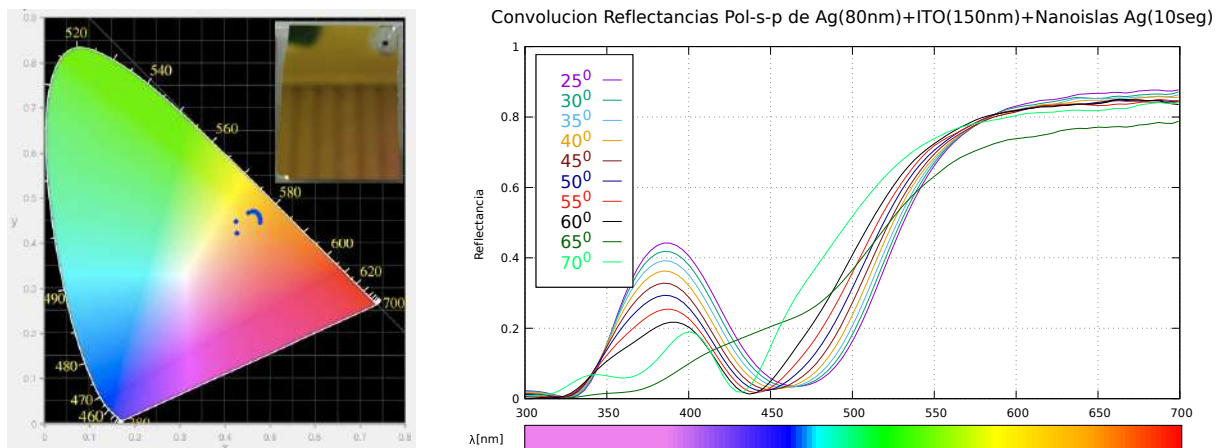


Figure 3.149: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(10segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

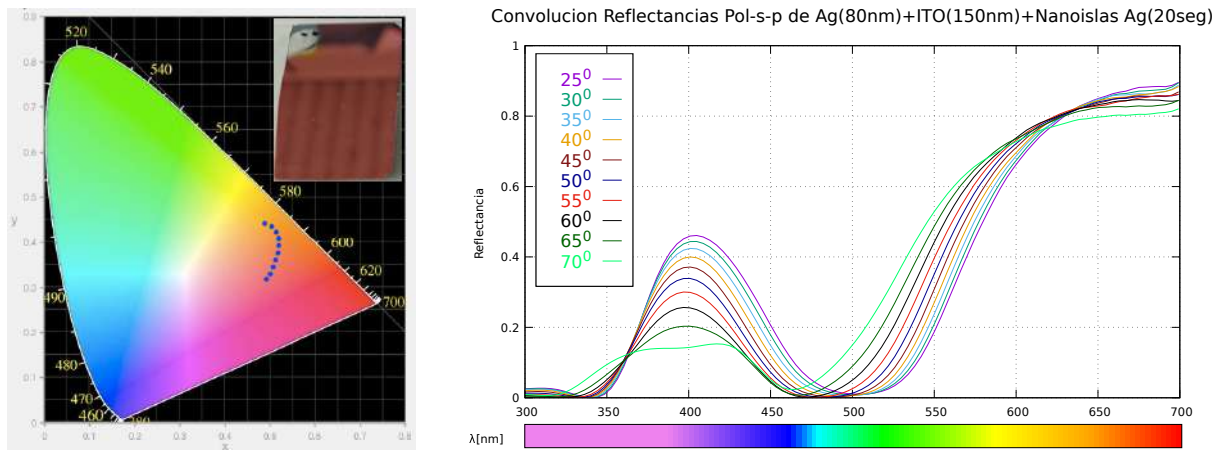


Figure 3.150: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(20segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

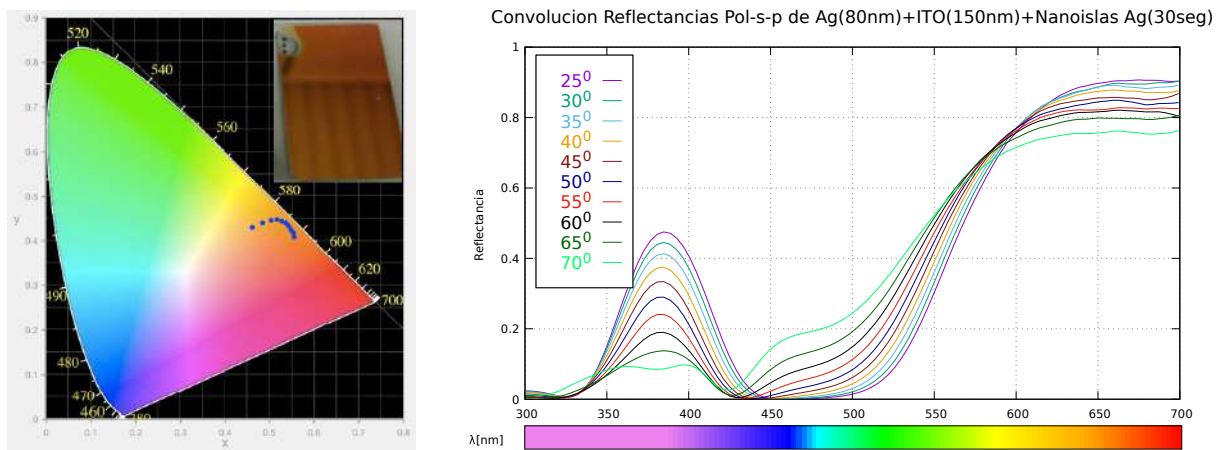


Figure 3.151: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(30segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

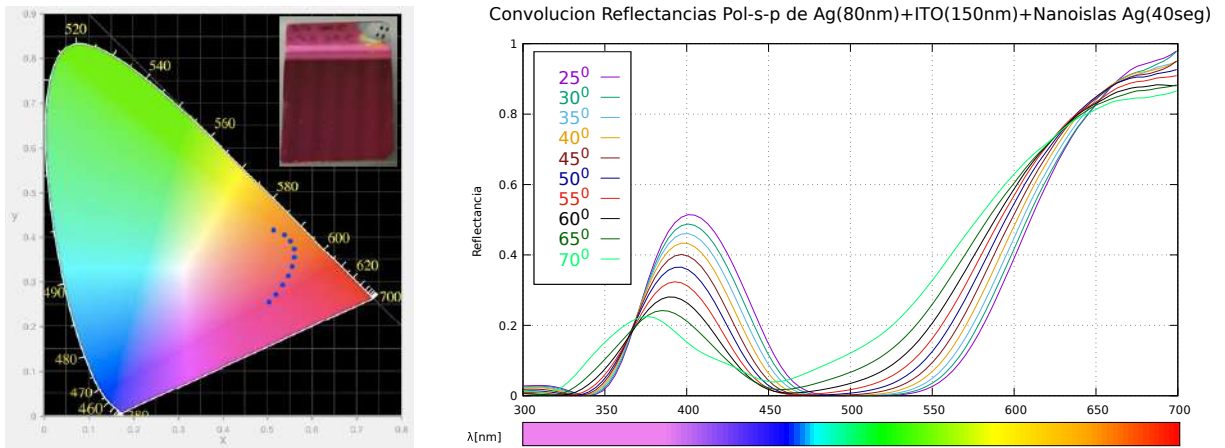


Figure 3.152: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

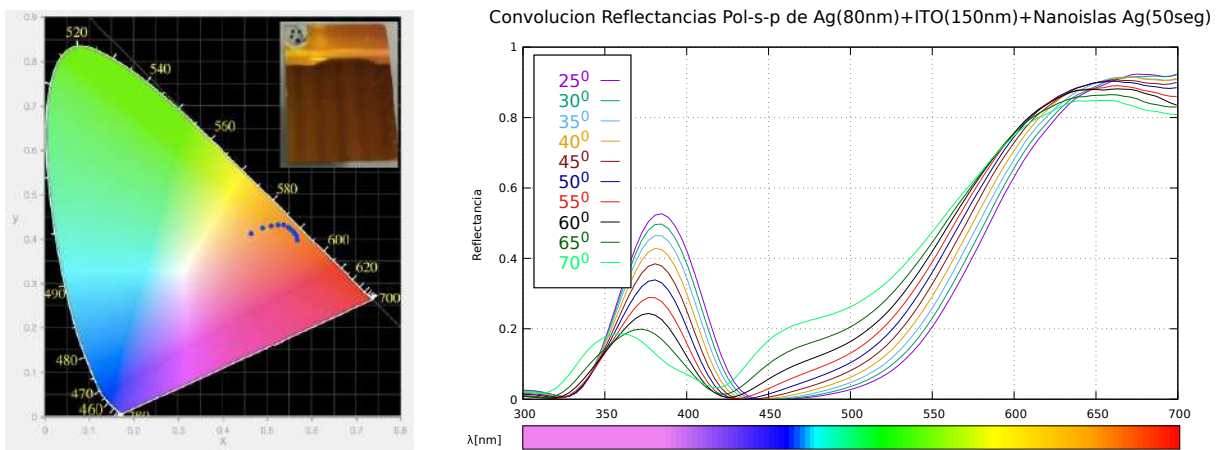


Figure 3.153: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(50segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

Cuartas Muestras

220 ITO

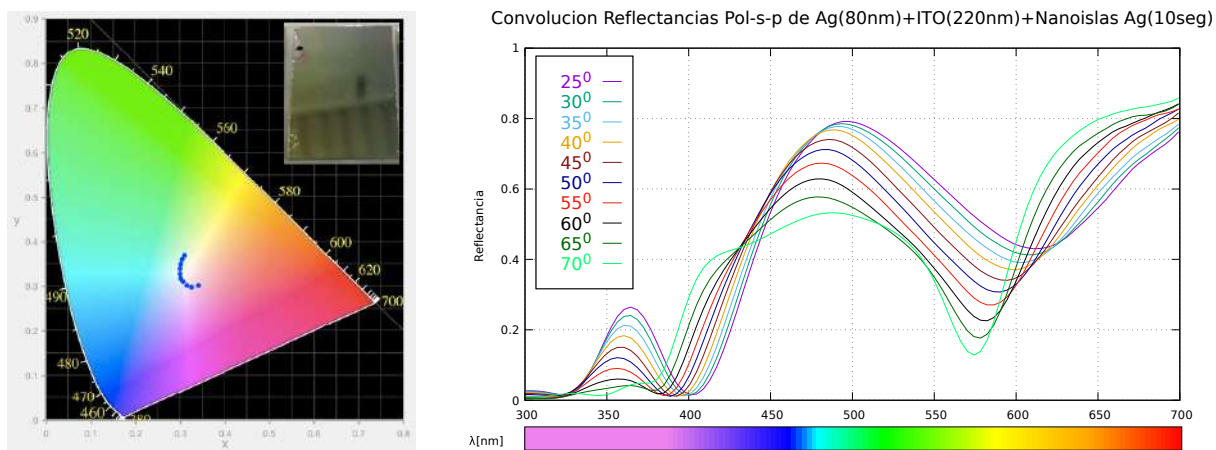


Figure 3.154: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)220nm+Nanoislas Ag(10segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

