



UNIVERSITAT D'ALACANT

Facultat de Ciències

Facultad de Ciencias

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

CURSO ACADÉMICO [2023-2024]

TÍTULO:

[PROPIEDADES ÓPTICAS Y MAGNÉTICAS DEL CRSBR]

AUTOR:

[GABRIEL SIMÓN LÓPEZ]

Resumen

Debido al descubrimiento del grafeno, un material bidimensional proveniente del grafito, los materiales bidimensionales (2D) han revolucionado el campo de la ciencia de los materiales. Estos materiales se distinguen por sus fuertes enlaces covalentes en el plano y débiles interacciones intercapas, lo que ha permitido avances significativos en diversas aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas. Debido a su estructura semiconductor cuasi-1D, su alta temperatura de ordenamiento magnético y su gran estabilidad a temperatura ambiente en comparación con otros materiales, en los últimos años, el CrSBr ha captado la atención de la comunidad científica en el ámbito de los semiconductores magnéticos, haciéndolo ideal para aplicaciones en heteroestructuras vdW funcionales.

En este trabajo se llevará a cabo una breve revisión bibliográfica de las propiedades del CrSBr que tanto han llamado la atención de la comunidad científica, su estructura cristalina, su fuerte anisotropía tanto eléctrica como magnética y sus propiedades magnéticas en *bulk* y en el límite 2D. Además, se realizará una primera estimación experimental de su índice de refracción. Para ello, se utilizarán diversas técnicas avanzadas para la caracterización y manipulación de materiales bidimensionales, como la exfoliación mecánica, además de técnicas de microscopía óptica y espectroscopía para analizar las propiedades ópticas de estas láminas, específicamente a través de métodos de micro-reflectancia y transmitancia diferencial y transferencia de los *flakes* exfoliados a sustratos de SiO_2/Si mediante un método de transferencia en seco.

Los datos obtenidos serán caracterizados realizando un análisis de las variaciones de transmitancia relativa en las imágenes RGB de las muestras, asociadas con cambios en el espesor del material, en las que se realizará el cociente entre la transmitancia de la zona evaluada con la transmitancia del sustrato. Se evaluará cómo varía la transmitancia relativa en diferentes zonas de la imagen, y se correlacionará con el espesor de estas mismas zonas obtenido del *AFM*. Se procederá a estimar el índice de refracción complejo del CrSBr con diversas simulaciones, en las que se realizará un análisis iterativo de los parámetros n y k hasta encontrar la combinación que mejor simule los datos experimentales para cada uno de los canales RGB, y se realizarán ajustes en los que se tendrá en cuenta la eficiencia cuántica del sensor. Por último, se discutirán las razones por las que el canal verde presenta el índice de refracción más fiable, las limitaciones del método y cómo mejorar el experimento en caso de querer reproducirlo.

Palabras clave: CrSBr, índice de refracción, heteroestructuras van der Waals, materiales 2D, anisotropía, semiconductor magnético.

Abstract

Two-dimensional (2D) materials have been a significant advance in the field of materials science since the discovery of graphene, a two-dimensional material derived from graphite,. These materials are distinguished by their strong covalent bonds within the plane and weak interlayer interactions, which have led to significant advances in various electronic and optoelectronic applications. In the realm of magnetic semiconductors, CrSBr has garnered attention from the scientific community in recent years due to its quasi-1D semiconductor structure, high magnetic ordering temperature, and excellent stability at room temperature compared to other materials, making it ideal for applications in functional vdW heterostructures.

This work will conduct a brief literature review of the properties of CrSBr that have attracted the scientific community's attention, such as its crystalline structure, strong electrical and magnetic anisotropy, and magnetic properties in bulk and at the 2D limit. Additionally, a first experimental estimation of its refractive index will be performed. To achieve this, various advanced techniques for the characterization and manipulation of 2D materials will be employed, including mechanical exfoliation, optical microscopy, and spectroscopy to analyze the optical properties of these sheets, specifically through methods such as micro-reflectance and differential transmission, as well as the transfer of exfoliated flakes onto SiO_2/Si substrates using a dry transfer method. The data obtained will be characterized by analyzing variations in relative transmittance in the RGB images of the samples, associated with changes in the material's thickness, by calculating the ratio between the transmittance of the evaluated area and the transmittance of the substrate. The variation in relative transmittance in different areas of the image will be evaluated and correlated with the thickness of these same areas obtained from AFM. The complex refractive index of CrSBr will then be estimated through various simulations, involving an iterative analysis of the n and k parameters until the combination that best simulates the experimental data for each RGB channel is found, with adjustments taking into account the quantum efficiency of the sensor. Finally, the reasons why the green channel presents the most reliable refractive index, the limitations of the method, and how to improve the experiment in future cases will be discussed.

Keywords: CrSBr, refractive index, van der Waals heterostructures, 2D materials, anisotropy, magnetic semiconductors.

Índice

1. Introducción	6
2. Marco teórico	7
2.1. Introducción al CrSBr	7
2.1.1. Estructura cristalina	7
2.1.2. Anisotropía electrónica	8
2.1.3. Propiedades magnéticas en <i>bulk</i>	10
2.1.4. Límite 2D	11
2.2. Fundamentos teóricos	12
2.2.1. Sistemas de multicapas ópticas	12
2.2.2. Eficiencia cuántica	13
3. Metodología	14
3.1. Exfoliación Mecánica	14
3.2. Micro-reflectancia y Transmitancia	15
3.3. Transferencia seca	17
4. Caracterización de las muestras y análisis de resultados	19
4.1. Caracterización de las muestras	20
4.1.1. AFM	20
4.1.2. Análisis de transmitancia	20
4.2. Análisis de resultados	23
4.2.1. Simulación	23
4.2.2. Ajuste de los datos	28
4.2.3. Comparación	31
5. Conclusión	33
Referencias	36
Anexo A: Gráficas	40

Anexo B: Código análisis transmitancia	41
Anexo C: Código simulaciones	51
Anexo D: Código ajuste	69

1. Introducción

Debido al descubrimiento del grafeno, un material bidimensional proveniente del grafito, los materiales bidimensionales (2D) han revolucionado el campo de la ciencia de los materiales. [1]. Estos materiales se distinguen por sus fuertes enlaces covalentes en el plano y débiles interacciones intercapas, lo que ha permitido avances significativos en diversas aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas. La aparición de técnicas como la exfoliación mecánica han facilitado la rápida prototipación y exploración de una amplia gama de propiedades electrónicas [2, 3], de todo tipo de materiales desde aislantes hasta semiconductores y metales. No obstante, la ausencia de una banda prohibida (gap) en el grafeno limita su uso directo en dispositivos electrónicos, lo que ha impulsado la investigación de otros materiales 2D [4, 5], tales como los dicalcogenuros de metales de transición (TMDCs), los fosfatos de metales de transición (TMCPs) e incluso los trihaluros de cromo (CrX_3). Aunque estos últimos han recibido una considerable atención entre los materiales 2D estudiados hasta la fecha, su baja estabilidad a las condiciones ambientales y sus bajas temperaturas de ordenamiento plantean problemas significativos para su integración en dispositivos prácticos.

En el ámbito de los semiconductores magnéticos el CrSBr ha captado la atención de la comunidad científica estos últimos años debido a su estructura semiconductor cuasi-1D y su alta temperatura de ordenamiento magnético en comparación con otros materiales estudiados hasta el momento. Este material no solo ofrece una gran estabilidad bajo condiciones ambientales, sino que también muestra un fuerte acoplamiento entre sus propiedades electrónicas y magnéticas, haciéndolo ideal para aplicaciones en heteroestructuras vdW funcionales [6]. Diversos estudios teóricos y las mediciones experimentales han demostrado que CrSBr posee un ancho de banda de conducción considerable y una notable estabilidad [7, 8], lo que facilita su integración en dispositivos de próxima generación. Debido a esta repercusión, se ha planteado como objeto de estudio de este trabajo de fin de grado, aunque el estudio de sus propiedades magnéticas se encuentra en auge, este trabajo se centra en la caracterización de propiedades ópticas, como su índice de refracción, que hasta ahora han recibido menos atención.

El **objetivo** del presente trabajo de fin de grado será principalmente **realizar una primera estimación experimental del índice de refracción del CrSBr**, además de una **breve revisión bibliográfica** de sus propiedades que tanto han captado la atención de la comunidad científica.

2. Marco teórico

En este apartado se va a realizar un breve estudio bibliográfico de las propiedades que son más interesantes del CrSBr. Además, se introducirán los conceptos necesarios para interpretar los resultados de este proyecto.

2.1. Introducción al CrSBr

Para comprender el interés que ha suscitado este material en el grupo de investigación de acogida, que motivó su propuesta, y en mí, que me llevó a elegirlo para este proyecto, se presenta una breve introducción bibliográfica sobre las propiedades del CrSBr. Se explicará su estructura cristalina, su anisotropía electrónica y magnética, así como sus propiedades magnéticas en estado *bulk* y en el límite 2D. Además de estas características, es relevante señalar que se están llevando a cabo estudios exhaustivos sobre diversas propiedades y fenómenos del CrSBr, como el acoplamiento entre cuasipartículas (magnón-excitón, excitón-fonón, entre otros) [9], estudios de su fotoluminiscencia (PL) [10], y otros experimentos que buscan estudiar su comportamiento dopándolo electrónicamente [11].

2.1.1. Estructura cristalina

Ciertas propiedades del CrSBr pueden explicarse por su estructura cristalina, el cual presenta una red ortorrómbica con grupo espacial Pmmn (59)¹ [13]. Esto implica la existencia de planos de reflexión perpendiculares a cada uno de los ejes cristalográficos, así como ejes de rotación y operaciones de simetría combinadas con traslaciones (deslizamientos) e incluye un centro de inversión. Además, sus parámetros de celda unitaria son $a = 3,553 \text{ \AA}$ $b = 4,745 \text{ \AA}$ y $c = 8,766 \text{ \AA}$, con ángulos de 90° [13], aunque estudios recientes sugieren que los verdaderos parámetros de red son $a = 3,508 \text{ \AA}$, $b = 4,763 \text{ \AA}$ y $c = 7,959 \text{ \AA}$ [12].

La estructura cristalina del CrSBr consiste en capas dobles de sulfuro de cromo, en ambos lados rodeadas por una capa de bromuro aniónico y separadas por una brecha de van der Waals(Figura 1 a-c). Cada ion de cromo está rodeado localmente por un octaedro distorsionado CrS₄Br₂ (Figura 1d). A lo largo del eje *a*, los ángulos de enlace de los iones de cromo, que están conectados por iones de sulfuro y bromuro Cr–S–Cr y Cr–Br–Cr, son a 90° ; mientras que a lo largo del eje *b*, el ángulo de enlace de los iones de cromo,

¹El grupo espacial Pmmn es uno de los 230 grupos espaciales cristalográficos que describen simetrías de las estructuras cristalinas

que están conectados por iones de sulfuro Cr–S–Cr, es de 162° . El crecimiento de los cristales de CrSBr se encuentra afectada por esta anisotropía de enlace en el plano en donde los cristales individuales crecen como placas rectangulares alargadas a lo largo del eje cristalográfico a [12].

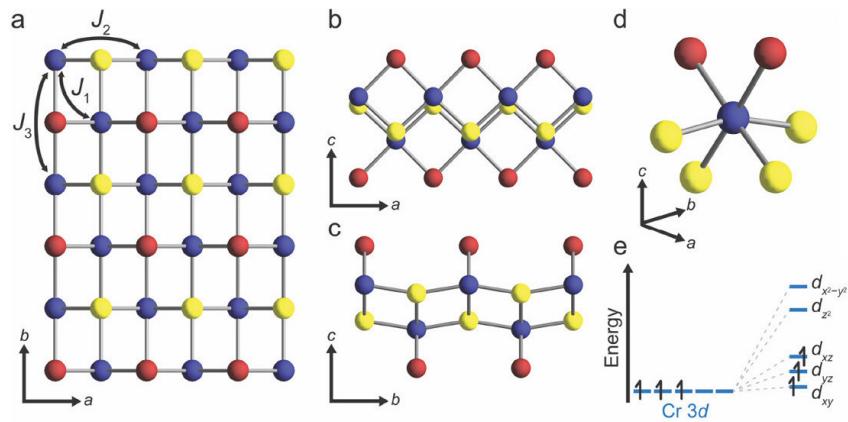


Figura 1: (a-c) Estructuras cristalinas de CrSBr vistas desde los planos ab (a), ac (b) y bc (c). Los átomos Cr, S y Br se encuentran representados en las esferas azul, amarilla y roja, respectivamente. (d,e) Cada ion de cromo está rodeado localmente por un octaedro distorsionado $\text{Cr}_4\text{S}_4\text{Br}_2$. Imagen obtenida en la Ref. [12]

Debido a la disposición ortorrómbica, los materiales que cristalizan en Pmmn suelen presentar una gran anisotropía tanto electrónica (2.1.2) como magnética (2.1.3), tal como se analiza más adelante.

2.1.2. Anisotropía electrónica

En el CrSBr los iones de cromo presentan una configuración electrónica $3d$ paramagnética con valencia tres (Figura 1 e) y $spin S = 3/2$ [14]. Como se puede ver en la figura 2a la estructura de la banda electrónica contiene un nivel de energía directo en Γ de $\approx 1,5$ eV. De los orbitales $3d$ del cromo y $4p$ del bromo se origina principalmente la banda de valencia, mientras que la banda de conducción muestra una fuerte contribución de los orbitales $3d$ del cromo y los $3p$ del azufre [15]. Debido a la interacción covalente entre el cromo y el azufre aparece un ancho de banda significativamente mayor ($\approx 1,5\text{eV}$) en comparación con otros semiconductores magnéticos bidimensionales [16].