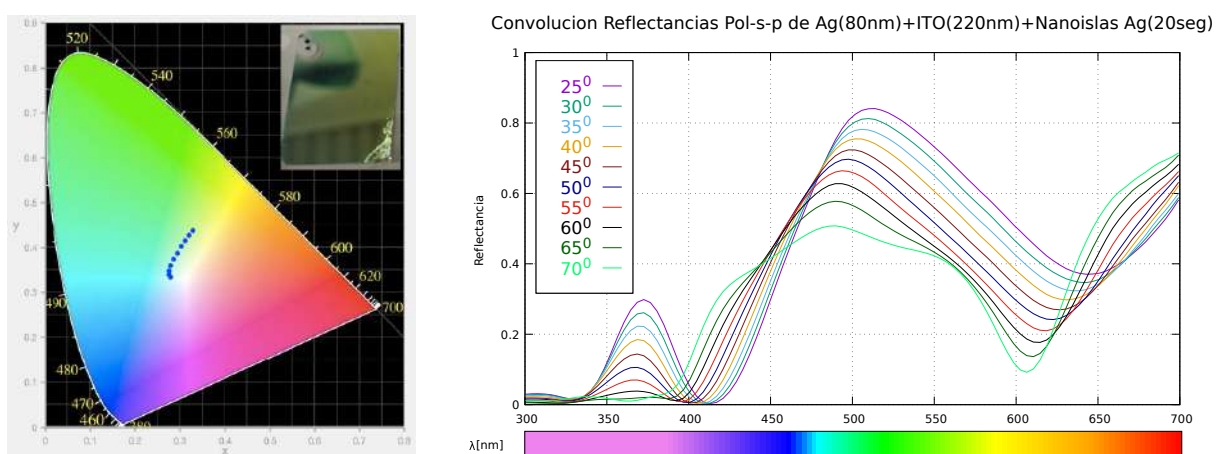


Figure 3.155: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)220nm+Nanoislas Ag(20segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

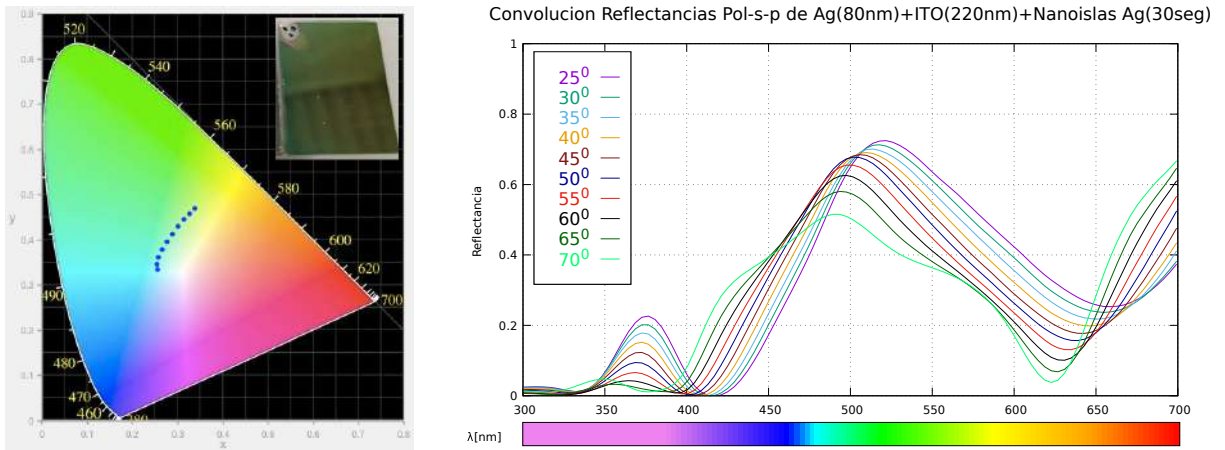


Figure 3.156: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)220nm+Nanoislas Ag(10segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

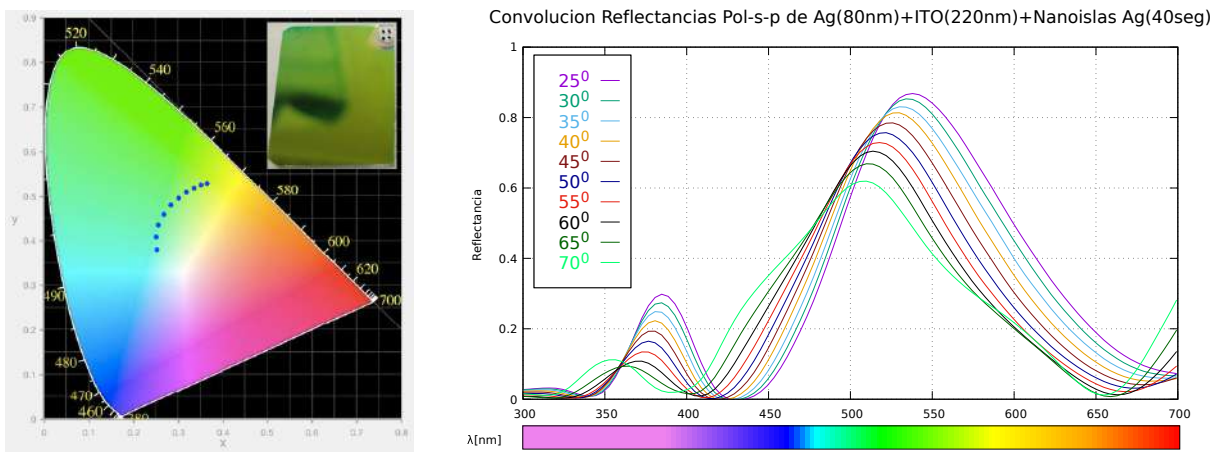


Figure 3.157: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)220nm+Nanoislas Ag(10segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

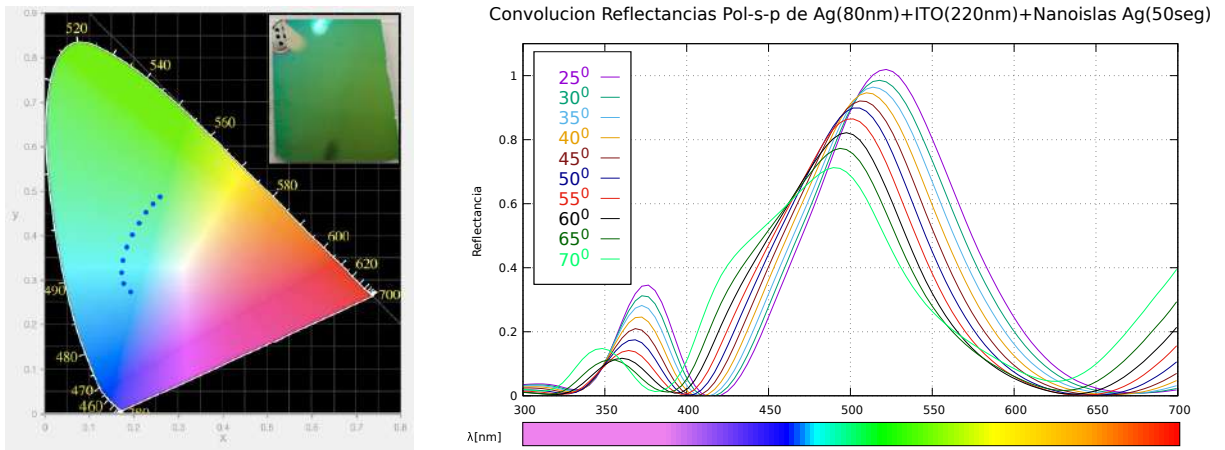


Figure 3.158: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)220nm+Nanoislas Ag(10segundos) desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

Muestra 5

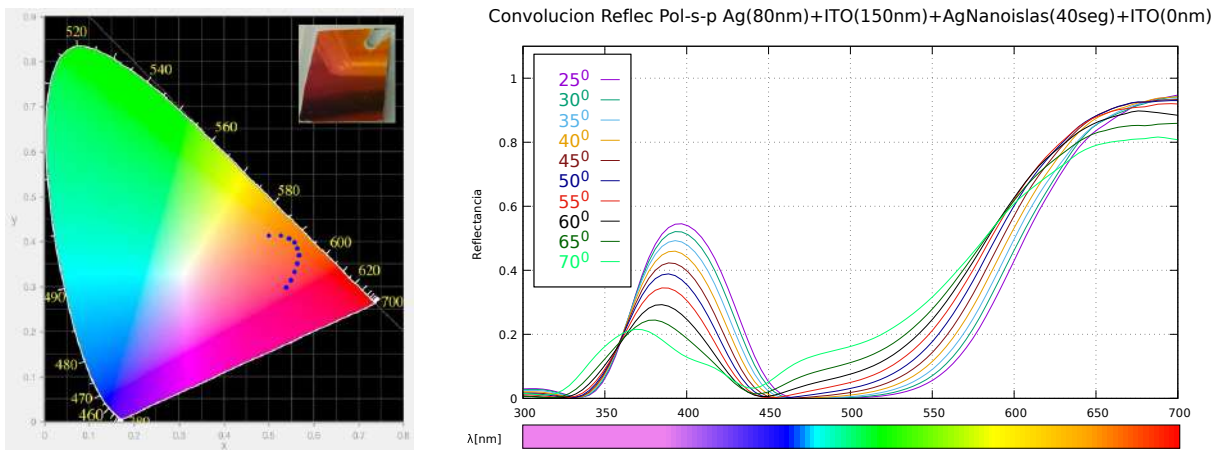


Figure 3.159: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)0nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

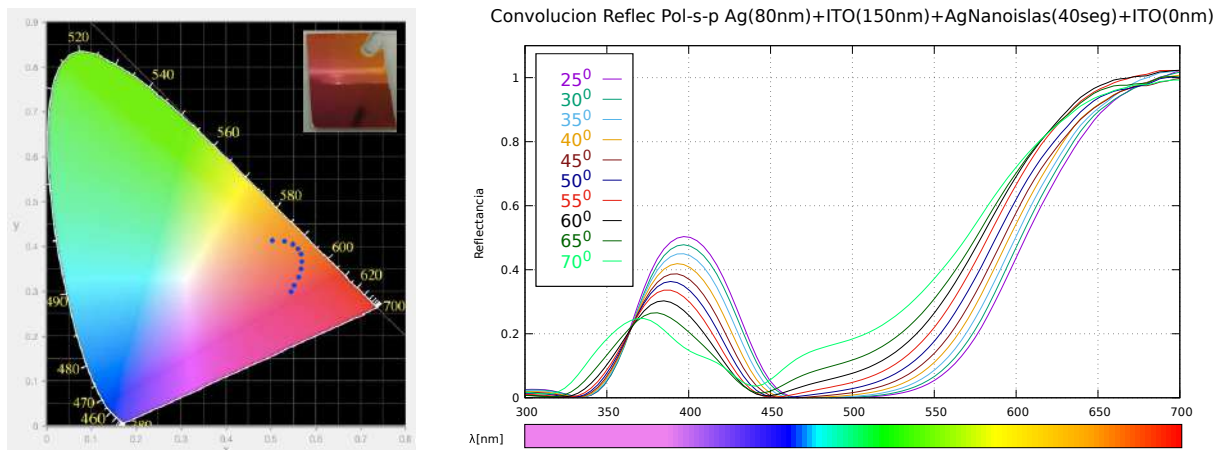


Figure 3.160: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)0nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