Esta anisotropía electrónica se ha visto tanto en los cálculos de la teoría funcional de la densidad, DFT ² [18], como experimentalmente en mediciones de espectroscopía de

²Teoría fundamental de la densidad (DFT, por sus siglas en inglés)

fotoemisión de ángulo resuelto en Ag (111)³ [17]. Esta anisotropía aun siendo muy pronunciada su explicación no es tan evidente [15], dado que se piensa que la razón es debido a que se forman cadenas 1D que se propagan a lo largo del eje *b*, con un acoplamiento débil del eje *a*, como se ilustra en la figura 2b. Suponiendo este tipo de estructura al CrSBr se puede dar explicación mucho más natural a que la dirección cristalográfica *a* presente ausencia del efecto Hall (o muy débil) y a la dependencia que presenta la fotocorriente en función de la dirección de la polarización de la luz incidente, siendo la intensidad máxima en la dirección paralela a la dirección cristalográfica *b* y casi nula cuando se encuentra en la dirección cristalográfica *a* [15].

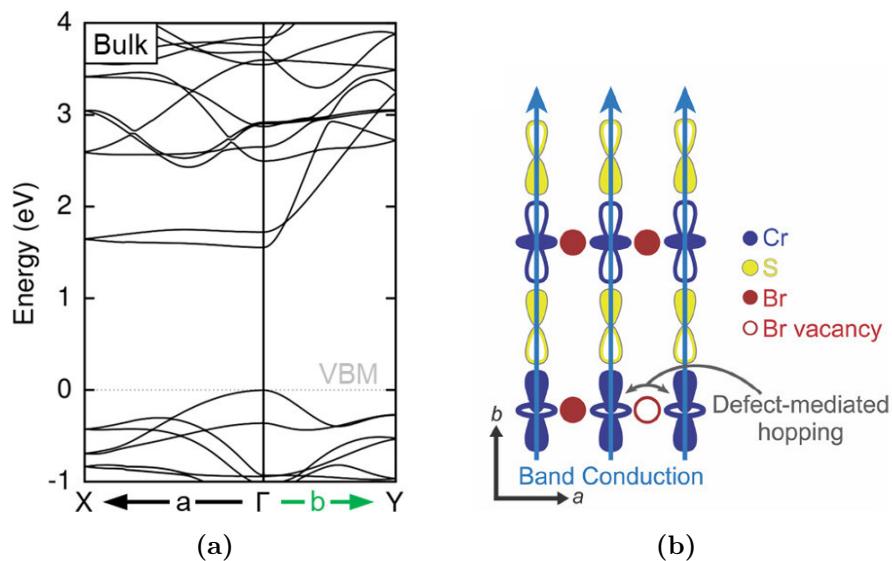


Figura 2: (a) Estructura de banda electrónica calculada para una bicapa de CrSBr a lo largo de las direcciones de momento en el plano. (b) Ilustración de la estructura cuasi 1D del CrSBr. Las flechas azules en el eje *b* ilustran la conducción de la banda en este eje, y las flechas grises indican el *hopping* a lo largo del eje *a* entre las vacantes de Br. Imágenes obtenidas de la Ref. [18].

Estas observaciones, así como en las mediciones de transporte en la relación entre la conductividad medida a lo largo del eje *b* con respecto a la del eje *a*, σ_b/σ_a , pueden ser 10.000 veces mayor que cualquier semiconductor conocido[15], son consistentes con la estructura cuasi 1-D comentada anteriormente.

³Ag (111) refiere a la orientación específica del cristal de plata, donde el '111' indica la orientación de las caras del cristal con la notación de Miller.

2.1.3. Propiedades magnéticas en *bulk*

El CrSBr exhibe un comportamiento magnético complejo influenciado por su anisotropía estructural y magnética, el cual siendo su temperatura de transición magnética $T_N = 132\text{ K}$, se divide en dos regímenes de comportamiento: por encima de su T_N , o por debajo de esta misma.

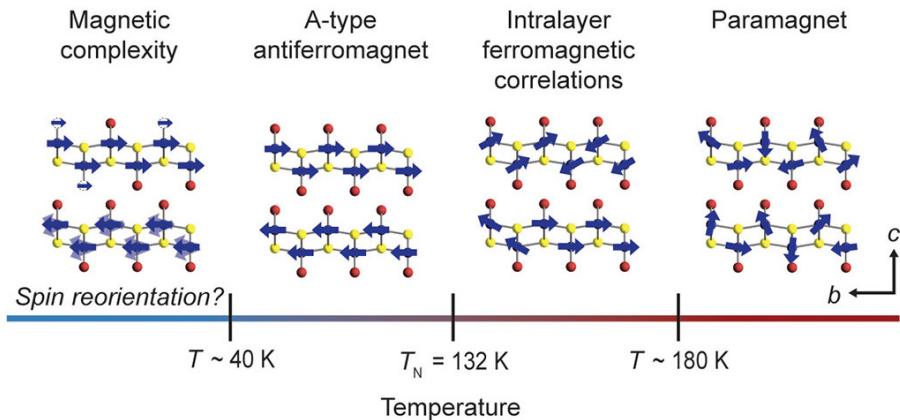


Figura 3: Esquema de los diferentes comportamientos magnéticos que presenta el CrSBr en función de la temperatura. Esquema obtenido de la Ref. [12]

Por encima de su T_N , se presentan correlaciones ferromagnéticas intracapa y un comportamiento paramagnético a partir de $T_N = 180$ [19]. Inicialmente, se sugiere la existencia de una fase ferromagnética intermedia con orden de largo alcance en cada capa 2D y un acoplamiento magnético desordenado a lo largo del eje c [19, 20]. Aunque, en este rango de temperatura, no se encuentra una anomalía clara en las mediciones de campo aplicado, lo que sugiere que las correlaciones ferromagnéticas 2D pueden existir sin una transición de fase formal [21].

Por debajo de T_N , CrSBr muestra un comportamiento magnético complejo con un cambio por debajo de 100 K y una transición cerca de 40 K [22]. Por debajo de 100 K se observan experimentalmente desaceleraciones de fluctuaciones magnéticas y reorientación del campo magnético interno, y una transición a baja temperatura por debajo de 40 K, indicada por diversos métodos experimentales, incluyendo magnetotransporte [23] y espectroscopías Raman y μSR [22]. Se sugieren cruce de anisotropía XY a anisotropía triaxial [22], y bloqueo de fluctuaciones de giro intracapa como posibles explicaciones[23].

Al observar la anisotropía magnética, también se identifica una discrepancia en los dos comportamientos diferenciados por su temperatura de transición, T_N [22, 23]. A ba-

jas temperaturas, se presenta una anisotropía triaxial, caracterizada por la diferenciación de las energías magnéticas en tres direcciones mutuamente perpendiculares dentro del material. En cambio, el modelo 2D-XY parece explicar mejor el comportamiento a temperaturas cerca de su T_N , un modelo teórico utilizado para describir el comportamiento de espines en sistemas bidimensionales. En este modelo, los momentos magnéticos giran libremente en el plano, pero se confinan a moverse dentro de un plano bidimensional.

2.1.4. Límite 2D

Hasta ahora se han planteado las propiedades que presenta el CrSBr en *bulk*, pero lo inesperado es que estas mismas propiedades semiconductoras se mantienen incluso en el límite bidimensional (2D). La estabilidad ambiental se mantiene aún en muestras con pocas capas, aunque las monocapas presentan una mayor oxidación en su exposición al aire húmedo [24]. Además de presentar estabilidad estructural, el CrSBr funciona como un buen semiconductor en el límite 2D, en el cual las muestras de bicapas presentan emisión de fotoluminiscencia máxima a 1,34 eV, un poco desplazada en comparación con las muestras en *bulk* 4(b) [7], además de que, desde temperatura ambiente hasta 2 K, los dispositivos de transporte de bicapa y monocapa presentan una resistencia medible 4 [8, 23].

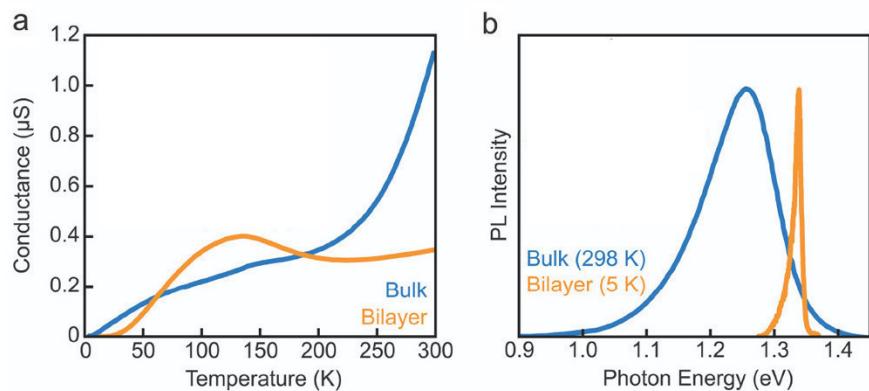


Figura 4: (a) Temperatura frente a conductancia en *bulk* (azul claro) y una bicapa (naranja) de CrSBr. (b) Emisión de fotoluminiscencia (PL) en *bulk* a 298 K (azul) y una muestra de bicapa a 5 K (naranja). [8]. Imagen modificada de la Ref. [12]

En muestras de pocas capas conserva su estructura magnética en *bulk*, con antiferromagnetismo entre capas, ferromagnetismo intracapa, y anisotropía triaxial. Una magnetización no compensada se encuentra en las muestras con un número impar de capas, y se

mide ferromagnetismo en las monocapas las cuales presentan una magnetización de área similar al esperado de las muestras en *bulk*. [25, 26].

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Sistemas de multicapas ópticas

Es necesaria una relación entre el contraste y la transmitancia relativa, medidas que se usan en este proyecto, para la obtención del índice de refracción. Esta relación puede derivarse de la representación matricial de la propagación de la luz en las distintas capas delgadas y de las ecuaciones de Fresnel. Se utiliza la expresión descrita por S.J. Byrnes en su artículo [33], y será la que utilizaremos en este proyecto.

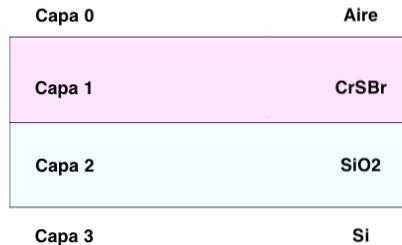


Figura 5: Esquema sistema multicapas modificado de [33]

La metodología general para derivar esta expresión se basa en considerar que la reflectancia y la transmitancia totales cumplen con las siguientes ecuaciones: $t = 1/\tilde{M}_{00}$ y $r = \tilde{M}_{10}/\tilde{M}_{00}$. Por lo que la matriz \tilde{M} se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\tilde{M} = \frac{1}{t_{0,1}} \begin{pmatrix} 1 & r_{0,1} \\ r_{0,1} & 1 \end{pmatrix} M_1 M_2 \dots M_{N-2} \quad (1)$$

Siendo N el número total de materiales, con la primera '0', y la última 'N-1' capas semiinfinitas. Y M_n está definido como:

$$M_n \equiv \frac{1}{t_{n,n+1}} \begin{pmatrix} e^{-\delta_n} & 0 \\ 0 & e^{-\delta_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & r_{n,n+1} \\ r_{n,n+1} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Con $\delta_n = \frac{2\pi n_k D_k}{\lambda}$ donde D_k es el grosor de la k-ésima capa y λ es la longitud de onda que atraviesa el sistema. Por último, a partir de las ecuaciones de Fresnel para incidencia normal, sabemos que:

$$r_{k,k+1} = \frac{n_k - n_{k+1}}{n_k + n_{k+1}}, \quad t_{k,k+1} = \frac{2n_k}{n_k + n_{k+1}} \quad (3)$$

Por tanto, se observa que, para un sistema de multicapas, la matriz \tilde{M} permite obtener las expresiones de transmitancia y reflectancia en función de los coeficientes de transmisión y reflexión. Las expresiones de los coeficientes de transmisión y reflexión son las ya mencionadas, mientras que las de transmitancia y reflectancia son las siguientes:

$$T = |t_f|^2, \quad R = |r_f|^2 \quad (4)$$

Estas expresiones son las que se van a usar en este proyecto, en los programas proporcionados por el grupo de investigación de acogida en Matlab al cual se le han hecho varias variaciones para adaptarlo a este [Anexo C]. Se encuentra reflejado en la función '*thinfilmgeneral*', la cual calcula los coeficientes de reflexión y transmisión, así como la fracción de intensidad de la luz transmitida y reflejada para un sistemas de multicapas delgadas, en general.

2.2.2. Eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica de un fotodetector CMOS (serán los que se utilizan en este proyecto), QE, se define como el porcentaje de fotones que chocan con la superficie foto-reactiva que producirá un par electrón-hueco. Es una medida precisa de la sensibilidad del dispositivo. A menudo se mide sobre un rango de diferentes longitudes de onda para caracterizar la eficiencia del dispositivo a cada energía como se puede ver en la ec. 5. Cuantos más fotones se conviertan en electrones, más sensible a la luz será un sensor y más información se podrá obtener de la imagen.

$$QE(\lambda) = \frac{N_e}{N_{ph}} \quad (5)$$

Donde N_e es el número de portadores de carga y N_{ph} el número de fotones incidentes. Es importante comentar que existen varios factores los cuales pueden afectar a la eficiencia cuántica, como puede ser que no todos los fotones sean absorbidos debido a pérdidas relacionadas con la reflexión en la superficie, ni tampoco todos los fotones absorbidos contribuyen a la photocorriente debido a que existen pérdidas por recombinación.