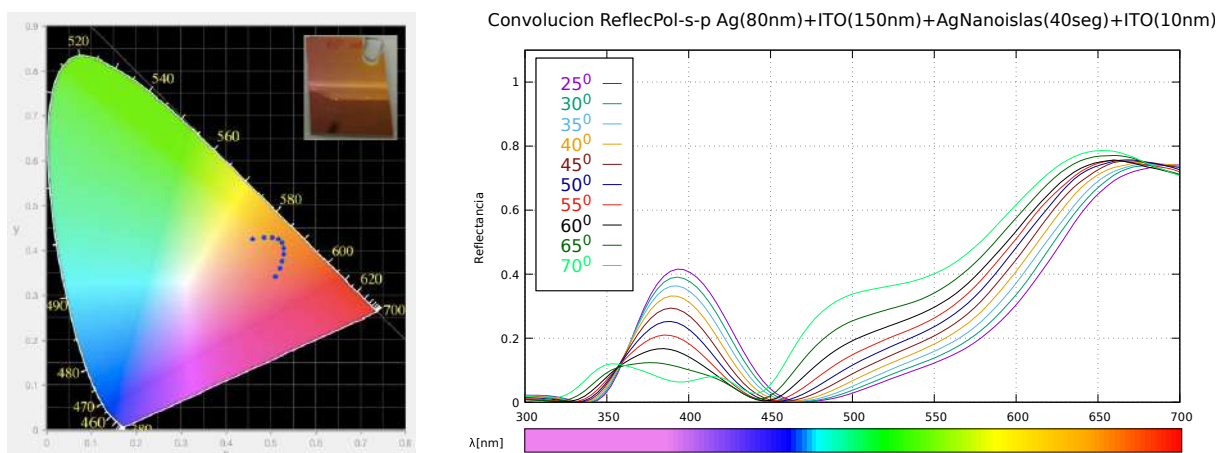


Figure 3.161: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)10nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

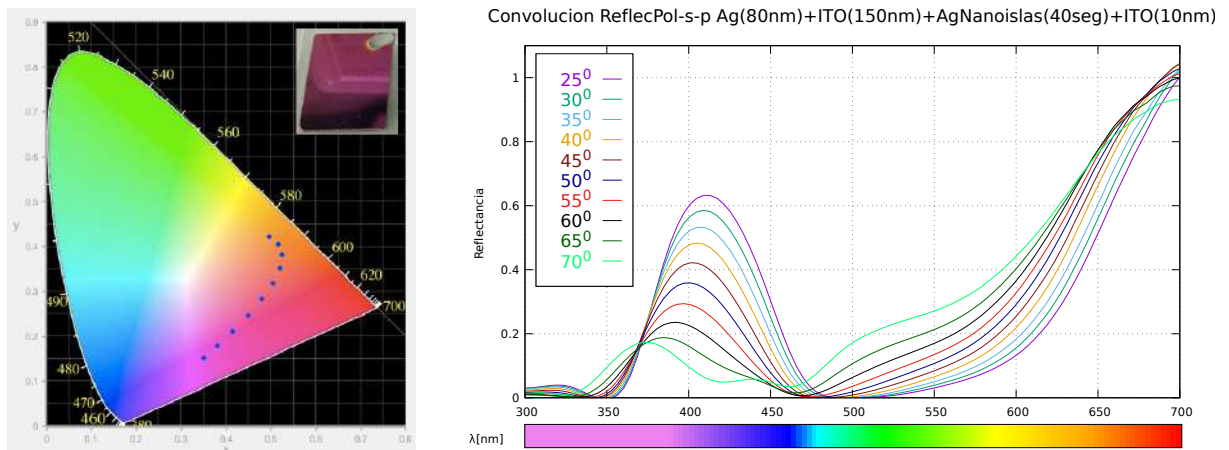


Figure 3.162: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)10nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

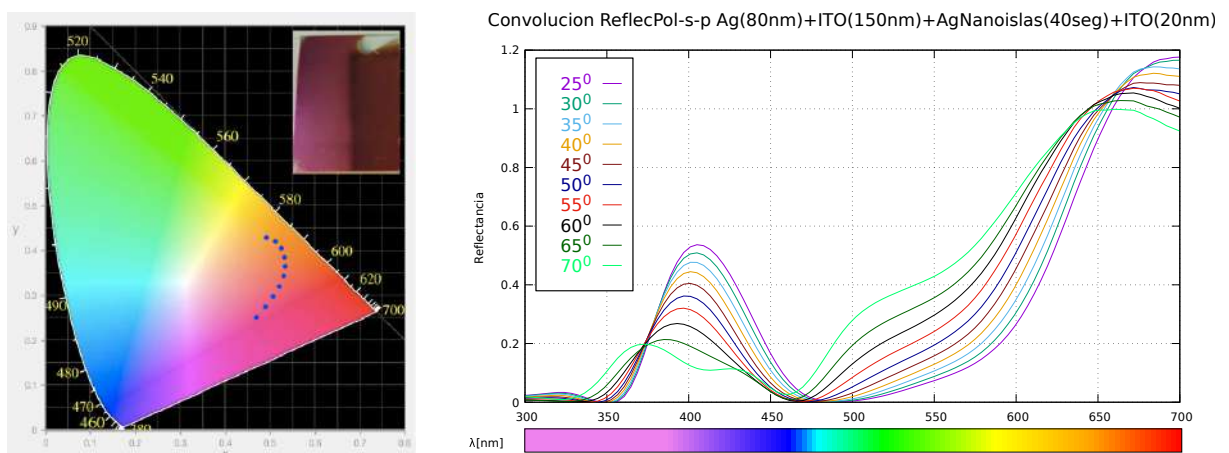


Figure 3.163: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)20nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

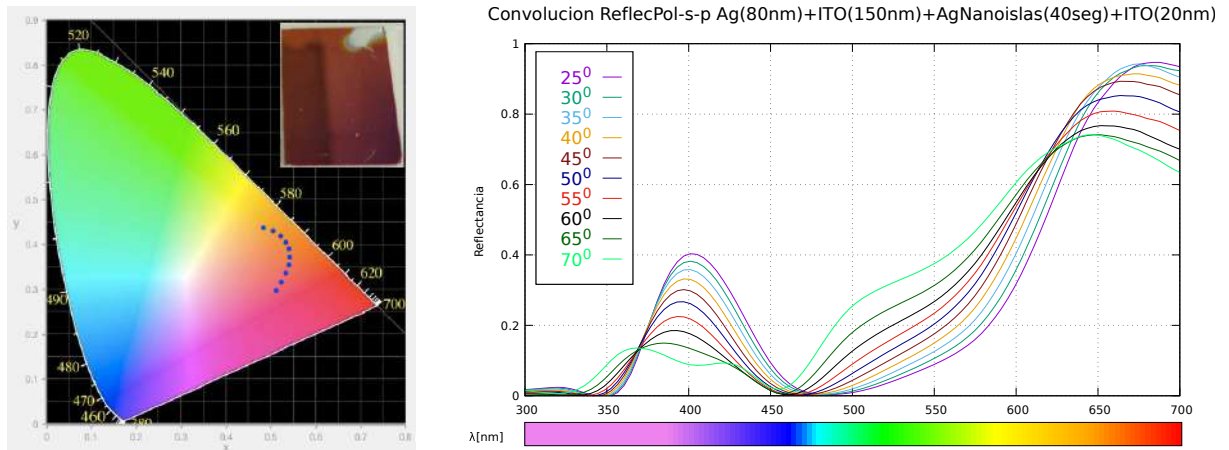


Figure 3.164: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)20nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

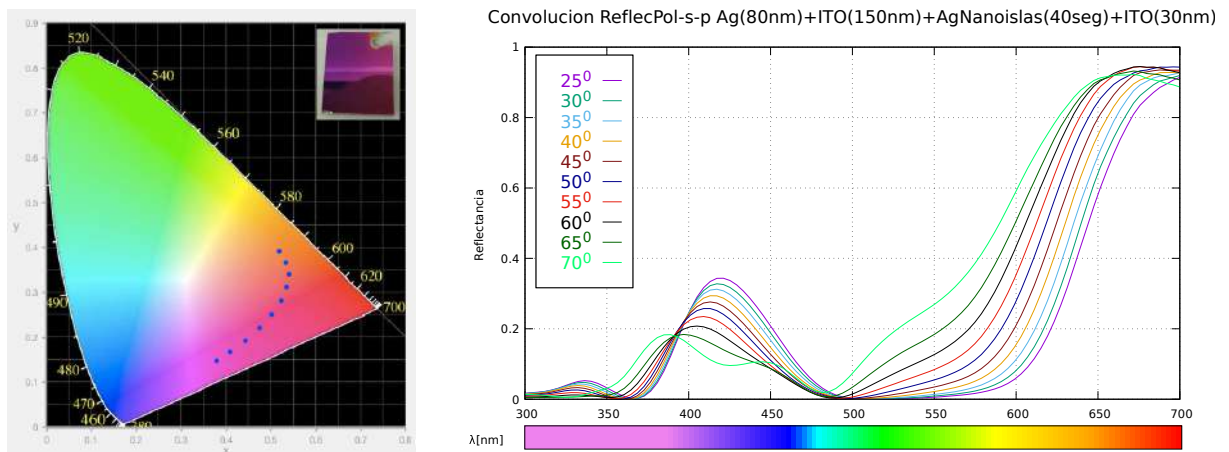


Figure 3.165: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)30nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

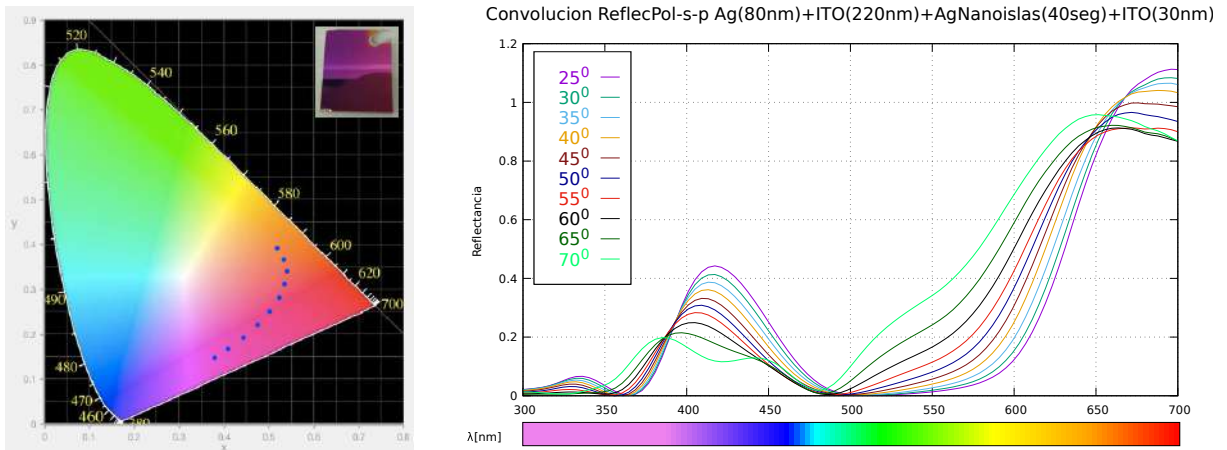


Figure 3.166: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)150nm+Nanoislas Ag(40segundos)+ITO(80w-RF)30nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