Para los experimentos descritos en este trabajo, se ha utilizado una camara *AmScope MU Series 18.0MP USB 3.0 Color CMOS C-Mount Microscope Camera*, la cual es una

cámara que tiene un sensor CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Estos sensores se distinguen porque convierten las cargas eléctricas generadas por la luz en cada píxel, en una señal de voltaje. A diferencia de los sensores CCD, esta señal de voltaje se amplifica, se cuantifica y se convierte en un valor digital dentro de cada píxel. Tras revisar las especificaciones espectrales del datasheet, se obtienen los siguientes datos.

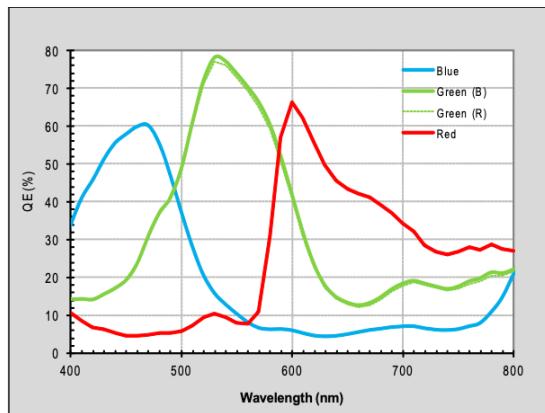


Figura 6: QE del sensor utilizado, reproducido del datasheet pág. 80

3. Metodología

En esta sección se explica la preparación y el análisis de las muestras que se han llevado a cabo en este proyecto.

En este estudio, se han utilizado diversas técnicas avanzadas para la caracterización y manipulación de materiales bidimensionales. Como son la exfoliación mecánica para obtener láminas de CrSBr, un proceso que permite aislar capas individuales gracias a las débiles fuerzas de Van der Waals que las unen. Posteriormente, empleamos técnicas de microscopía óptica y espectroscopía para analizar las propiedades ópticas de estas láminas, específicamente a través de métodos de micro-reflectancia y transmitancia diferencial. Finalmente, se realiza la transferencia de los *flakes* exfoliados a sustratos de SiO_2/Si mediante un método de transferencia en seco.

3.1. Exfoliación Mecánica

Mediante el método de la exfoliación mecánica se ha realizado la obtención de los *flakes* analizados de CrSBr en este método se desprende capa por capa el material debido a que

las fuerzas que unen las capas del mismo son débiles, por ser fuerzas de Van der Waals. Tras tomar un pequeño extracto del material del cristal CrSBr, tal y como podemos ver en la Fig. 7; (a) Se coloca cinta adhesiva (en nuestro caso *SPS 1007R Silicone-Free Blue Adhesive Plastic Film*) sobre el material a exfoliar y en (b) se retira, este proceso (c)-(d) se realiza sucesivamente entre fragmentos de cinta adhesiva hasta conseguir el espesor deseado. Hay que tener en cuenta que no se unan los fragmentos entre ellos evitando así que la superposición de capas. El siguiente paso es depositar el material exfoliado sobre PDMS (*Gel-Film WF x4 6.0 mil de Gel-Pack* en nuestro caso), el cual se trata de un excelente polímero viscoelástico a partir del cual podremos realizar un primer análisis de los *flakes* en un microscopio óptico.

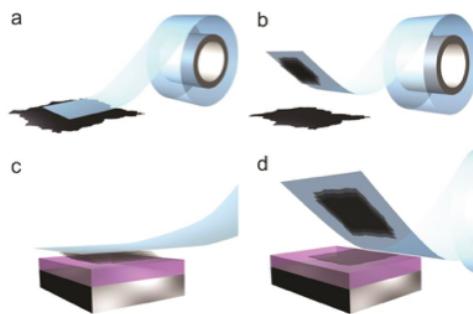


Figura 7: Esquema de la técnica de exfoliación mecánica sacada de [29]

3.2. Micro-reflectancia y Transmitancia

Con el microscopio óptico se realiza una búsqueda de los *flakes*, de tal manera que se eligen aquellos que presenten varias terrazas para así obtener un abanico más amplio de datos. Se realiza la obtención, y el posterior estudio, de los espectros de luz de estos *flakes* mediante técnicas de espectroscopía óptica como la transmitancia y micro-reflectancia diferencial. Estas técnicas se basan en iluminar el *flake* deseado, y bien en reflectancia, Fig. 8a o en transmitancia, Fig. 8b obtener y comparar los espectros de luz del sustrato con los de la muestra. Así, se realiza una primera estimación de propiedades de algunos materiales bidimensionales, como puede ser su espesor.

Para la obtención de estos espectros, se ha empleado un microscopio óptico *Motic BaMet310* con un puerto trinocular modificado, donde el tercer ocular se utiliza para la cámara digital y el espectrómetro, además de una fibra unida a una luz de fuente halógena. Primero, se determina el tamaño del núcleo de la fibra, que funcionará como obturador para recoger la luz de la región seleccionada, con un LED acoplado al extremo de la

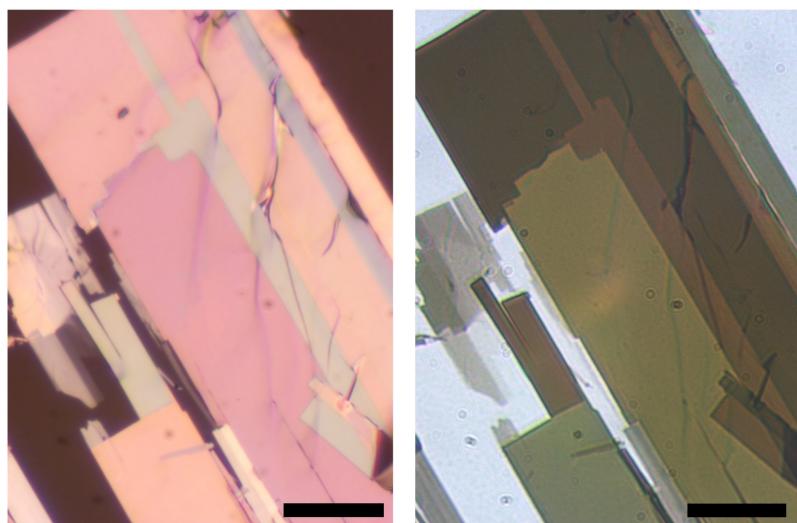


Figura 8: Imágenes de microscopía óptica para flakes de distintos espesores en PDMS. La barra de escala representa $10\mu\text{m}$

fibra conectada al espectrómetro *Compact CCD Spectrometers* del fabricante Thorlabs. Para ello, se enciende el LED y se enfoca en la muestra para medir el radio de la región iluminada, que corresponde a la imagen del núcleo de la fibra sobre la muestra, lo que permite definir el tamaño de la región de la muestra cuya luz reflejada entra en la fibra al conectarse al espectrómetro. Esta fibra recoge luz de un área circular de unos $2,5\mu m$ de diámetro. Después de determinar esta región, se desconecta el LED y se conecta la fibra al espectrómetro. El montaje experimental descrito se puede apreciar en la Fig. 9.

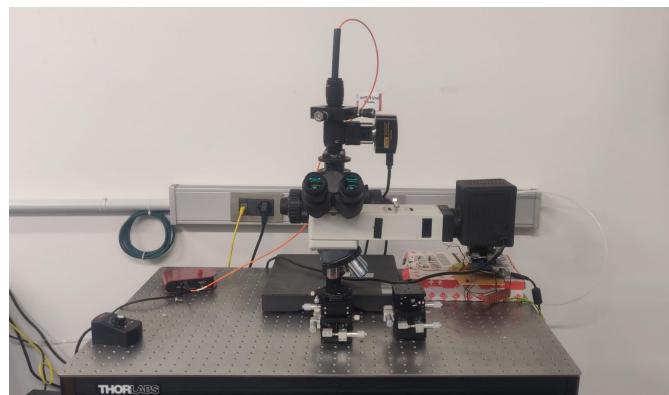


Figura 9: Montaje experimental

Una vez se obtienen los espectros de luz, se realiza una primera inspección del contraste, que se define como:

$$C = \frac{R - R_0}{R + R_0} \quad (6)$$

donde R es el espectro que se recoge de la luz reflejada por el *flake* y R_0 es el espectro correspondiente a la luz reflejada por el sustrato.

Y de la transmitancia relativa:

$$TR = \frac{T}{T_0} \quad (7)$$

donde T es el espectro que se recoge de la luz transmitida por el *flake* y T_0 es el espectro correspondiente a la luz transmitida por el sustrato.

3.3. Transferencia seca

Tras la obtención y análisis del espectro de luz del *flake* deseado, este se transfiere a un sustrato de SiO_2/Si preparada anteriormente. Existen distintos tipos de transferencias, la que se va a usar es la llamada transferencia determinista en seco Castellanos-Gomez et al. desarrollaron un método de transferencia en seco que se basa en sellos viscoelásticos de PDMS [30]. Este método presenta una ventaja con respecto a los demás, no emplea ningún paso de química húmeda, lo que se considera un gran avance en términos de velocidad de transferencia, disminución de la contaminación de las estructuras analizadas, y ya que no hay fuerzas capilares involucradas en el proceso, facilita la fabricación de dispositivos con materiales 2D suspendidos libremente.

Para preparar los sustratos de SiO_2/Si , se corta la oblea de SiO_2/Si con un utensilio con punta de diamante. Para llevar a cabo la limpieza del sustrato, se necesitan dos vasos de precipitado, uno de los cuales se llena con acetona y el otro con alcohol isopropílico (IPA). Es crucial evitar el uso de utensilios de plástico con la acetona debido a su corrosividad.

La limpieza del sustrato se realiza mediante una técnica llamada limpieza por ultrasónidos, en la cual se emplea un baño de ultrasónidos. Este proceso se basa en la emisión de ondas de alta frecuencia en el líquido mediante un cambio de tamaño en sintonía con una señal eléctrica oscilante a la frecuencia de ultrasónidos. Esto crea ondas de compresión que generan millones de microscópicos 'huecos' en el líquido, un fenómeno conocido como *cavitación*. Estas burbujas se colapsan con gran energía, aunque a temperaturas y presiones extremadamente altas, pero debido a su diminuto tamaño, solo limpian la superficie,

eliminando la suciedad y los contaminantes [31]. Para ello, se sumerge el sustrato en acetona durante unos 3 minutos en la máquina de ultrasonidos, luego se seca con argón y se cambia al vaso de precipitado que contiene IPA. Se repite el proceso con IPA y secado en argón. El argón se utiliza para secar el sustrato debido a que es un gas inerte que no reacciona con él. Para verificar la limpieza del sustrato, se puede examinar bajo un microscopio o mediante una cámara. Si está limpio, se puede proceder con la transferencia; de lo contrario, se repite el proceso hasta que el sustrato esté completamente limpio.

El proceso completo se puede ver en la Figura 10. Para favorecer la transferencia, se intenta reducir al mínimo posible el tamaño del PDMS cortándolo con un bisturí. Luego, se coloca el PDMS en el borde de un portaobjetos y se fija, con cinta adhesiva de doble cara, a una plataforma con tornillos micrométricos con la cara que contiene al PDMS hacia abajo (2). Utilizando el microscopio óptico se localiza el flake (3), teniendo en cuenta que ahora este se encuentra invertido, y se realiza la transferencia a otra plataforma de tornillos micrométricos, donde se pega el sustrato de SiO_2/Si con cinta adhesiva de doble cara, alineándolo con el PDMS. Finalmente, se baja lentamente la plataforma que contiene el portaobjetos con el PDMS hasta que entra en contacto con el sustrato, observándose cómo aparece un frente de onda avanzando por el PDMS (4). Una vez transferido el flake, se revierte el proceso para despegar lentamente la muestra, observando el mismo frente de onda retrocediendo a lo largo del PDMS (5). Para verificar el éxito de la transferencia, se busca el flake transferido en el sustrato de SiO_2/Si utilizando el microscopio óptico (6).

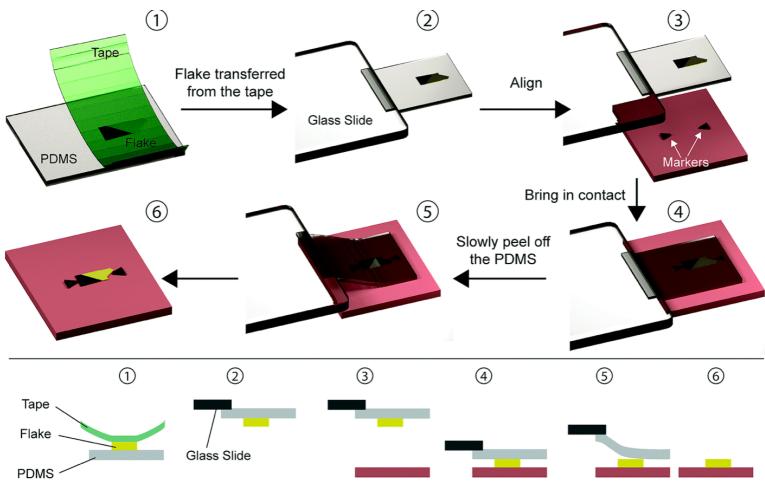


Figura 10: Esquema método de transferencia en seco PDMS de [27]. Se exfolia el flake a transferir sobre el PDMS (1), este se adhiere a una lámina de vidrio conectada a un micromanipulador (2). Se alinea el flake con el sustrato utilizando un microscopio óptico (3) se ponen en contacto (4). Se desprende lentamente el PDMS (5), depositando el flake en el sustrato (6).

Una vez transferido el flake deseado 11, se vuelve a realizar una micro-reflectancia de la muestra, para así comparar los resultados con lo anterior. No se puede hacer transmittancia debido a que el SiO_2/Si no es transparente.

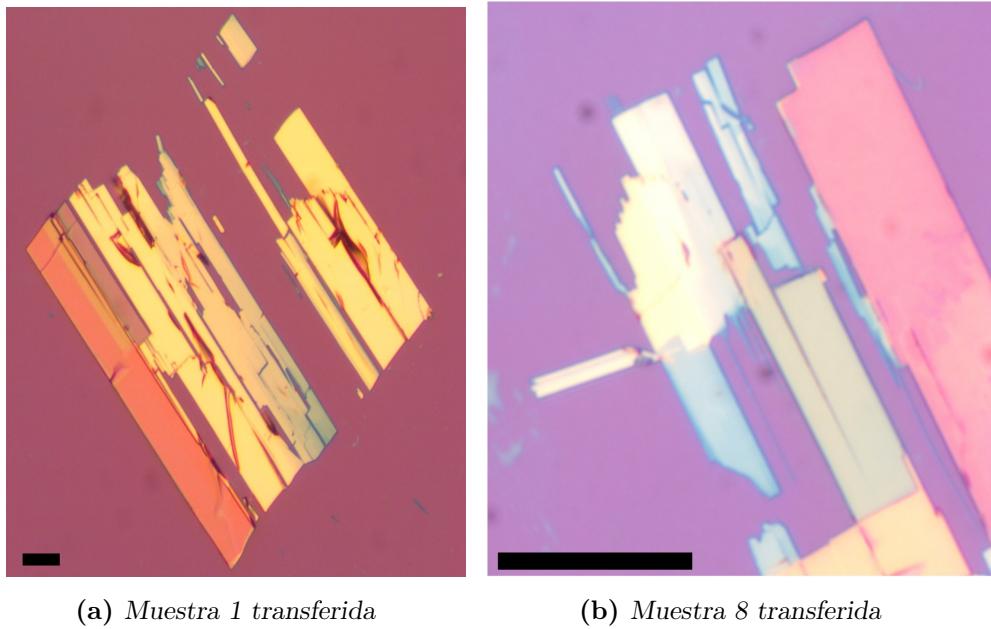


Figura 11: Muestras de Flakes transferidos en SiO_2/Si . La barra de escala representa $10\mu m$

4. Caracterización de las muestras y análisis de resultados

Una vez preparadas las muestras, se obtienen los espesores en el microscopio de fuerza atómica, *AFM* y se procede a abordar el objeto del TFG: estimar el índice de refracción e índice de extinción del CrSBr. Es importante señalar que en este proyecto, al hacer referencia al índice de extinción, se estará haciendo alusión a la parte imaginaria del índice de refracción. Este índice indica la medida en que la luz se atenúa o que tan rápido se absorbe al atravesar un material y se denota con la letra k [33]. Cabe destacar que, si $k < 0$, esto corresponde a la emisión estimulada. Para ello, se llevan a cabo diversas estimaciones a partir de simulaciones y ajustes, que se explican a continuación:

4.1. Caracterización de las muestras

4.1.1. AFM

Un método muy eficaz para estimar los distintos espesores de las muestras transferidas a SiO_2/Si consiste en la comparación de las imágenes de transmitancia relativa a través de su comparación con mapas topográficos de microscopía de fuerza atómica (AFM). Tras realizar el correspondiente tratamiento de imagen con *Gwyddion*, el cual es un software dedicado a la visualización y el análisis de datos a partir de técnicas de microscopía de sonda de barrido, se obtienen las siguientes imágenes 12:

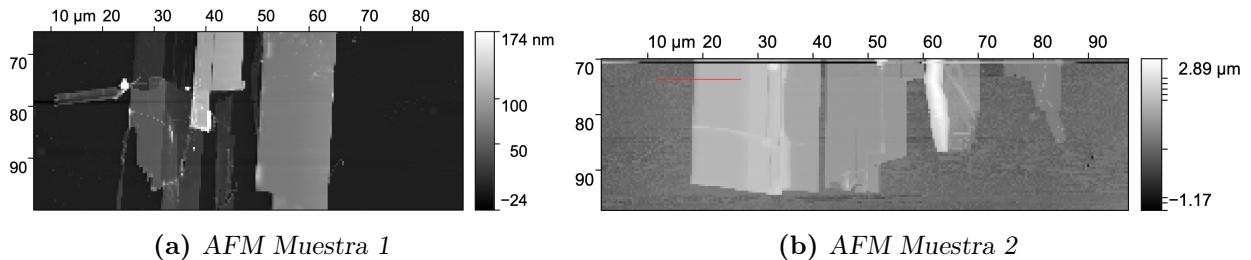


Figura 12: Imágenes topográficas de los *Flakes* presentados en la Fig.11 procesados

A partir de las cuales se obtiene la extracción de perfiles de las imágenes de topografía, proporcionada por *Gwyddion* tal y como se puede ver en la Fig. 13.

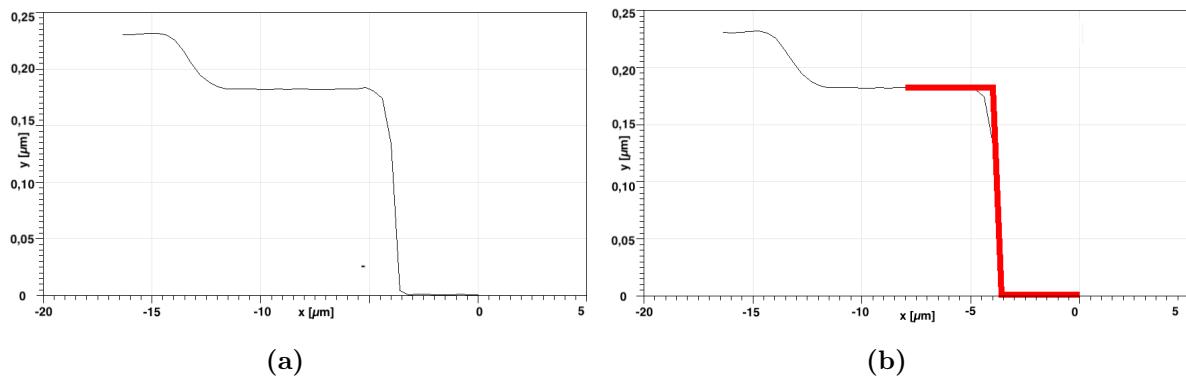


Figura 13: (a) Perfil de la muestra 12b.(b) Análisis técnico de perfiles de *Gwyddion* de la muestra 12b en donde la línea roja representa el análisis del perfil 180 ± 1 nm

4.1.2. Análisis de transmitancia

La transmitancia relativa de cada *flake* depende de λ , n , k y espesor. El espesor se determina a partir de las medidas de *AFM*, y se realiza el estudio para distintos valores

de longitud de onda (λ), por lo que, conocidos espesor y λ , se pretende obtener el índice de refracción. El método que se va a utilizar para la obtención del índice de refracción del CrSBr es similar al realizado en la Ref. [32], el cual se basa en la comparación de imágenes de microscopía óptica en transmisión y mapas topográficos de microscopía de fuerza atómica, *AFM* para la estimación del índice de refracción de un material 2D. En el caso de la Ref. [32], se estudian láminas de *FePS₃*. En este, se utilizan las variaciones de transmitancia relativa, que pueden extraerse de las imágenes ópticas asociadas con cambios en el espesor del material. Es decir, se realiza el cociente entre la transmitancia de la zona evaluada con la transmitancia del sustrato. Así, se evalúa cómo varía la transmitancia relativa en diferentes zonas de la imagen, y se correlaciona con el espesor de estas mismas zonas obtenido del *AFM*. Por último, se emplea el método de matriz de transferencia explicado en 2.2.1, en el cual se considera el caso de incidencia normal de luz en una capa de material intercalada entre dos medios, utilizando índices de refracción reales y complejos, descrito por S.J. Byrnes en [33], para calcular los coeficientes de reflexión y transmisión, así como la fracción de intensidad de la luz transmitida y reflejada para un sistemas de multicapas delgadas, en general.

El análisis de la transmitancia se realiza mediante un código implementado en Matlab 34[Anexo B], con el objetivo de obtener datos que se utilizan para graficar el espesor frente a la transmitancia relativa. Para ello, se carga la imagen de una de las muestras a analizar en PDMS Fig. 8 en formato RGB, y se divide en tres canales, correspondientes a los colores rojo, verde y azul de la Fig. 14. Se selecciona una línea vertical en la imagen, j , que actúa como 'perfil' que sirve para extraer y analizar los datos de la intensidad a lo largo de una columna específica de píxeles Fig. 15, con el promedio de intensidad del sustrato obtenido al definir un área rectangular en la imagen. Con este cociente se obtiene la transmitancia relativa a lo largo de una recta definida.

Se puede observar las figuras 14c y 14f correspondientes al canal azul de cada *flake* presentan un contraste óptico notablemente más reducido que los demás canales, esto es debido a que la lámpara que se está utilizando en este proyecto es halógena siendo el verde 14b y 14e, aunque también el rojo 14a y 14d, canales más fiables para su estudio. Esto se podrá observar más adelante en el apartado 4.2.2 en los errores que presenta el canal azul.

A partir del gráfico de píxeles Fig. 15, se definen los límites de la terraza que se desea analizar, se promedian sus valores de transmitancia relativa para cada canal (RGB), y se repite este proceso variando tanto la j , como los límites de las terrazas, obteniéndose así la media de las transmitancias relativas para cada espesor deseado en RGB.

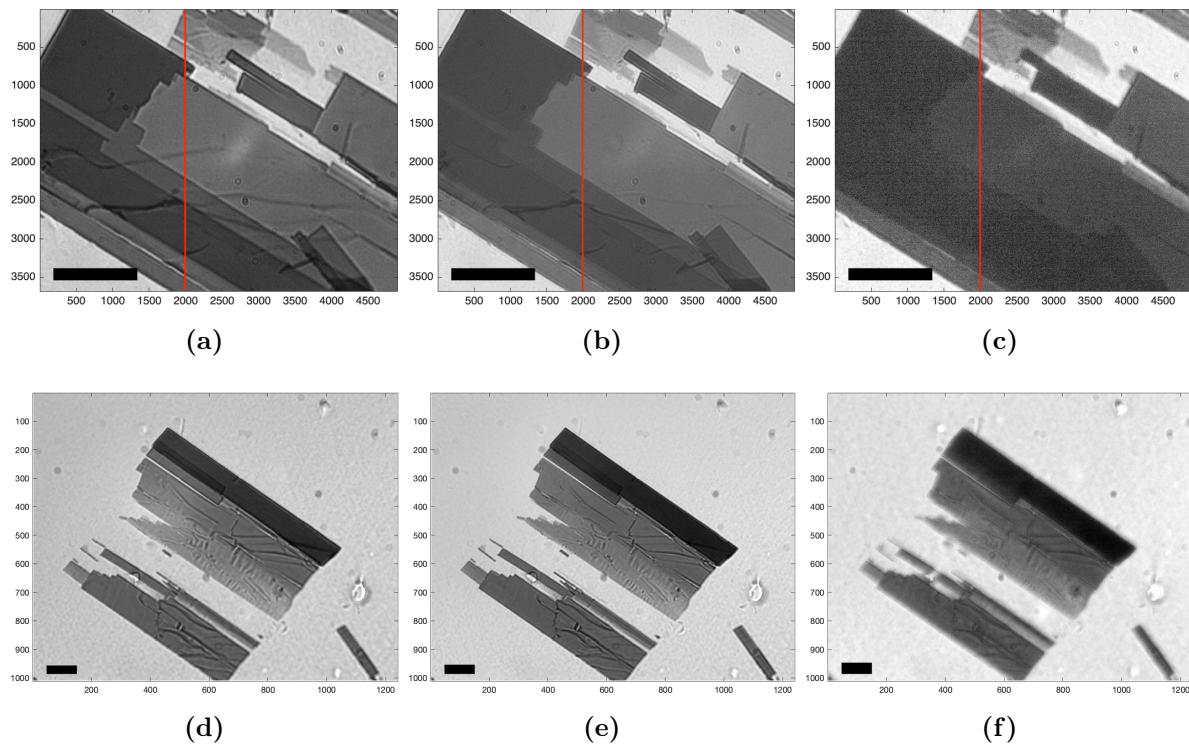


Figura 14: (a)-(c) Imagen obtenida en microscopio óptico en transmisión para el primer flake de CrSBr para los canales rojo, verde y azul. **(d)-(f)** Imagen obtenida en microscopio óptico en transmisión para el segundo flake de CrSBr para los canales rojo, verde y azul. La barra de escala representa $10\mu m$ y la recta roja vertical representa el 'perfil' en $j=2000$

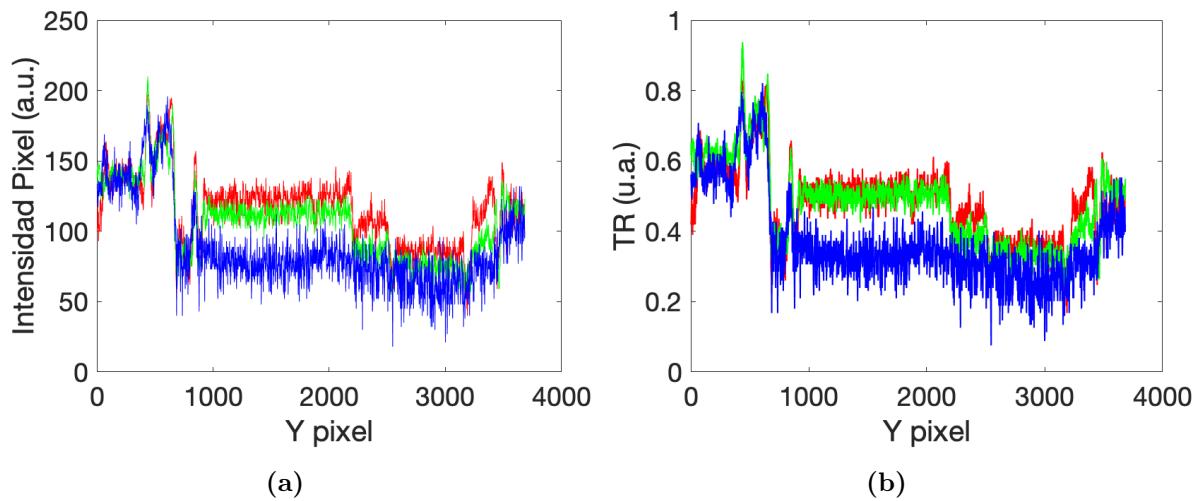


Figura 15: (a) Se grafican las intensidades a lo largo de la línea vertical seleccionada, muestra como varían las intensidades para cada terraza del *flake* para $j = 2000$. (b) Se generan gráficos de la transmitancia relativa en función de los píxeles, muestra como varía la transmitancia relativa en función de la posición, para $j = 2000$

Por último, de la relación entre la transmitancia relativa y el espesor se infiere el valor del índice de refracción, para ello se grafican los datos obtenidos que, en el siguiente apartado se necesitarán tanto para la simulación 4.2.1, como para el ajuste 4.2.2.