Muestra 6

ITO-180nm

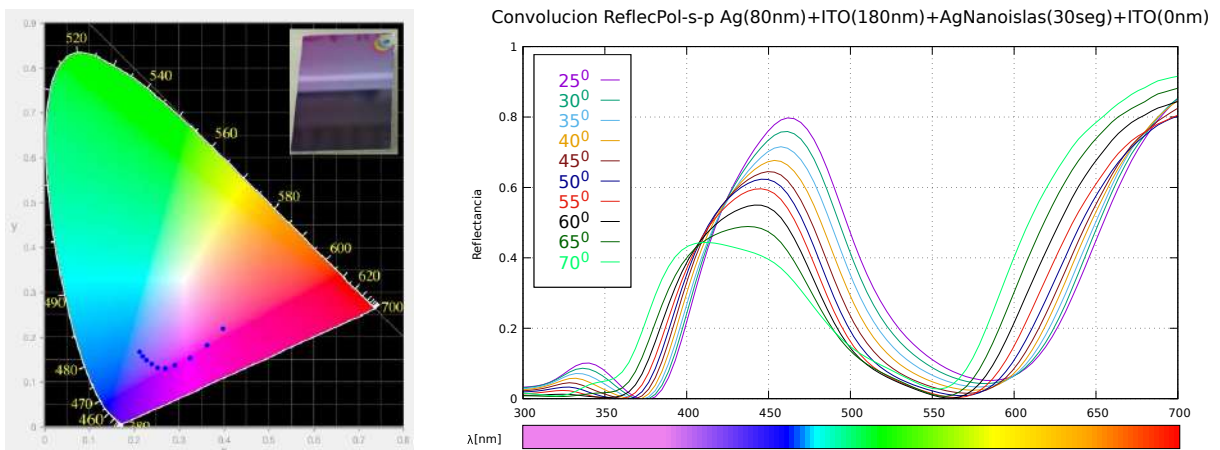


Figure 3.167: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)0nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

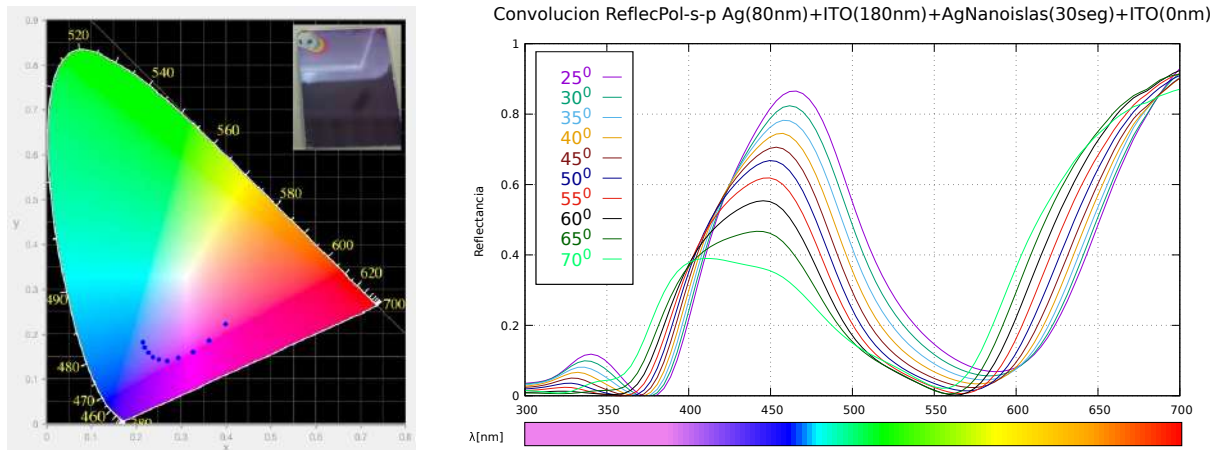


Figure 3.168: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)0nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

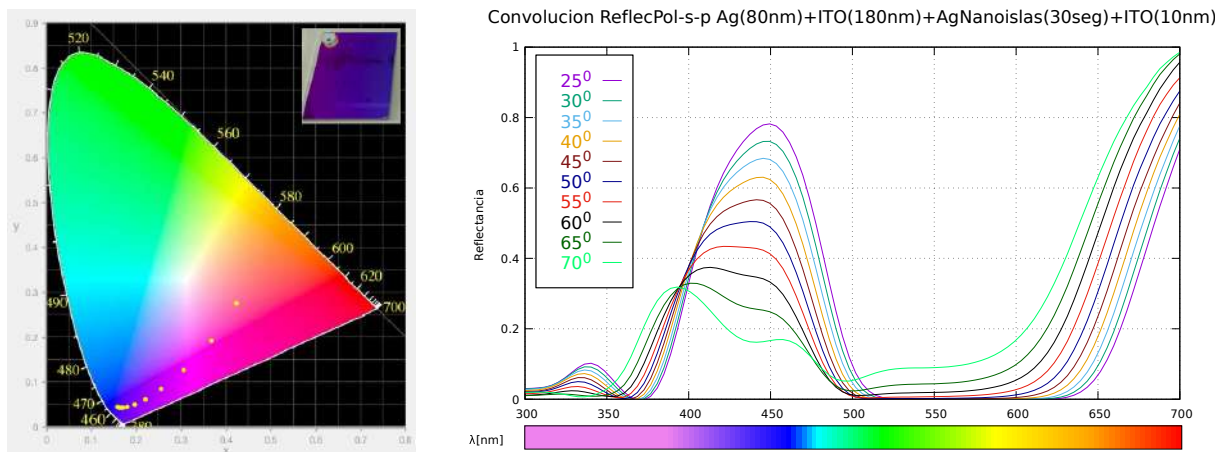


Figure 3.169: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)10nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

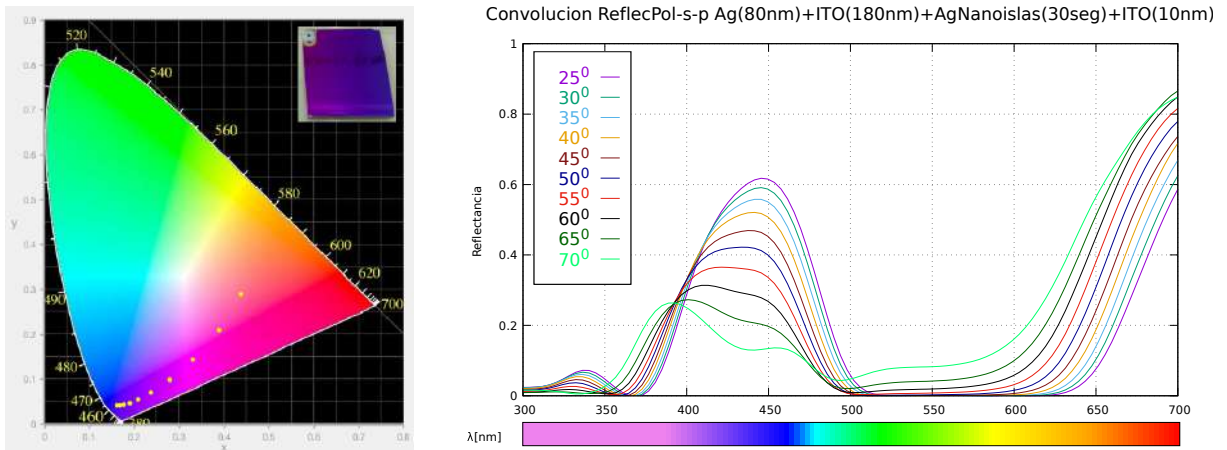


Figure 3.170: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)10nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

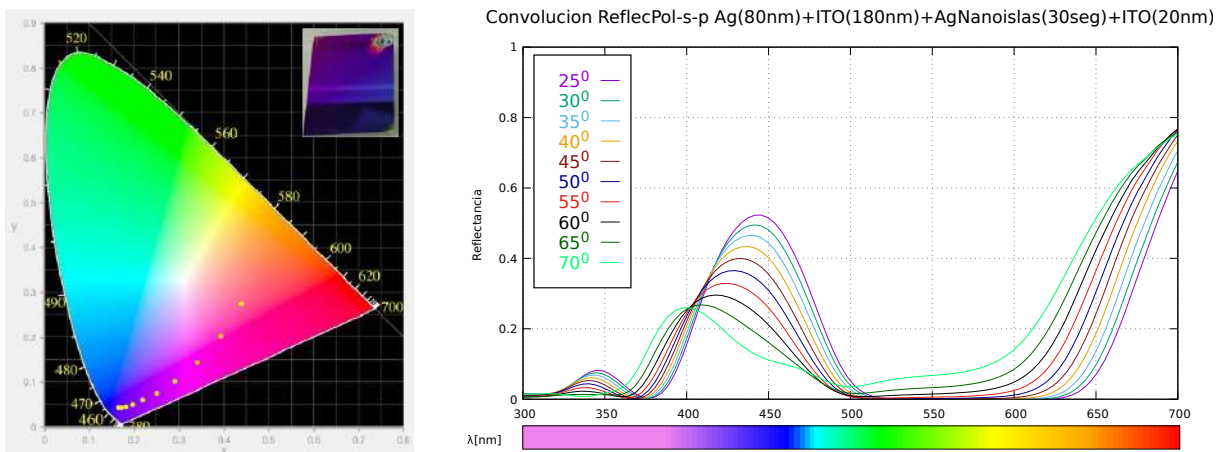


Figure 3.171: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)20nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

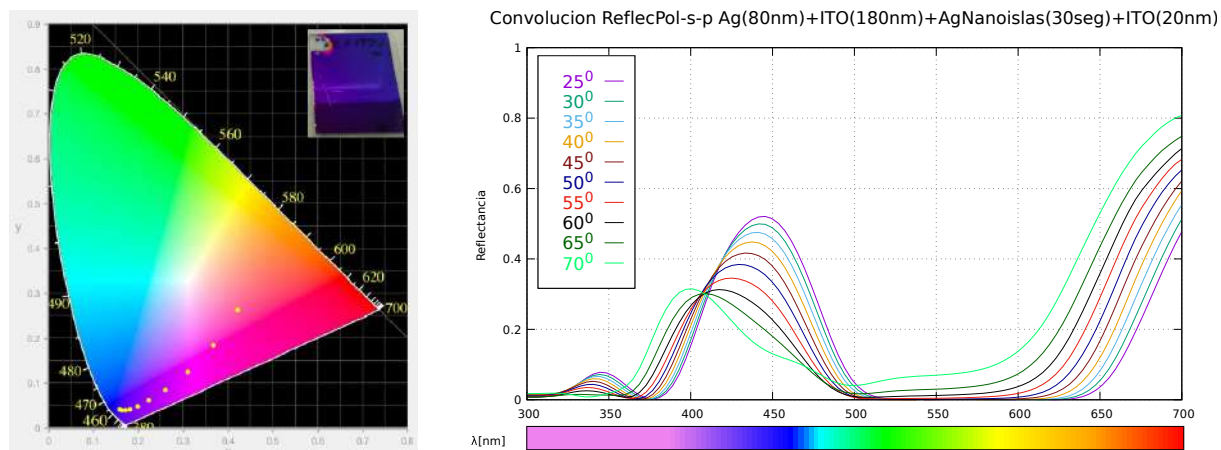


Figure 3.172: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)20nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

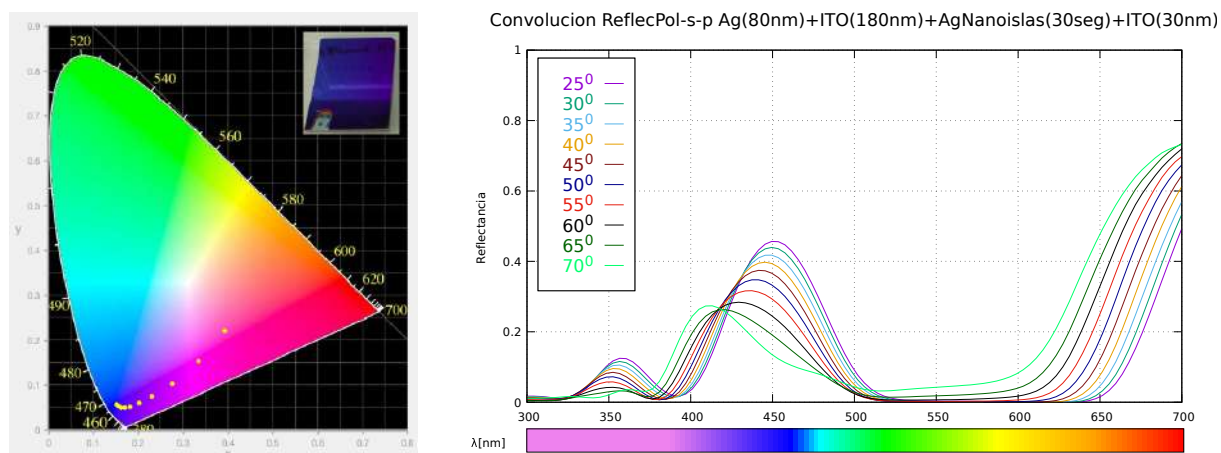


Figure 3.173: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)30nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

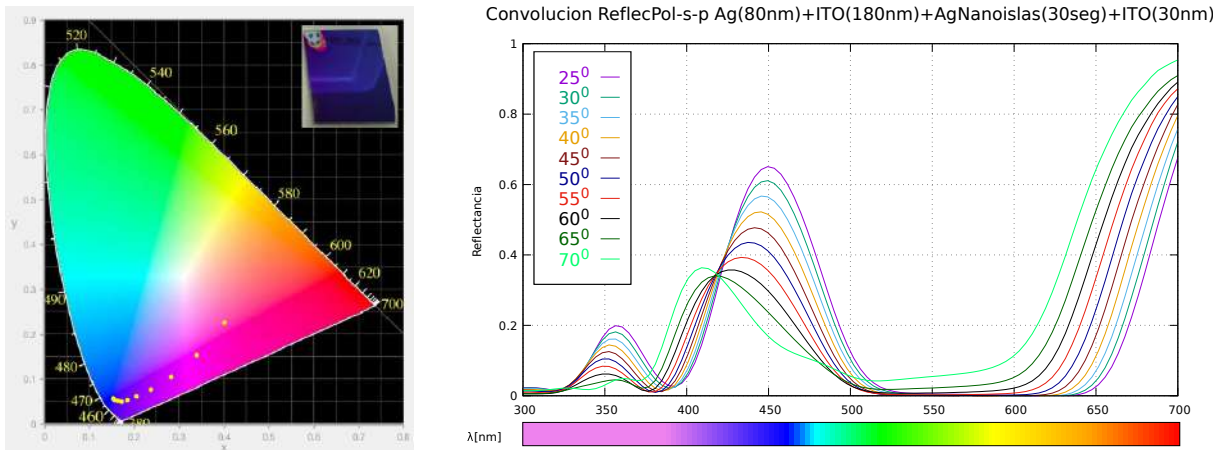


Figure 3.174: En la parte izquierda, se observa el espacio de color CIE 1931 con los respectivos puntos que representan las muestras de: Vidrio+Ag(50w-DC)80nm+ITO(80w-RF)180nm+Nanoislas Ag(30segundos)+ITO(80w-RF)30nm desde 25 a 70 grados. En la parte derecha, se observa la convolución de las reflectancias en polarización p y polarización s.

Capítulo 4

Teorías de Medios Efectivos

En el siguiente capítulo se va a presentar modelos teóricos para predecir el color de la estructura formada por Nanoislas de Ag (de 10 a 50 segundos de tiempo de deposición) sobre vidrio^{3.1}. Predecir el color de este tipo de estructuras es muy importante, por que nos permite de manera más efectiva y rápida obtener el color que deseamos de las estructuras antes de fabricarlas. Para este propósito se utiliza modelos matemáticos los cuales modelan dichas estructuras de una manera aproximada. Los modelos utilizados son: Modelo de Maxwell Garnett Clásico, Modelo de Maxwell Garnett Mie y Maxwell Garnett Mejorado.

La realización teórica presente se la realizó mediante simulaciones en lenguaje C++ y en Fortran⁹⁰. Los input's necesarios para la simulación son los siguientes: permitividad del sustrato (en nuestro caso el aire, con índice de refracción $n_{aire} = 1.00029$), fracción de volumen (f) de las Nanopartículas de Ag, función dieléctrica del vidrio ϵ_{vidrio} y su espesor d , radio promedio R , radio mínimo R_{min} , radio máximo R_{max} y la función dieléctrica aproximada ϵ_{np} de las nanopartículas de Ag. Con el fin de realizar una modelación más realística, ésta última se

obtuvo de datos experimentales, en particular de la medición de una capa de Ag de 80nm de espesor realizada en el proceso de Sputtering (a 50w) en la Universidad de la Calabria descrito en la sección 2.2. Conociendo los ángulos elipsométricos (Ψ y Δ) es posible aproximar el espesor y función dieléctrica de la muestra (se observan en la Figura 4.1). Las relaciones matemáticas para obtener la función dieléctrica son las siguientes:

$$\rho = \tan \Psi \exp(-i\Delta) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = n + ik = \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \tan \theta_i \right)^2} \quad (4.2)$$

Donde θ_i es el ángulo de incidencia. La Figura 4.1 muestra los ángulos elipsométricos Ψ y Δ de 25° a 70° .

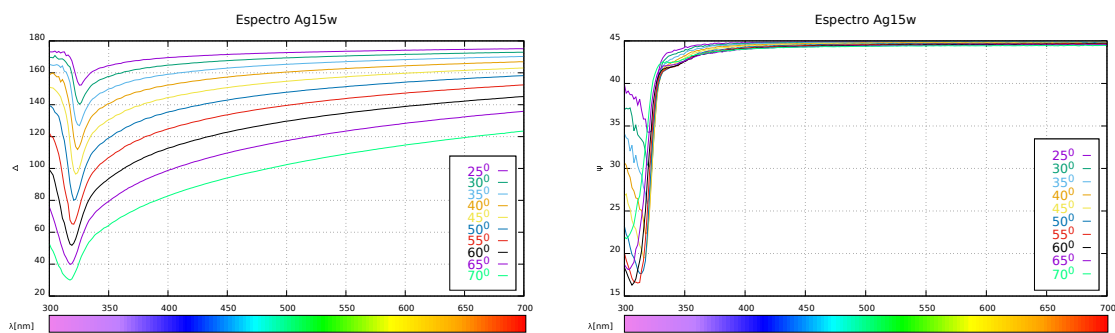


Figure 4.1: Espectro de los ángulos elipsométricos de la muestra de Vidrio-Ag(15w)100nm

Realizando los cálculos pertinentes para los ángulos de 25° a 70° con la ecuación 4.1 en la ecuación 4.2, y promediando, se obtuvo la Figura 4.2, que muestra la permitividad (parte real e imaginaria) de la capa de Ag de 80nm de espesor a 50w .

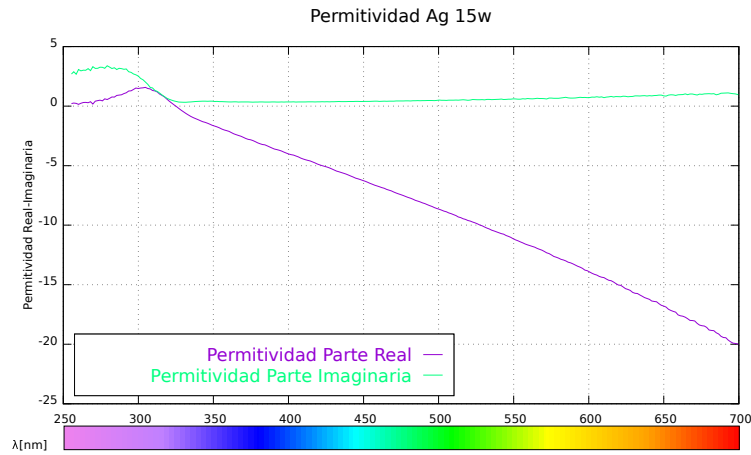


Figure 4.2: Permittividad capa de Ag(50 w) con 80nm de espesor .

Esta permitividad encontrada de la Figura 4.2 por las ecuaciones 4.1 y 4.2 es muy parecida a la permitividad de Johnson and Christy [21] y a la permitividad del libro de Edward D. Palik [18]. En la siguiente Figura 4.3 se pueden observar las tres permitividades.

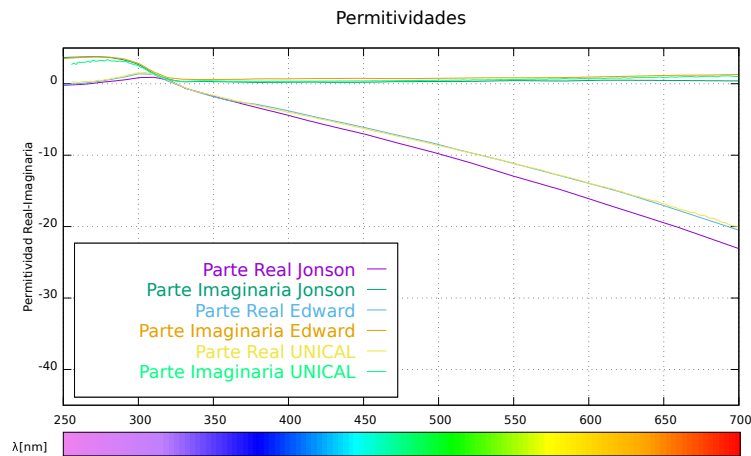


Figure 4.3: Permittividades de Johnson and Christy, Edward D. Palik y la obtenida en la UNICAL (Ag-50w-con 80nm de espesor).

Por lo tanto, para las simulaciones posteriores se utilizó la permitividad obtenida en la Universidad de la Calabria como permitividad aproximada de las Nanopartículas de Ag.

Uno de los objetivos para utilizar modelos de medio efectivo, en nuestro caso, el modelo de Maxwell-Garnett es obtener una predicción del color de las estructuras fabricadas en la sección 2.1. Para lo cual se simuló la permitividad efectiva o permitividad de Maxwell Garnett con la cual se puede calcular la transmitancia para cada uno de los modelos como se muestra en la siguiente sección. La transmitancia experimental de las estructuras de la sección 3.1 se observa en la siguiente Figura 4.4

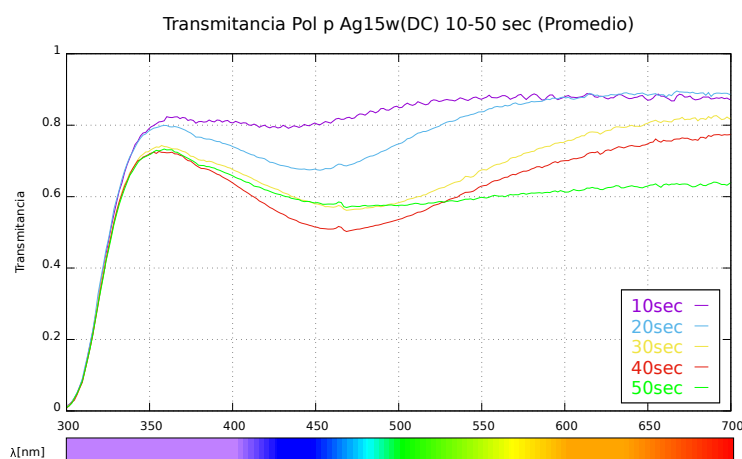


Figure 4.4: Transmitancia de las muestras de Vidrio-Nanoislas de Ag de 10,20,30,40,50 segundos .