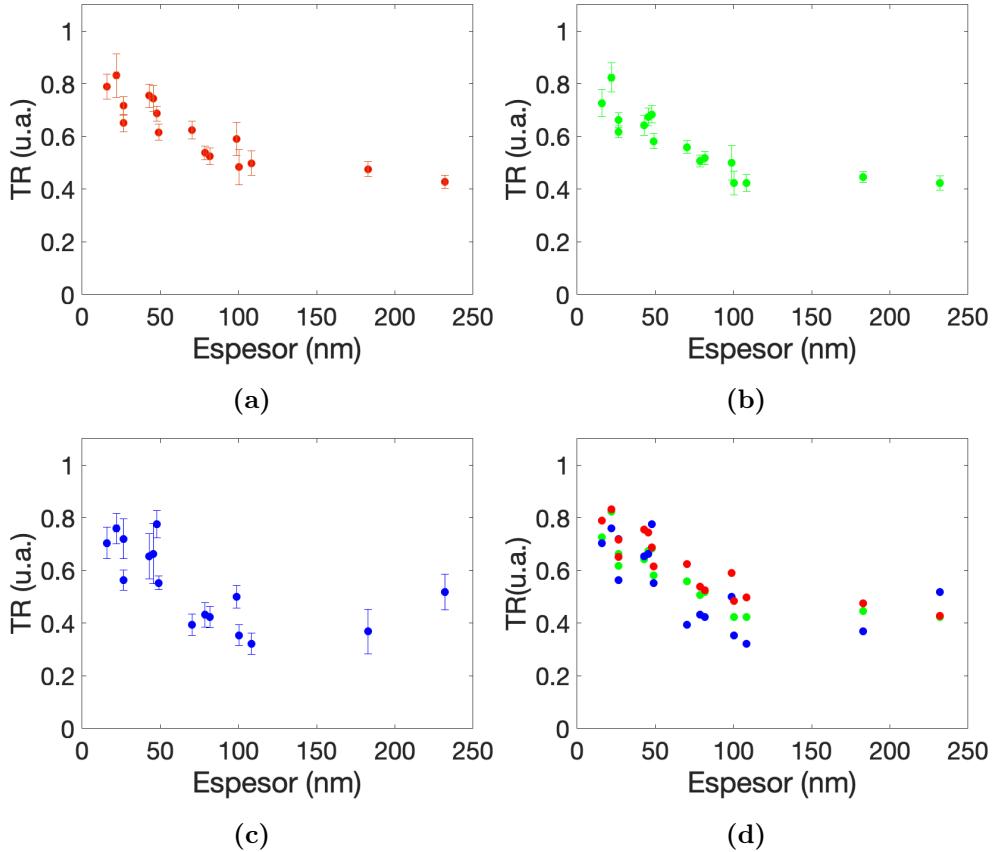


Figura 16: (a)-(c) Representación de datos de Espesor (nm) frente a Transmitancia relativa para el RGB , con sus barras de error. (d) Representación de todos los datos RGB en conjunto, (se eliminan barras de error para favorecer el visionado).

4.2. Análisis de resultados

4.2.1. Simulación

Una vez obtenidos los datos a analizar, se procede a realizar simulaciones utilizando el programa desarrollado anteriormente en el grupo de investigación de acogida en Matlab al cual se le han hecho cambios para adaptarlo al TFG, 34[Anexo C] para obtener una primera estimación del índice de refracción. En estas simulaciones, se analiza cómo varía la transmitancia relativa de un material con el espesor de la muestra para diferentes combinaciones de índices de refracción ($n+ik$), y se comparan los resultados simulados

con los datos experimentales. Se utiliza una función llamada '*thinfilmgeneral*', a la cual se le introduce un array de espesores, índices de refracción, índices de extinción y una longitud de onda, y calcula la transmitancia y reflectancia para los parámetros dados con el método expuesto en 2.2.1. Este programa también puede utilizarse para realizar una simulación del contraste para muestras depositadas en SiO_2/Si . Fig. 25a.

Dado que se tienen dos incógnitas, n y k , se procede a realizar un análisis iterativo de los parámetros, en el cual se fija uno de los dos parámetros y se varía el otro, observando cómo afecta este cambio a la simulación de la transmitancia. Este proceso se repite para diferentes valores del parámetro fijo con el fin de encontrar la combinación que mejor simule los datos experimentales para cada uno de los canales RGB.

Se lleva a cabo el siguiente estudio para cada canal, simulando la transmisión relativa en función del grosor con n fijo y k variable para una longitud de onda fija. En el caso del **canal verde** $\lambda = 530$ nm se pueden observar las siguientes curvas simuladas en la Fig. 17:

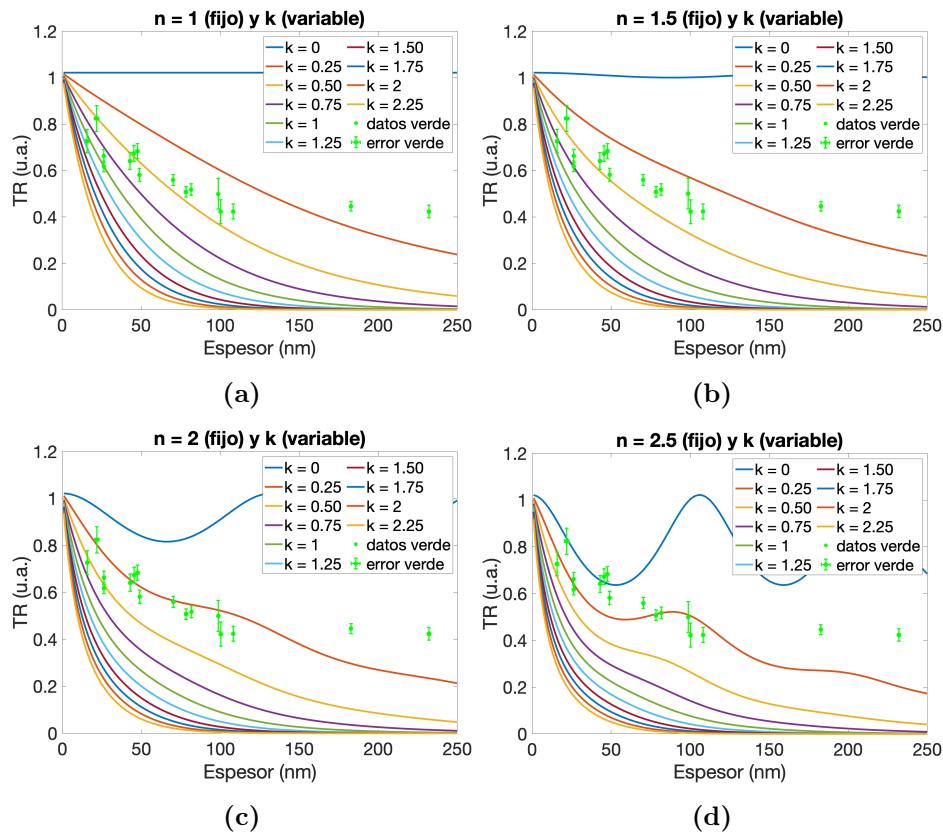


Figura 17: (a)-(d) Simulación de Transmitancia Relativa para un n fijo y k variable, para $\lambda = 530$ nm

En donde se puede observar como la curva que más se aproxima a nuestros datos experimentales para el canal verde, es la de $n = 2 + 0,25i$. A continuación, se fija $k = 0,25$ y se varía n en torno al 2. En la Fig. 18, se realiza una simulación para el caso mencionado anteriormente, en la que se puede estimar que las curvas que mejor se ajustan son las de $n = 2 + 0,25i$, $n = 2,15 + 0,25i$ y $n = 2,30 + 0,25i$.

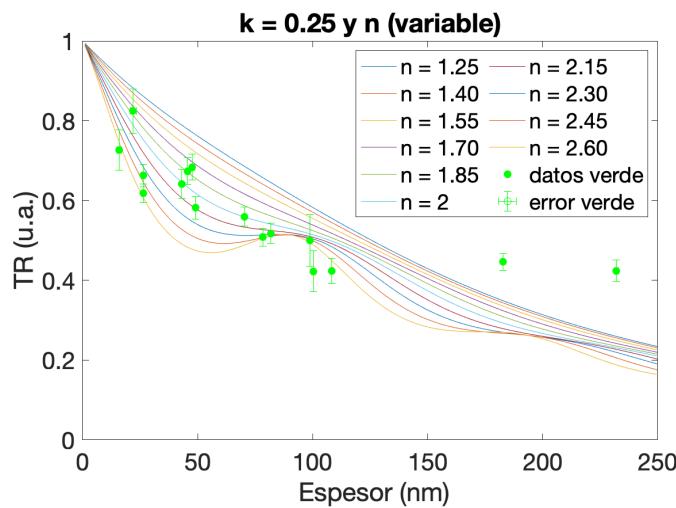


Figura 18: Simulación para $k = 0,25$ y distintos n en torno al 2, para $\lambda = 530$ nm

Este análisis se repite para los canales rojo y azul. Cabe mencionar que el análisis se realiza con mayor profundidad para valores más altos de n ; se puede consultar el anexo correspondiente. 34 [Anexo C].

En el caso del **canal rojo** $\lambda = 655$ nm los resultados se encuentran representados en la Fig. 19, en el que de nuevo, se observa que la curva que mejor se ajusta ronda $n = 2 + 0,25i$:

A continuación, en la Figura 20 se fija $k = 0,25$ y variaremos n en torno al 2.

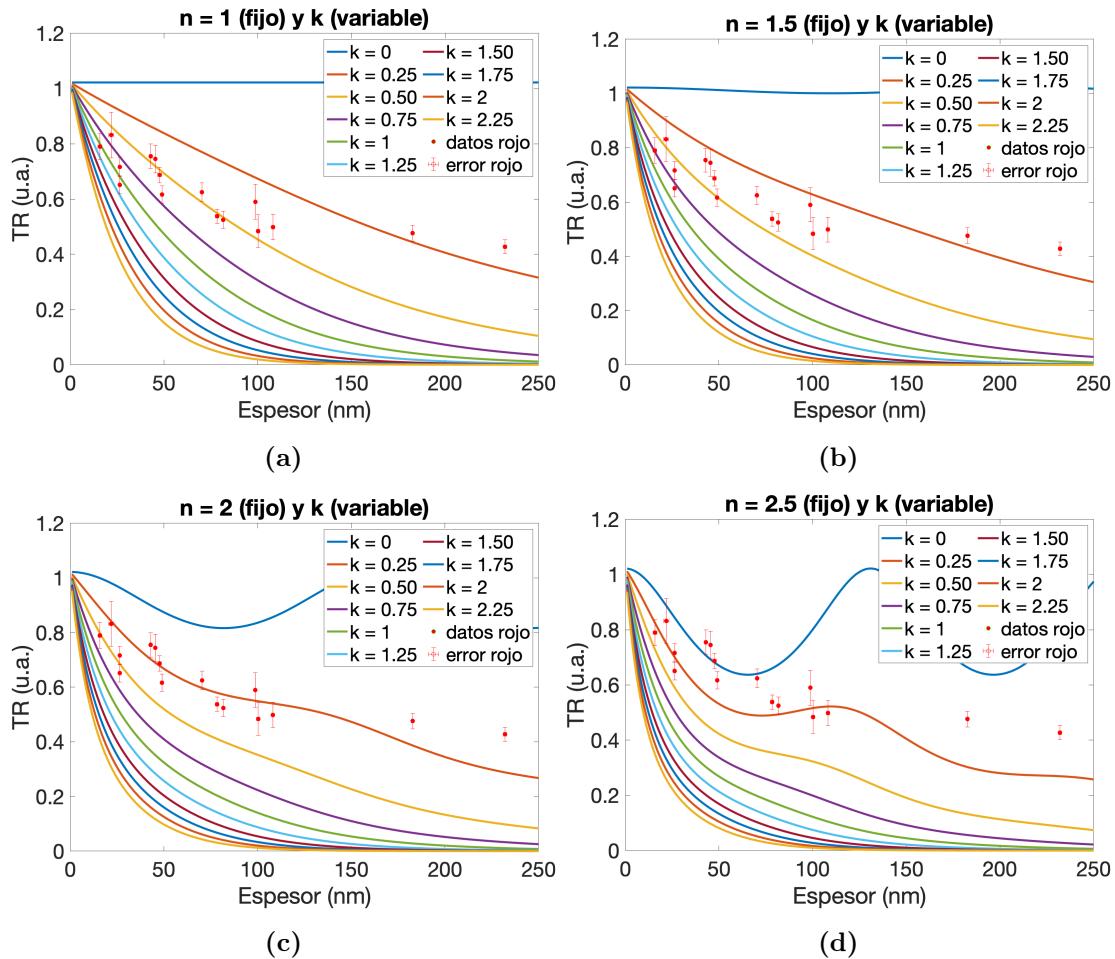


Figura 19: (a)-(d) Simulación de Transmitancia Relativa para un n fijo y k variable, para $\lambda = 655 \text{ nm}$