4.1 Modelo de Maxwell Garnett Clásico

En este modelo se utilizó la ecuación 1.13 donde como primera aproximación toma en cuenta la fracción de volumen de las nanopartículas (f), la permitividad del medio (ϵ_{aire}) y la permitividad aproximada de las nanopartículas (ϵ_{np}). Los resultados obtenidos de la transmitancia se los clasificó desde 10 a 50 segundos con fracción de volumen de 0.1 a 0.9. Además, se incluyó la absorción del vidrio que tenía un espesor de $1.2mm$ y la absorción de las Nanopartículas de Ag, con la ley de ley de Bouguer-Lambert-Beer [22] (ecuación 4.3). Y el espesor de las

Nanopartículas de Ag se obtuvo mediante el análisis AFM con el Software Gwyddion [23].

$$I_{abs} = I_0 \exp(-\gamma d) \quad (4.3)$$

Donde I_0 es la intensidad inicial, γ la constante de absorción y d el espesor.

$$\gamma = \frac{2\pi k}{\lambda} \quad (4.4)$$

Donde k es la parte imaginaria de la permitividad ($\epsilon = n + ik$).

Con todas estas consideraciones la transmitancia en el modelo de Maxwell Garnett se observan en las siguientes Figuras 4.5 – 4.6 – 4.7.

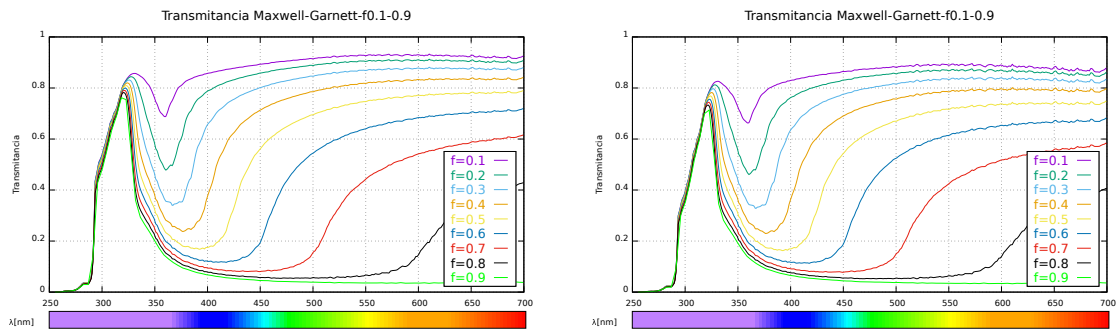


Figure 4.5: Transmitancia de Maxwell Garnett de 10 y 20 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

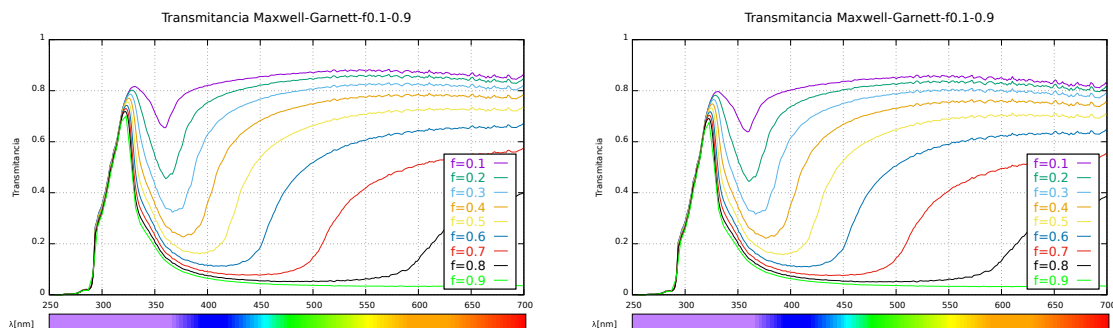


Figure 4.6: Transmitancia de Maxwell Garnett de 30 y 40 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

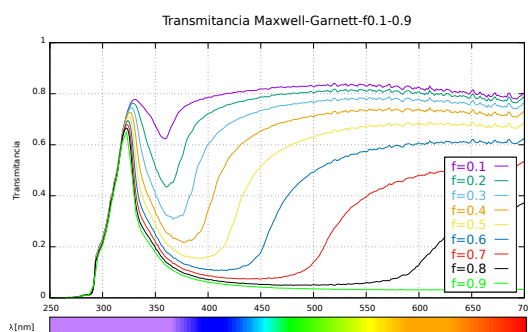


Figure 4.7: Transmitancia de Maxwell Garnett de 50 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

4.2 Modelo de Maxwell Garnett Mie

En este modelo se utilizó las ecuaciones 1.14 y 1.16, donde se incorpora el radio promedio de las nanopartículas mediante la derivación de la polarizabilidad del dipolo eléctrico de la teoría de Mie. Además, esta aproximación considera el confinamiento intrínseco y los efectos dinámicos extrínsecos. Las consideraciones de la absorción, y más parámetros son los mismos que en la sección 4.1. Los resultados obtenidos con esta aproximación se puede observar en las siguientes Figuras 4.8 – 4.9 – 4.10:

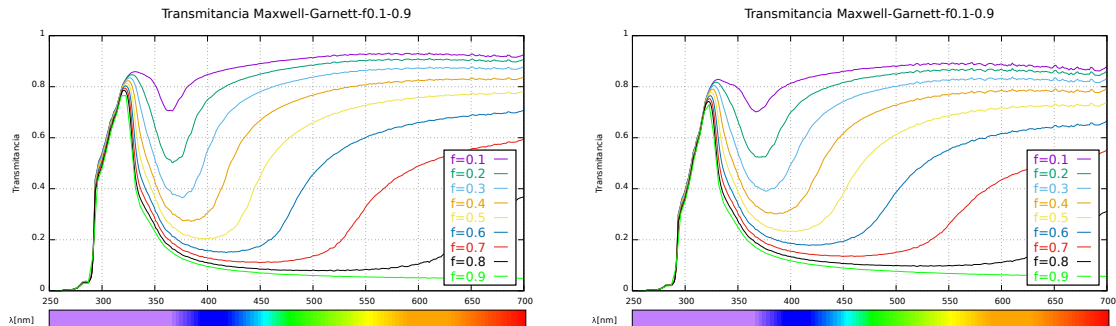


Figure 4.8: Transmitancia de Maxwell Garnett-Mie de 10 y 20 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

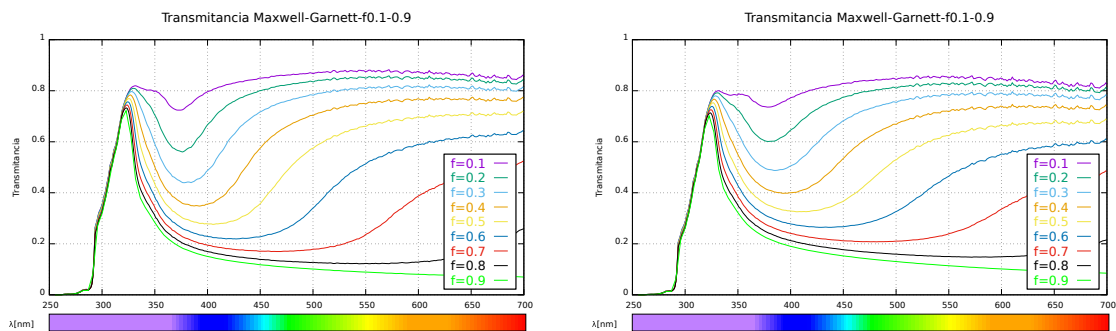


Figure 4.9: Transmitancia de Maxwell Garnett Mie de 30 y 40 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

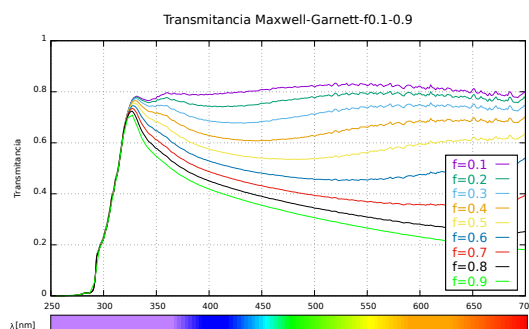


Figure 4.10: Transmitancia de Maxwell Garnett Mie de 50 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

4.3 Modelo de Maxwell Garnett Mie Mejorado

Este modelo es mejor que los dos modelos anteriores debido a que utiliza los parámetros ya establecidos de los dos modelos anteriores, e incorpora el parámetro de la función de distribución de radios de las Nanopartículas de Ag. Esta función de distribución se calculó mediante el Software Gwyddion [23]. Los resultados obtenidos se observan en las siguientes Figuras 4.11 – 4.12 – 4.13:

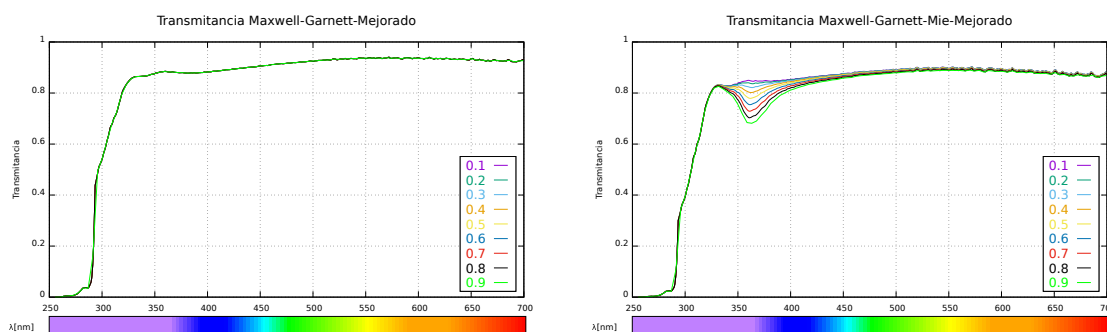


Figure 4.11: Transmitancia de Maxwell Garnett Mie Mejorado de 10 y 20 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

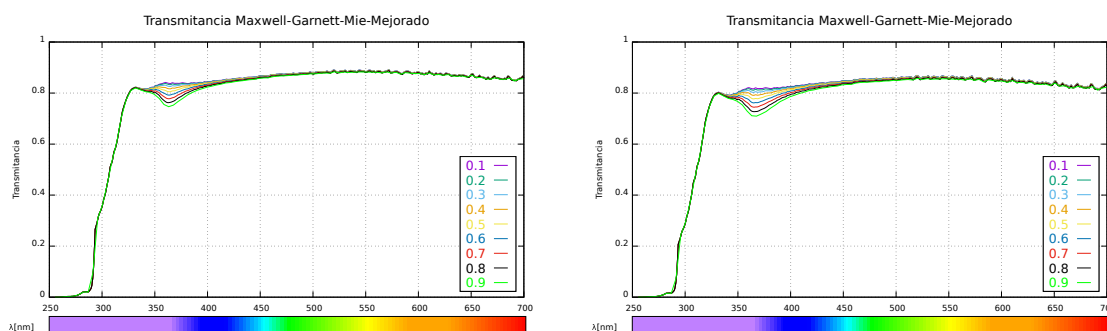


Figure 4.12: Transmitancia de Maxwell Garnett Mie Mejorado de 30 y 40 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

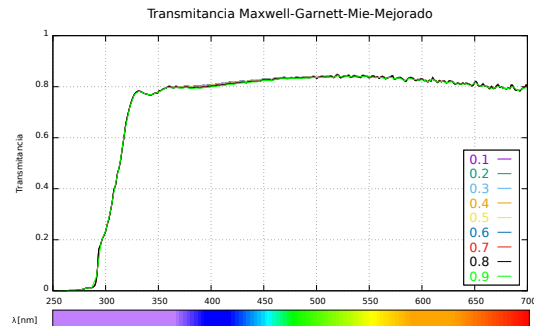


Figure 4.13: Transmittancia de Maxwell Garnett Mie Mejorado de 50 segundos con fracción de volumen de 0.1 – 0.9

Finalmente, se observa la Figura 4.14 donde muestra los diferentes tiempos de deposición con sus respectivas fracción de volumen.