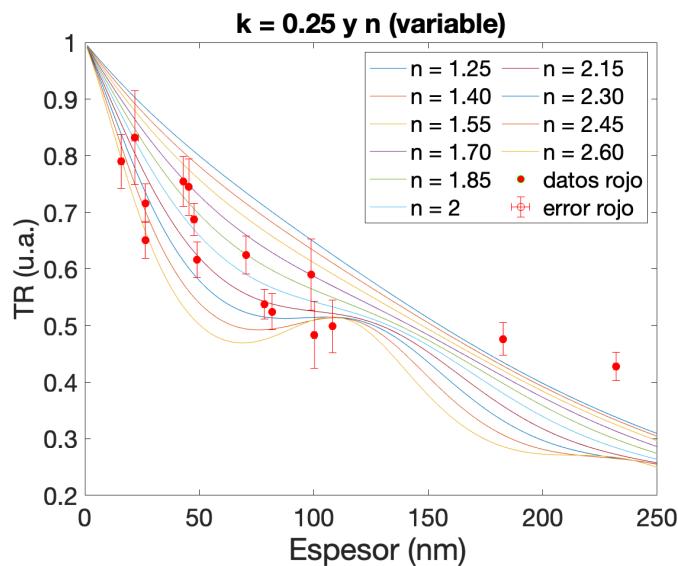


Figura 20: Simulación para $k = 0.25$ y distintos n en torno al 2, para $\lambda = 655 \text{ nm}$

Por último, en relación al **canal azul** con una longitud de onda de $\lambda = 400$ nm, se observa en la Fig. 21 cómo la curva que mejor se aproxima ronda $n = 2 + 0,25i$:

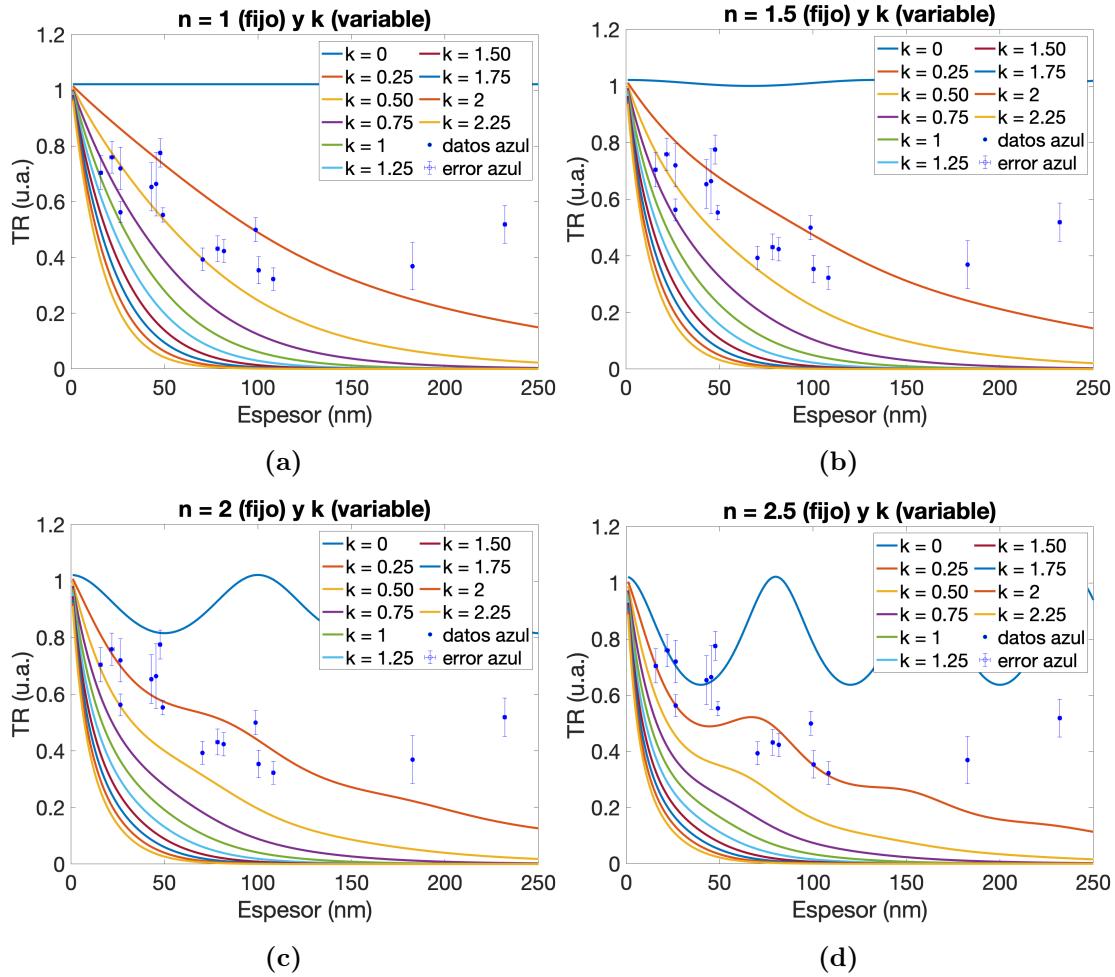


Figura 21: (a)-(d) Simulación de Transmitancia Relativa para un n fijo y k variable, para $\lambda = 400$ nm

Nuevamente en la Figura 22, se fija la $k = 0,25$ y se varía n en torno al 2.

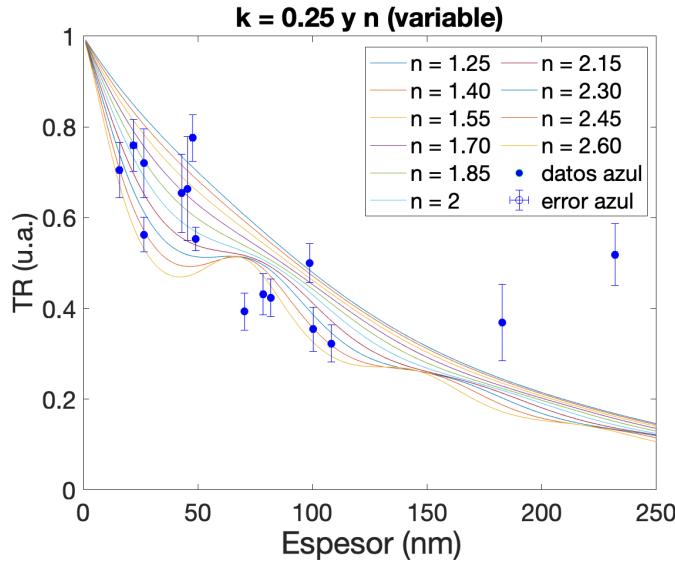


Figura 22: Simulación para $k = 0,25$ y distintos n en torno al 2, para $\lambda = 400 \text{ nm}$

En este primer enfoque, no se pretende ser excesivamente riguroso, ya que existen varias curvas que podrían ajustarse a los datos experimentales para cada canal. Parece que para los tres canales, el índice de refracción es aproximadamente $n \approx 2,15 + 0,25i$. Por lo tanto, en este apartado se busca obtener una estimación preliminar del índice de refracción del CrSBr, mientras que a continuación, se procederá a determinar cuál curva se adapta mejor mediante un ajuste de datos.

4.2.2. Ajuste de los datos

Para realizar el ajuste se emplea una variante del software utilizado en la Ref. [32], cuyos detalles se encuentran descritos en el anexo 34 [Anexo D]. En este programa se llevan a cabo varios ajustes de los datos experimentales obtenidos para cada canal RGB. A cada ajuste se le asigna un valor inicial de n , el cual corresponde a la estimación obtenida en la sección previa. En la que, para realizar la primera estimación del índice de refracción no se tiene en cuenta la eficiencia cuántica del sensor, sino que se fija un λ en concreto. En este ajuste, se consideran los datos relativos a la eficiencia cuántica del sensor, ya que como se puede ver en la sección 2.2.2, el sensor presenta un ancho de banda y, por tanto, para cada valor de lambda una eficiencia cuántica distinta, a continuación se explica como se implementa en el código y en la siguiente sección 4.2.3 como afecta a las medidas. En el programa, se utiliza una función '*fitqefeps3*' la cual considera la

eficiencia cuántica del sensor y calcula la transmitancia relativa de una terraza del *flake* para un conjunto de espesores. Para cada espesor, la transmitancia se calcula y pondera para diferentes longitudes de onda en lambda, usando los pesos especificados en *weight*. Donde la transmitancia relativa final es el cociente de la transmitancia ponderada y la transmitancia ponderada del sustrato.

Por tanto, en este programa no solamente se realizan los ajustes, sino también las simulaciones para el valor ajustado de *n* teniendo en cuenta la eficiencia cuántica del sensor como se puede observar en la Figura 23.

Después de efectuar el ajuste, los datos obtenidos a través del terminal son los siguientes, los cuales presentan 2σ de error:

```

1 fr2 =
2     General model:
3     fr2(x) = fitqefeps3(x,a,n2(1),c,n2(2),n0,lamb,wei)
4     Coefficients (with 95\% confidence bounds):
5         a =      2.135 (1.822, 2.448)
6         c =      0.1961 (0.1272, 0.2649)
7
8 f2g =
9     General model:
10    f2g(x) = fitqefeps3(x,a,n2(1),c,n2(2),n0,lamb,wei)
11    Coefficients (with 95\% confidence bounds):
12        a =      2.187 (1.828, 2.546)
13        c =      0.223 (0.1506, 0.2954)
14
15 f2b =
16     General model:
17     f2b(x) = fitqefeps3(x,a,n2(1),c,n2(2),n0,lamb,wei)
18     Coefficients (with 95\% confidence bounds):
19         a =      2.051 (1.386, 2.716)
20         c =      0.2698 (0.1429, 0.3968)
```

En la tabla 1 se encuentran resumidos los resultados de secciones anteriores:

	Verde		Rojo		Azul	
	<i>n</i>	<i>ki</i>	<i>n</i>	<i>ki</i>	<i>n</i>	<i>ki</i>
Simulación	2.15	0.25	2.15	0.25	2	0.25
Ajuste	$2,14 \pm 0,31$	$0,20 \pm 0,07$	$2,19 \pm 0,36$	$0,22 \pm 0,07$	$2,05 \pm 0,67$	$0,27 \pm 0,13$

Tabla 1: Resultados de la simulación y ajuste para los canales RGB

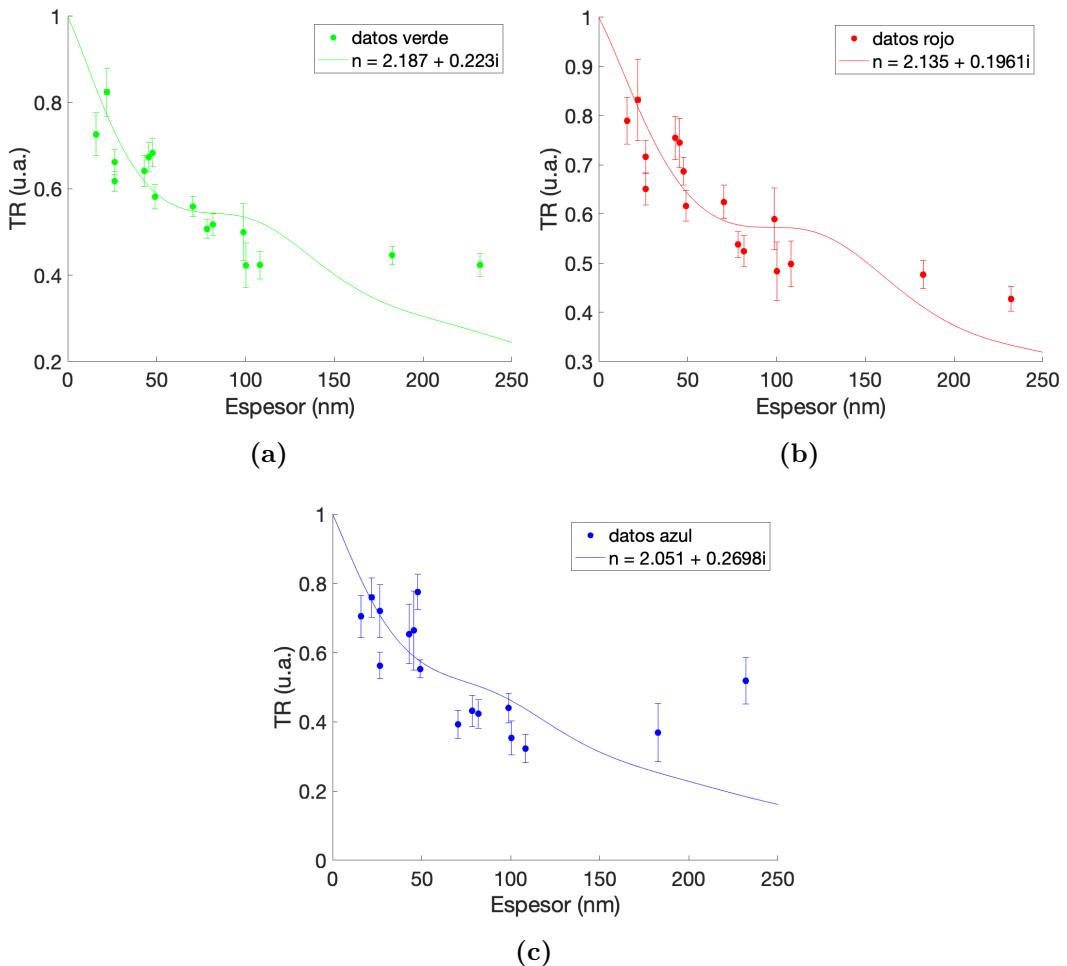


Figura 23: Transmitancia relativa en función del espesor para los canales rojo, verde y azul (RGB). Los puntos representan los datos experimentales, la línea continua el ajuste al modelo de multicapas considerando la QE del sensor.