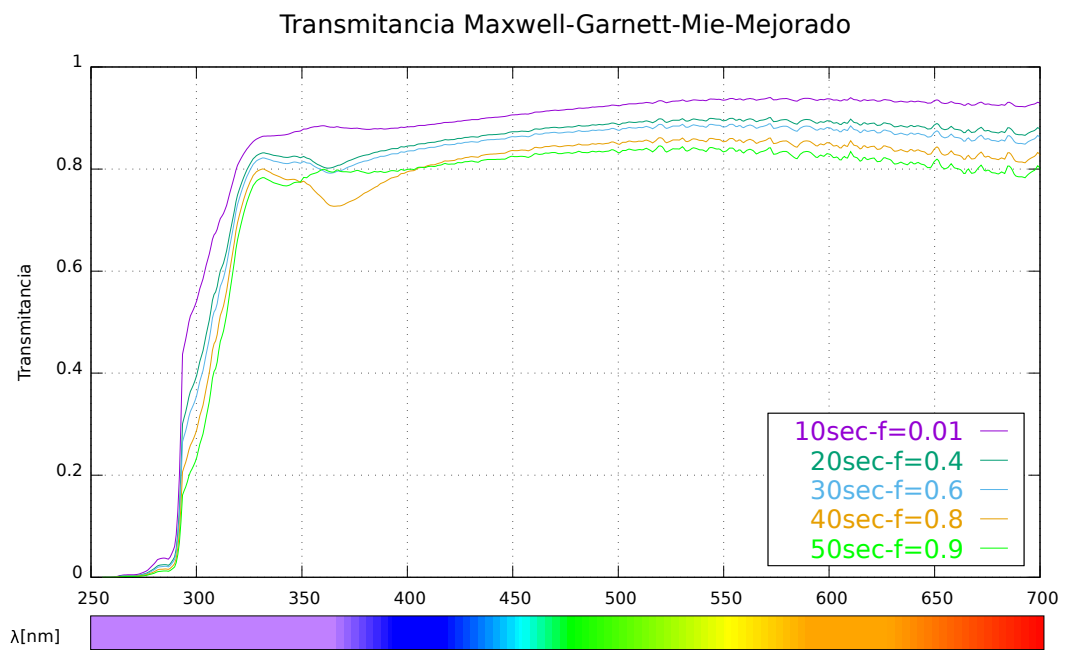


Figure 4.14: Transmittancia de Maxwell Garnett Mie Mejorado de 10, 20, 30, 40 y 50 segundos con sus respectivas fracciones de volumen.

4.4 Discusión de Resultados

Los resultados del modelo de Maxwell Garnett Clásico mostrados en la sección 4.1 son bastantes distantes a los resultados experimentales de la Figura 4.4, esto se debió al hecho de que sólo se toma en cuenta la fracción de volumen (f) de las Nanopartículas de Ag (ver ecuación 1.13). Por lo tanto, para mejorar los resultados experimentales se dispone del modelo de Maxwell Garnett Mie, donde toma en cuenta más consideraciones como son: el radio promedio R y la polarizabilidad α de las Nanopartículas de Ag (ver ecuación 1.16). Los resultados del modelo de Maxwell Garnett Mie que se muestran en la sección 4.2 mejoran un poco, pero no son los adecuados para nuestros propósitos. El modelo más realista es el Modelo de Maxwell Garnett Mejorado 4.3 donde toma en cuenta la variación de tamaño de las Nanopartículas introduciendo la función de distribución de radios $f(R)$ (ver ecuación 1.17). Los resultados del Modelo de Maxwell Garnett Mie Mejorado se observan en la Figura 4.14 donde se aprecia una mejoría sustancial en comparación con los otros dos modelos. Por lo tanto, éste último modelo es el adecuado para estudiar este tipo de estructuras, por ende se va a utilizar como base para estructuras multicapa.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

1. A lo largo de todo este trabajo de investigación se logró satisfactoriamente fabricar y caracterizar estructuras híbridas fotónicas-plasmonicas para ser utilizadas como PUF's ópticas fuertes, debido a que obtuvieron tres niveles de seguridad los cuales fueron: Cromática, Espectral y Morfológica.
2. Los resultados del análisis cromático muestran claramente que cada una de las estructuras fabricadas cuentan con su propio color único, el cual se logró caracterizar mediante coordenadas en el espacio de color CIE1931, cumpliendo con el nivel 1 de seguridad. Los resultados del análisis espectral muestra que cada una de las estructuras tiene su propia e irrepetible forma espectral lo cual cumple con el nivel 2 de seguridad. Y finalmente, los resultados morfológicos obtenidos por el AFM y por el SEM, que posteriormente fueron analizados por el software de identificación Sift mostró resultados esperados en la detección de similitud, lo cual cumplió con el nivel 3 de seguridad. Por lo tanto, las estructuras se consideran una PUF óptica fuerte .

3. Un trabajo adicional en el proyecto de investigación se centro en encontrar un método matemático para predecir los colores obtenidos por las estructuras. Se eligió el modelo de Maxwell-Garnett, debido a que modela las propiedades ópticas de inclusiones esféricas en un medio dieléctrico, lo cual es adecuado para las estructuras fabricadas. Los resultados teóricos de la transmitancia obtenidos por la aproximación de Maxwell Garnett fueron diferentes a lo experimental, esto se debió al hecho que no se consideró explícitamente el radio de las Nanoislas de Ag y sólo se consideró la fracción de volumen de las inclusiones, y por tanto, tampoco se consideró las contribuciones de la polariabilidad de cada una de las inclusiones. Se utilizó el modelo de Maxwell Garnett Mie el cual incorpora la dependencia radial mediante el primero coeficiente de Mie y la contribución de las polarizaciones de las Nanoislas, los resultados no cambiaron en gran medida pero tuvo una cierta mejora. Finalmente, se utilizó la aproximación Maxwell Garnett Mie Mejorado el cual toma en cuenta las consideraciones de los dos modelos e incorpora la función de distribución de los radios de las Nanoislas de Ag. Los resultados tuvieron una mejora sustancial, por lo que este modelo es adecuado para modelar este tipo de estructuras que posteriormente se generalizará a estructuras multicapas.
4. El trabajo de investigación presentado deja puertas abiertas para futuras investigaciones. Por ejemplo, usar Nanoislas de algún otro metal como es el cobre, el oro o el aluminio, ya que se obtendría una gama de colores distintos y únicos.

Capítulo 6

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar los resultados teóricos del modelo de Maxwell Garnett, Maxwell Garnett Mie y Maxwell Garnett Mie Mejorado se requiere un mayor número de muestras caracterizadas, debido a que en la presente investigación sólo se logró utilizar 2 muestras experimentales. Además, para obtener una estadística fiable se recomienda utilizar al menos unas 100 muestras. Y finalmente, se recomienda caracterizar el vidrio utilizado en las deposiciones debido a su gran absorción en el UV.
2. En cuanto a la caracterización de la morfología tanto AFM como SEM se requiere mejorar la resolución de la medición para eliminar el ruido y con ello obtener una función de distribución de radios más fiable.

REFERENCIAS

- [1] Vincenzo Caligiuri, Aniket Patra, Maria P De Santo, Agostino Forestiero, Giuseppe Papuzzo, Dante M Aceti, Giuseppe E Lio, Riccardo Barberi, and Antonio De Luca. Hybrid plasmonic/photonic nanoscale strategy for multilevel anticounterfeit labels. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(41):49172–49183, 2021.
- [2] Y Battie, A Resano-Garcia, N Chaoui, Y Zhang, and A En Naciri. Extended maxwell-garnett-mie formulation applied to size dispersion of metallic nanoparticles embedded in host liquid matrix. *The Journal of chemical physics*, 140(4), 2014.
- [3] C Springer. Trade in counterfeit and pirated goods: Mapping the economic impact.
- [4] Yansong Gao, Said F Al-Sarawi, and Derek Abbott. Physical unclonable functions. *Nature Electronics*, 3(2):81–91, 2020.
- [5] Nikolai G Khlebtsov and Lev A Dykman. Optical properties and biomedical applications of plasmonic nanoparticles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(1):1–35, 2010.
- [6] Diagrama de cromaticidad CIE 1931. https://aulapc.es/lupa_busquedas_posit.html2tecnicoAÃ2.42, 2013.

- [7] Entendiendo el espacio de color CIE L*A*B*. <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>, -.
- [8] Inc. JA Woollam Co. Guide to using wvase® spectroscopic ellipsometry data acquisition and analysis software, 2008.
- [9] JA Woollam et al. Spectroscopic ellipsometry-data acquisition and analysis. *A Guide to use WVASE*, 32, 2006.
- [10] Gerd Binnig, Calvin F Quate, and Ch Gerber. Atomic force microscope. *Physical review letters*, 56(9):930, 1986.
- [11] Albertus Viljoen, Marion Mathelié-Guinlet, Ankita Ray, Nico Strohmeyer, Yoo Jin Oh, Peter Hinterdorfer, Daniel J Müller, David Alsteens, and Yves F Dufrêne. Force spectroscopy of single cells using atomic force microscopy. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1):63, 2021.
- [12] Josué Itsman Clavijo Penagos. Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (sem). *Elementos*, 3(3):133–146, 2013.
- [13] Guillermina González Mancera and María Eugenia Noguez Amaya. *Principios de microscopía electrónica de barrido y microanálisis por rayos X característicos*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
- [14] Carlos Ayora Ibáñez. *Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales*. Ministerio de Educación, 2004.
- [15] Joan Sebastian Puerto Sanchez, Edward Libardo Corregidor Carreño, et al. Análisis de una cavidad fabry-perot en sensores ópticos basados en redes de difracción de bragg.

- [16] Justin Peatross and Michael Ware. Physics of light and optics: a free online textbook. In *Frontiers in Optics*, page JWA64. Optical Society of America, 2010.
- [17] M Rakhmanov, RL Savage Jr, DH Reitze, and DB Tanner. Dynamic resonance of light in fabry–perot cavities. *Physics Letters A*, 305(5):239–244, 2002.
- [18] Edward D Palik. *Handbook of optical constants of solids*, volume 3. Academic press, 1998.
- [19] Uwe Kreibig and Michael Vollmer. *Optical properties of metal clusters*, volume 25. Springer Science & Business Media, 2013.
- [20] Tony Lindeberg. Scale invariant feature transform. 2012.
- [21] Peter B Johnson and R-WJPrB Christy. Optical constants of the noble metals. *Physical review B*, 6(12):4370, 1972.
- [22] A Herrera. Ley de bouguer-lambert-beer. *Universidad Veracruzana, México. Tomado de: <https://www.uv.mx/personal/aherrera/files/2014/05/L.-Ley-de-Bouguer-Lambert-Beer-0.pdf>*, 2014.
- [23] David Nečas and Petr Klapetek. Gwyddion: an open-source software for spm data analysis. *Open Physics*, 10(1):181–188, 2012.

Anexos

A continuación se va a presentar los ángulos elipsométricos de las primeras muestras.

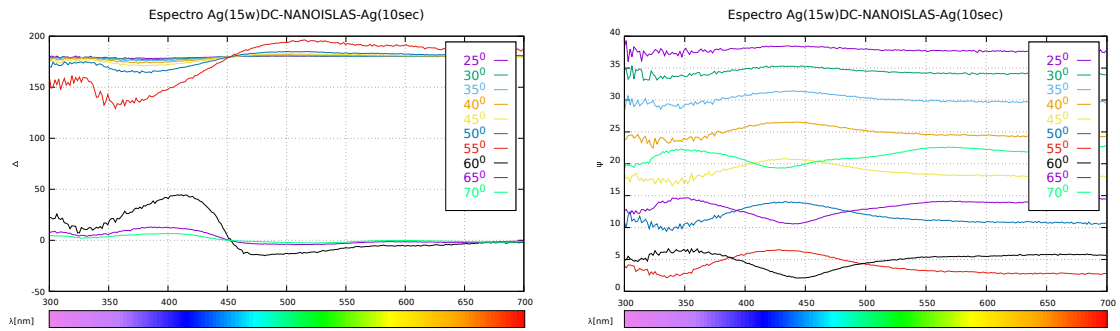


Figure 0.1: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 10 segundos

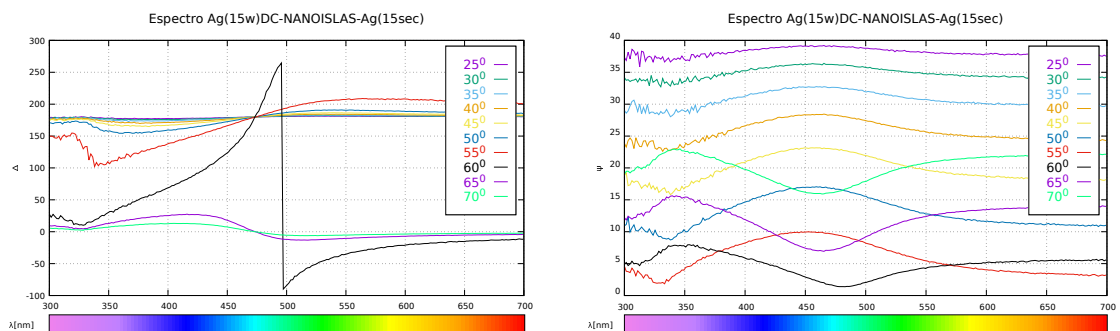


Figure 0.2: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 15 segundos

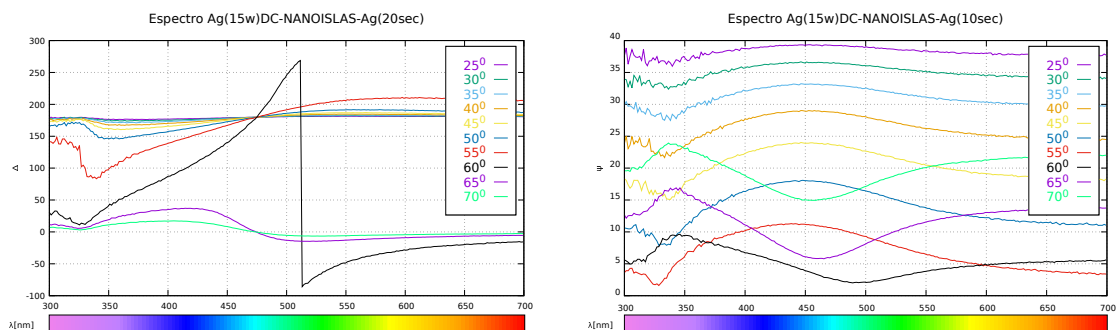


Figure 0.3: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 20 segundos

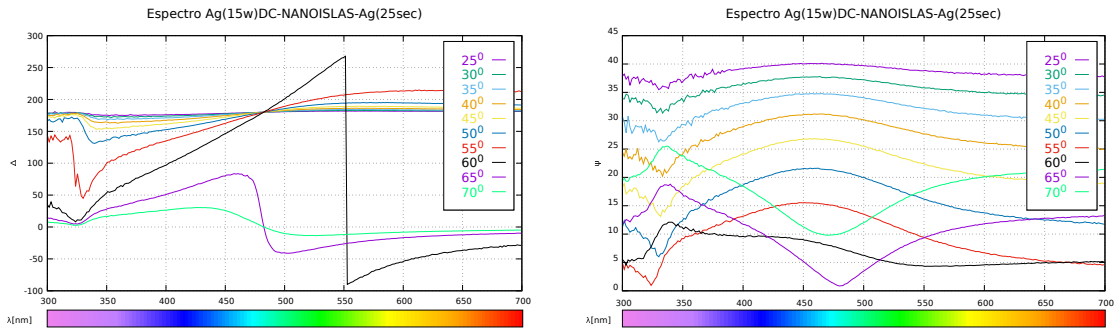


Figure 0.4: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 25 segundos

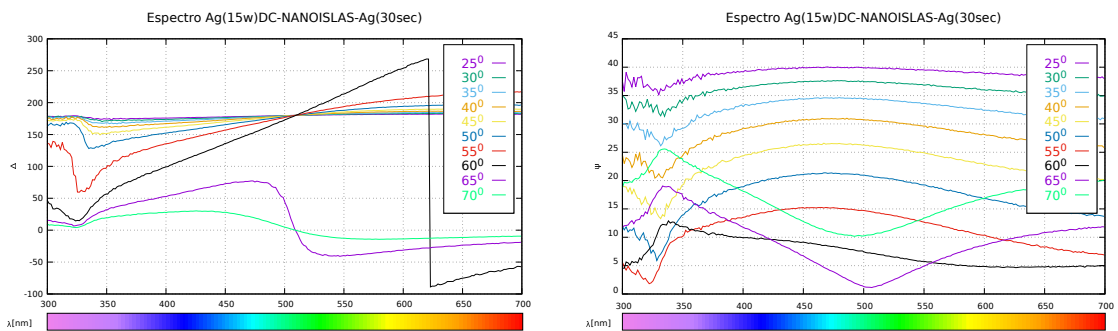


Figure 0.5: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 30 segundos

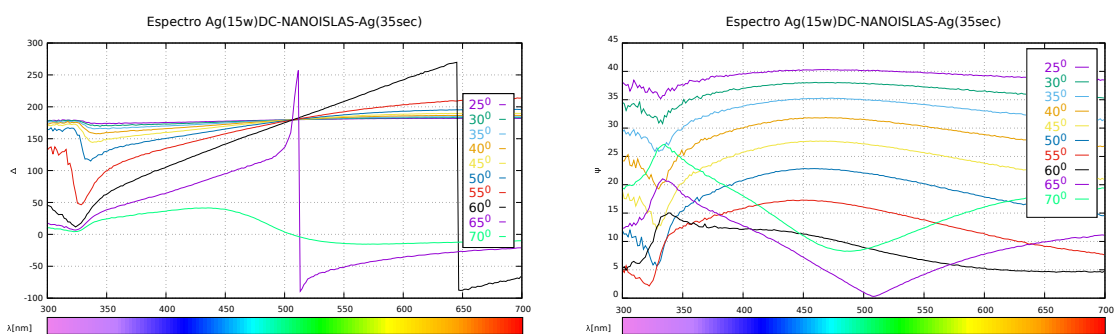


Figure 0.6: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 35 segundos

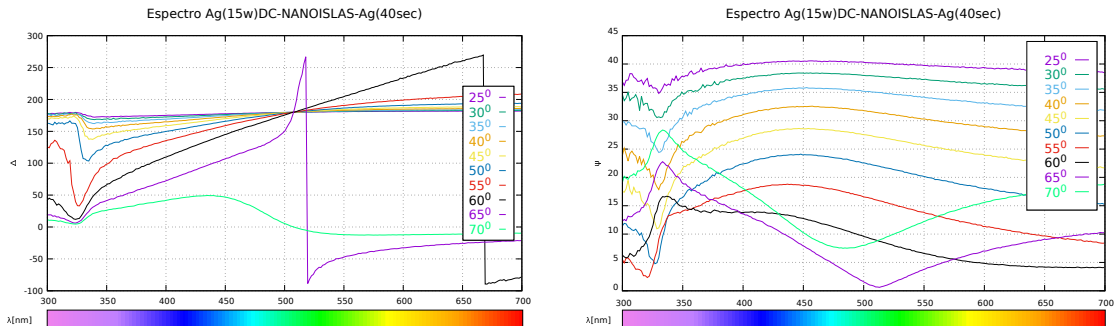


Figure 0.7: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 40 segundos

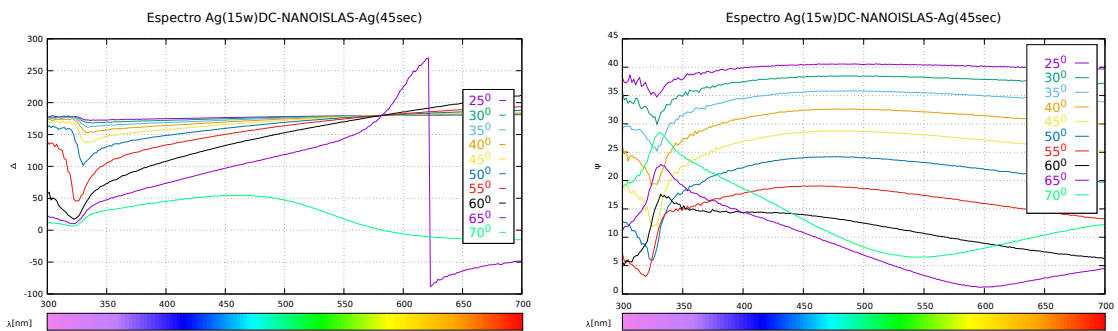


Figure 0.8: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 45 segundos

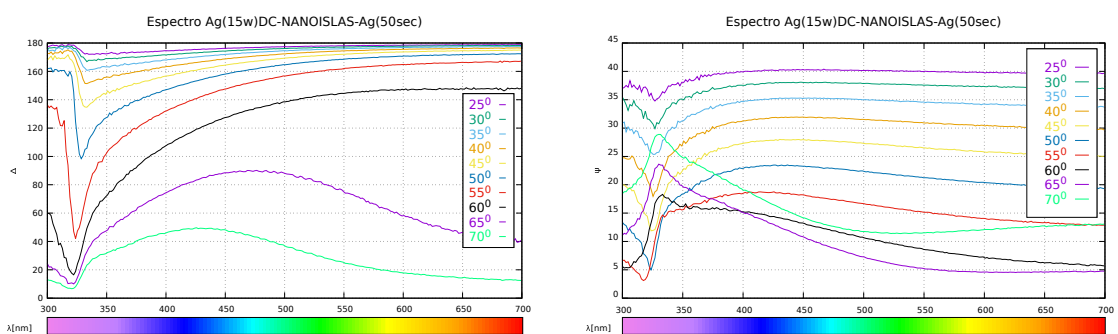


Figure 0.9: Ángulos elipsométricos de las primeras muestras de 25 a 70 grados en 50 segundos