Como se puede observar, no solo se obtienen valores distintos, sino que algunos canales presentan un error mayor que otros. Esto se debe a que la longitud de onda no es constante, aunque en este proyecto se ha supuesto que lo es. Además, se ha utilizado una lámpara halógena, cuyo espectro de emisión también influye en estos resultados dado que presenta una mayor emisión en el verde. Por consiguiente, el índice de refracción más confiable es el obtenido en el canal verde, el cual será utilizado en las etapas posteriores del proyecto.

4.2.3. Comparación

En esta sección se procede a realizar una comparación de los resultados obtenidos en los apartados anteriores. Se lleva a cabo una evaluación comparativa entre las gráficas obtenidas experimentalmente mediante un espectrómetro de Thorlabs y aquellas generadas a partir de la simulación mencionada en el anexo 34 [Anexo C]. La primera comparación se efectúa entre las simulaciones con y sin QE Fig.24, con el propósito de evaluar la importancia de considerar la eficiencia cuántica del sensor en estas simulaciones, para ello se compara en la misma gráfica las curvas obtenidas de tener o no en cuenta la eficiencia cuántica del sensor, además de los errores que se encuentran en la Tabla 1.

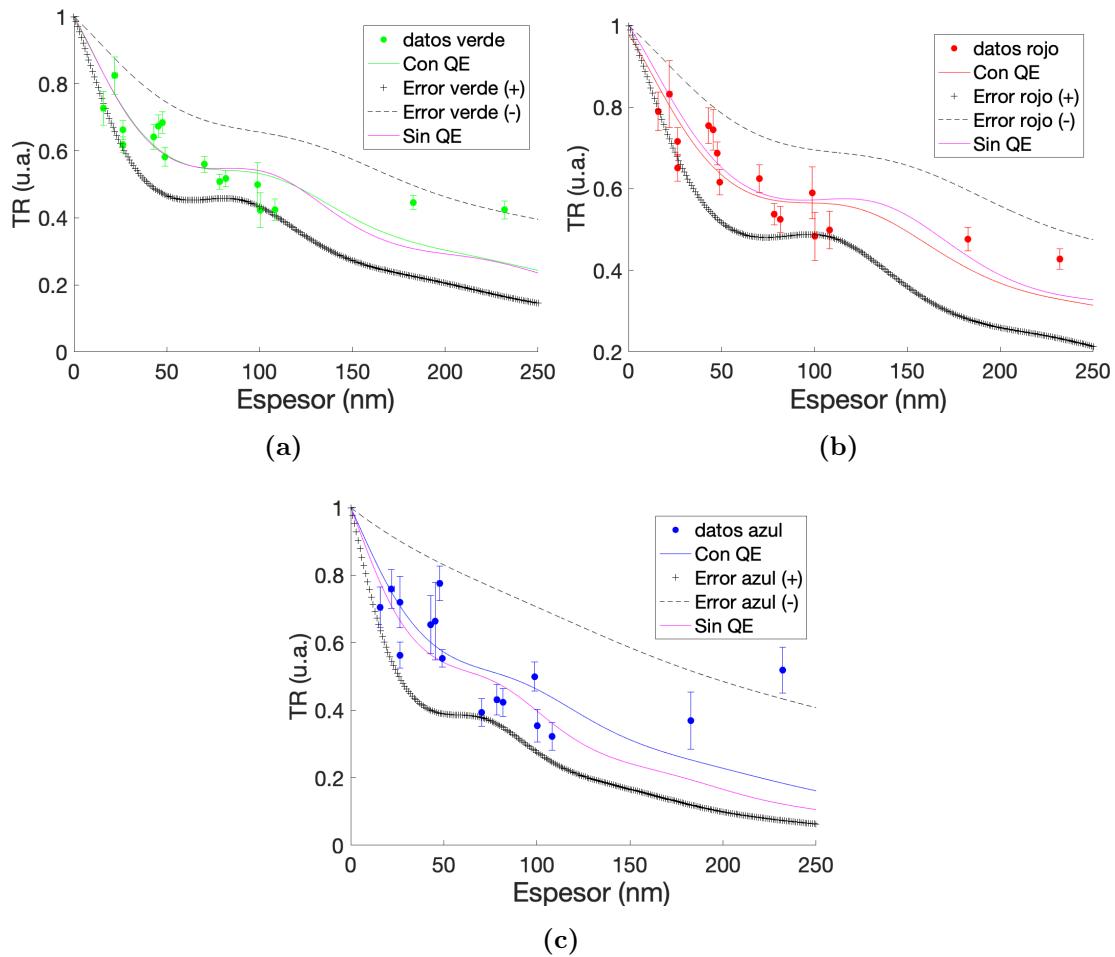


Figura 24: Comparación curvas transmitancia relativa simuladas con QE y sin QE. Los errores son los del ajuste expuesto en 4.2.2

En la Fig.24a se observa que la inclusión de la QE no varía significativamente el resultado, mientras que en 24b y 24c sí tiene un impacto considerable. Esto es debido

a que el espectro de emisión de la lámpara halógena y la respuesta del sensor están optimizados para el verde. En este, la combinación de alta emisión de la lámpara y alta eficiencia del sensor resulta en un rendimiento robusto que no se ve muy afectado por la QE. En contraste, en el azul y rojo, las emisiones más bajas de la lámpara y una posible menor eficiencia del sensor hacen que la QE tenga un impacto mucho mayor en la sensibilidad y el rendimiento del sistema. Por lo que, tener en cuenta la eficiencia cuántica de un sensor es fundamental para optimizar su rendimiento en términos de sensibilidad, precisión y calidad de los datos obtenidos.

En esta segunda comparativa 25, se grafican los datos obtenidos utilizando el espectrómetro para ciertas terrazas del *flake* cuyo espesor se determina en 12 y se comparan con las gráficas obtenidas de la simulación con el programa del anexo 34, en cuya segunda parte se simula la transmitancia relativa en SiO_2/Si en función de la longitud de onda y la energía. En dicho programa, se definen los grosores de las mismas terrazas a partir de los datos obtenidos experimentalmente de la espectroscopia, además del coeficiente de refracción y extinción obtenidos de las simulaciones 1. Se tiene en cuenta que se trata de un sistema multicapa, cuya disposición de las capas incluye aire semiinfinito, una capa del material, una capa de 300 nm de SiO_2 ($n = 1,46 + 0i$) y Si semiinfinito ($n = 4,123 + 0,048i$).

En la figura 25a presenta medidas de contraste óptico realizadas en *flakes* de distintos espesores, las cuales pueden compararse con los resultados de las simulaciones 25b. En estas se puede observar que tanto los máximos como los primeros mínimos se encuentran en las mismas posiciones del eje x o ligeramente desplazados, y los valores de contraste de estos no concuerdan. Esto puede deberse a los factores que se comentarán en el siguiente apartado 5. Además, en 25a aparecen claramente unos segundos mínimos que no se pueden apreciar en 25b. En las figuras 25c y 25d se grafican los contrastes de los espesores 26 nm y 48 nm, respectivamente, con el valor y los errores obtenidos del ajuste del verde. Aquí, se puede observar nuevamente que los mínimos y máximos concuerdan (y se adaptan mejor al error positivo), mientras que los valores del contraste no.

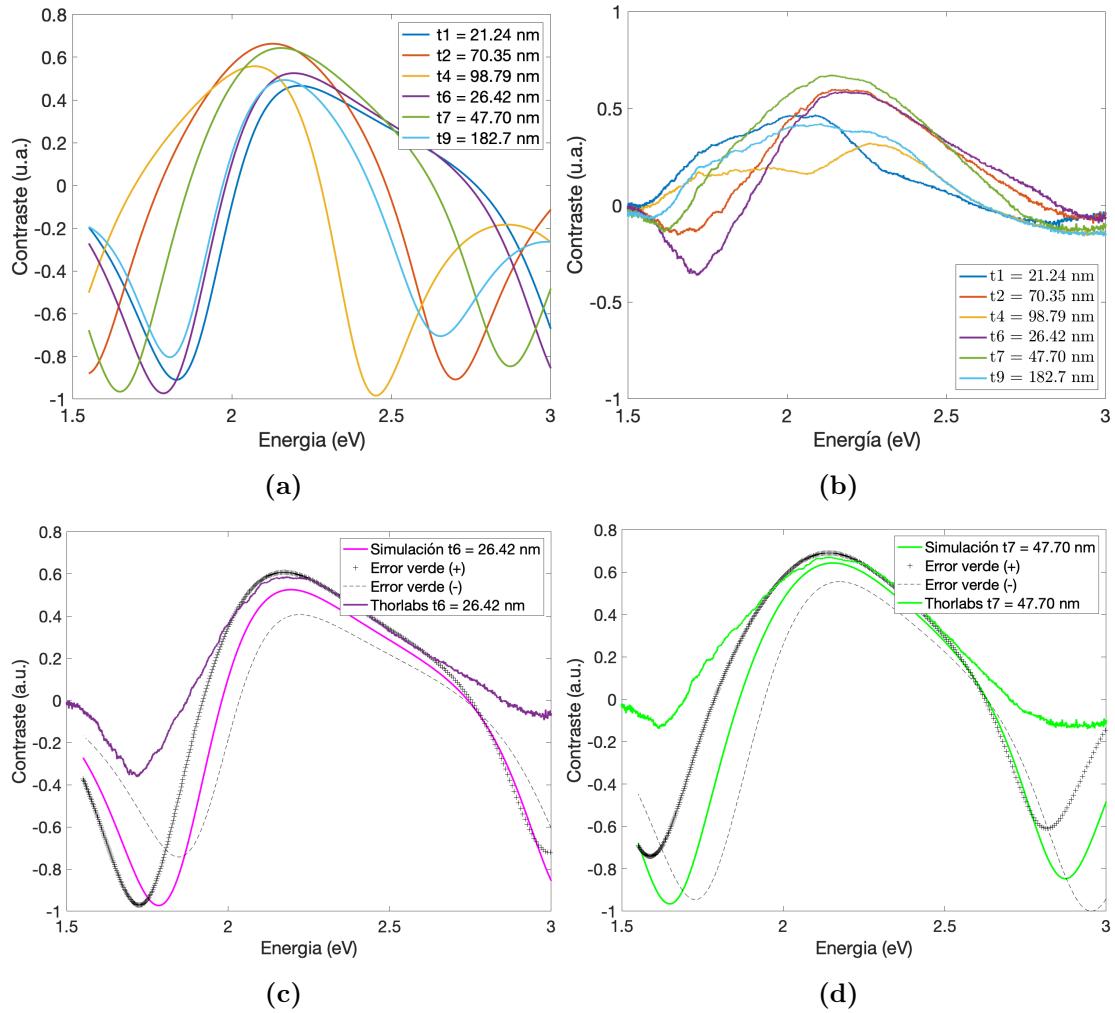


Figura 25: (a) Gráfico obtenido de la simulación del contraste en SiO_2/Si para los resultados obtenidos del índice de refracción del ajuste del canal verde. (b) Gráfico obtenido de los datos experimentales de Thorlabs del canal verde. (c)-(d) Comparativa de contrastes de la simulación (con sus errores) con datos de Thorlabs para espesor 26 nm y 48 nm, respectivamente, del canal verde. Los errores son los del ajuste de la Tabla 1

5. Conclusión

En este estudio, se han empleado diversas técnicas avanzadas para la caracterización y manipulación de materiales bidimensionales 3. Se han utilizado técnicas de microscopía óptica (AFM) para determinar el espesor, y espectroscopía para determinar la transmittancia relativa de las muestras analizadas 4.1. Además, se han llevado a cabo diversas simulaciones y ajustes con el fin de obtener una estimación del posible índice de refracción

del CrSBr, del cual en la bibliografía no se ha encontrado constancia, siendo:

$$n \approx 2,14 + 0,20i$$

2

La obtención de datos experimentales se ha realizado mediante un análisis de los mapas topográficos obtenidos en el AFM y de las variaciones en la transmitancia relativa en diferentes secciones de la imagen separada en los canales RGB. Una posible fuente de error puede estar relacionada con el uso de una fuente de luz halógena, este tipo de fuente presenta un cierto espectro de emisión de longitudes de onda, lo que puede dificultar las mediciones de transmitancia debido a la variación en la respuesta del material a diferentes longitudes de onda. Sería ideal emplear una fuente de luz monocromática o una fuente de luz con un rango espectral mayor para obtener resultados más precisos. Además, se puede explorar la posibilidad de mejorar la obtención de las transmitancias, ya que se han observado limitaciones en el método, que se comentan más adelante.

Para estimar el índice de refracción del CrSBr, se han realizado diversas simulaciones y ajustes en los programas ya comentados en Matlab, los cuales nos han permitido simular las transmisiones relativas para diferentes combinaciones de índices de refracción y extinción y comparar los resultados, que, a través de un proceso iterativo, se ajustaron los valores de n y k para cada canal RGB, encontrando las combinaciones que mejor se ajustaban a los datos experimentales. Posteriormente, se ha realizado un ajuste más detallado que consideraba la eficiencia cuántica (QE) del sensor, este ajuste es crucial ya que la QE varía con la longitud de onda, afectando significativamente la precisión de los resultados obtenidos. Lo cual se ha podido demostrar en la comparación de las simulaciones en 24, en la que la inclusión del QE ha permitido obtener una estimación más precisa del índice de refracción. Se ha observado que, especialmente para los canales rojo y azul, la consideración del QE ha resultado en diferencias significativas en los resultados. Esto destaca la importancia de incorporar la QE en estudios ópticos similares para mejorar la exactitud de las estimaciones. Es importante comentar que una de las posibles mejoras a implementar sería la adquisición y análisis de una mayor cantidad de datos entre los 100 y 150 nm de espesor para así, obtener una curva más precisa que se ajuste a los datos.

En cuanto a las medidas del contraste óptico realizadas para distintos espesores en espectroscopía óptica, se observa que no concuerdan completamente con las simulaciones realizadas con la estimación del índice de refracción. Aunque la posición de los primeros máximos y mínimos coincide, se observa la aparición de segundos mínimos y valores de contraste que difieren. Estas discrepancias pueden deberse a la consideración de que el

índice de refracción es constante, mientras que en realidad puede variar según la longitud de onda. Por lo tanto, obtener un único valor de índice de refracción puede proporcionar una estimación inicial, pero no tan precisa como sería deseable.

Realizando un análisis se pueden ver ciertas limitaciones del método y fuentes de error, tales como: las condiciones ambientales durante la medición, la aparición de difracción en las imágenes analizadas debido a motas de polvo, o de aberraciones en los bordes de estas mismas, la variabilidad en la transmitancia relativa puede ser influenciada por imperfecciones en la preparación de las muestras (rugosidades) o la posible aparición de defectos en la propia estructura del material. Para mejorar la precisión de los resultados, sería útil utilizar fuentes de luz cuyos espectros presenten rangos de emisión mayores y realizar múltiples mediciones para promediar los datos y reducir la incertidumbre, además de aumentar la cantidad de datos a analizar. También se podría considerar el uso de técnicas complementarias de caracterización óptica y estructural para validar y refinar los resultados obtenidos. Tener en cuenta esto para la reproducción de este proyecto, como para siguientes estudios que quieran utilizar este método podría conducir a estimaciones más precisas y confiables del índice de refracción.

Como ya se ha visto el CrSBr presenta propiedades semiconductoras y magnéticas notables que se conservan incluso cuando se reduce a capas individuales o pocas capas. Su estabilidad ambiental y su capacidad para formar heteroestructuras con otros materiales 2D lo convierten en un material prometedor para aplicaciones en dispositivos electrónicos y de espíntrónica avanzados.

Referencias

- [1] Liu, Y., Weiss, N., Duan, X. et al. Van der Waals heterostructures and devices. *Nat Rev Mater* 1, 16042 (2016).
- [2] Enlai Gao and Shao-Zhen Lin and Zhao Qin and Markus J. Buehler and Xi-Qiao Feng and Zhiping Xu. Mechanical exfoliation of two-dimensional materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* (2018)
- [3] Fang Liu. Mechanical exfoliation of large area 2D materials from vdW crystals. *Progress in Surface Science.* (2021).
- [4] Burch, K.S.; Mandrus, D.; Park, JG. Magnetism in two-dimensional van der Waals materials. *Nature* 563, 47–52 (2018).
- [5] Jariwala, D.; Srivastava, A.; Ajayan, P. M. . Graphene synthesis and band gap opening. *Journal of nanoscience and nanotechnology.*(2011)
- [6] Lee, K.; Dismukes, A. H.; Telford, E. J.; Wiscons, R. A.; Wang, J.; Xu, X.; Nuckolls, C.; Dean, C. R.; Roy, X.; Zhu, X. Magnetic Order and Symmetry in the 2D Semiconductor CrSBr. *Nano Lett.* (2021)
- [7] Wilson, N.P.; Lee, K.; Cenker, J. et al. Interlayer electronic coupling on demand in a 2D magnetic semiconductor. *Nat. Mater.* 20, 1657–1662 (2021).
- [8] Telford; Evan J and Dismukes; Avalon H and Lee; Kihong and Cheng; Minghao and Wieteska; Andrew and Bartholomew; Amymarie K and Chen; Yu-Sheng and Xu; Xiaodong and Pasupathy; Abhay N and Zhu; Xiaoyang and others. Layered antiferromagnetism induces large negative magnetoresistance in the van der Waals semiconductor CrSBr. *Advanced Materials.* (2020).
- [9] Bae, Y. J.; Wang, J.; Scheie, A.; Xu, J.; Chica, D. G.; Diederich, G. M.; Cenker, J.; Ziebel, M. E.; Bai, Y.; Ren, H.; Dean, C. R.; Delor, M.; Xu, X.; Roy, X.; Kent, A. D.; Zhu, X. Exciton-coupled coherent magnons in a 2D semiconductor. *Nature*, 609(7926), 282-286. (2022).
- [10] Telford, E. J.; Dismukes, A. H.; Lee, K.; Cheng, M.; Wieteska, A.; Bartholomew, A. K.; Chen, Y. S.; Xu, X.; Pasupathy, A. N.; Zhu, X.; Dean, C. R.; Roy, X. Layered antiferromagnetism induces large negative magnetoresistance in the van der Waals semiconductor CrSBr. *Advanced Materials* (2020).

- [11] Bo, X.; Li, F.; Xu, X.; Wan, X.; Pu, Y. Calculated magnetic exchange interactions in the van der Waals layered magnet CrSBr. *New Journal of Physics*. (2023).
- [12] Ziebel; Michael E. and Feuer; Margalit L. and Cox; Jordan and Zhu; Xiaoyang and Dean; Cory R. and Roy; Xavier. CrSBr: An Air-Stable, Two-Dimensional Magnetic Semiconductor. *Nano Letters*, 24(15), 4319-4329.(2024).
- [13] The Materials Project. Materials Data on CrSBr by Materials Project. United States.
- [14] Frisenda, R.; Navarro-Moratalla, E.; Gant, P.; De Lara, D. P.; Jarillo-Herrero, P.; Gorbatchev, R. V.; Castellanos-Gomez, A. Recent progress in the assembly of nanodevices and van der Waals heterostructures by deterministic placement of 2D materials. *Chemical Society Reviews*, 47(1), 53-68. (2018).
- [15] Wu, F.; Gutiérrez-Lezama, I.; López-Paz, S. A.; Gibertini, M.; Watanabe, K.; Tаниuchi, T.; von Rohr, F. O.; Ubrig, N.; Morpurgo, A. F. Quasi-1D electronic transport in a 2D magnetic semiconductor. *Advanced Materials*, 34(16). (2022).
- [16] Wang, Q. H.; Bedoya-Pinto, A.; Blei, M.; Dismukes, A. H.; Hamo, A.; Jenkins, S.; Koperski, M.; Liu, Y.; Sun, Q. C.; Telford, E. J.; Kim, H. H.; Augustin, M.; Vool, U.; Yin, J. X.; Li, L. H.; Falin, A.; Dean, C. R.; Casanova, F.; Evans, R. F. L.; Chshiev, M.; Mishchenko, A.; Petrovic, C.; He, R.; Zhao, L.; Tsen, A. W.; Gerardot, B. D.; Brotons-Gisbert, M.; Guguchia, Z.; Roy, X.; Tongay, S.; Wang, Z.; Hasan, M. Z.; Wrachtrup, J.; Yacoby, A.; Fert, A.; Parkin, S.; Novoselov, K. S.; Dai, P.; Balicas, L.; Santos, E. J. G. The magnetic genome of two-dimensional van der Waals materials. *ACS nano*, 16(5), 6960-7079. (2022).
- [17] Bianchi, M.; Hsieh, K.; Porat, E. J.; Dirnberger, F.; Klein, J.; Mosina, K.; Sofer, Z.; Rudenko, A. N.; Katsnelson, M. I.; Chen, Y. P.; Rösner, M.; Hofmann, P. Charge transfer induced Lifshitz transition and magnetic symmetry breaking in ultrathin CrSBr crystals. *Physical Review B*, 108(19), 195410. (2023).
- [18] Klein, J.; Pingault, B.; Florian, M.; Heissenbüttel, M. C.; Steinhoff, A.; Song, Z.; Torres, K.; Dirnberger, F.; Curtis, J. B.; Weile, M.; Penn, A.; Deilmann, T.; Dana, R.; Bushati, R.; Quan, J.; Luxa, J.; Sofer, Z.; Alù, A.; Menon, V. M.; Wurstbauer, U.; Rohlfing, M.; Narang, P.; Lončar, M.; Ross, F. M. The bulk van der Waals layered magnet CrSBr is a quasi-1D material. *ACS nano*, 17(6), 5316-5328. (2023).

- [19] Telford, E. J.; Dismukes, A. H.; Lee, K.; Cheng, M.; Wieteska, A.; Bartholomew, A. K.; Chen, Y. S.; Xu, X.; Pasupathy, A. N.; Zhu, X.; Dean, C. R.; Roy, X. Layered antiferromagnetism induces large negative magnetoresistance in the van der Waals semiconductor CrSBr. *Advanced Materials*, 32(37), 2003240. (2020).
- [20] Rizzo, D. J.; McLeod, A. S.; Carnahan, C.; Telford, E. J.; Dismukes, A. H.; Wiscons, R. A.; Dong, Y.; Nuckolls, C.; Dean, C. R.; Pasupathy, A. N.; Roy, X.; Xiao, D.; Basov, D. N. Visualizing atomically layered magnetism in CrSBr. *Advanced Materials*, 34(27), 2201000. (2022).
- [21] Long, F.; Mosina, K.; Hübner, R.; Sofer, Z.; Klein, J.; Prucnal, S.; Helm, M.; Dirnberger, F.; Zhou, S. Intrinsic. Intrinsic magnetic properties of the layered antiferromagnet CrSBr. *Applied Physics Letters*, 123(22). (2023).
- [22] López-Paz, S. A.; Guguchia, Z.; Pomjakushin, V. Y.; Witteveen, C.; Cervellino, A.; Luetkens, H.; Casati, N.; Morpurgo, A. F.; von Rohr, F. O. Dynamic magnetic crossover at the origin of the hidden-order in van der Waals antiferromagnet CrSBr. *Nature Communications*, 13(1), 4745. (2022).
- [23] Boix-Constant, C.; Mañas-Valero, S.; Ruiz, A. M.; Rybakov, A.; Konieczny, K. A.; Pillet, S.; Baldoví, J. J.; Coronado, E. Probing the spin dimensionality in Single-layer CrSBr van der Waals heterostructures by magneto-transport measurements. *Advanced Materials*, 34(41), 2204940. (2022).
- [24] Liu, W.; Guo, X.; Schwartz, J.; Xie, H.; Dhale, N. U.; Sung, S. H.; Kondusamy, A. L. N.; Wang, X.; Zhao, H.; Berman, D.; Hovden, R.; Zhao, L.; Lv, B. A three-stage magnetic phase transition revealed in ultrahigh-quality van der Waals bulk magnet CrSBr. *ACS nano*, 16(10), 15917-15926. (2022).
- [25] Zur, Y.; Noah, A.; Boix-Constant, C.; Mañas-Valero, S.; Fridman, N.; Rama-Eiroa, R.; Huber, M. E.; Santos, E. J. G.; Coronado, E.; Anahory, Y. Magnetic imaging and domain nucleation in CrSBr down to the 2D limit. *Advanced Materials*, 35(47), 2307195. (2023).
- [26] Tschudin, M. A.; Broadway, D. A.; Reiser, P.; Schrader, C.; Telford, E. J.; Gross, B.; Cox, J.; Dubois, A. E. E.; Chica, D. G.; Rama-Eiroa, R.; Santos, E. J. G.; Poggio, M.; Ziebel, M. E.; Dean, C. R.; Roy, X.; Maletinsky, P. Nanoscale magnetism and magnetic phase transitions in atomically thin CrSBr. *arXiv preprint*. (2023).

- [27] Riccardo Frisenda; Efrén Navarro-Moratalla; Patricia Gant, David Perez de Lara; Pablo Jarillo-Herrero; Roman Gorbachev; and Andres Castellanos-Gomez. Recent progress in the assembly of nanodevices and van der waals heterostructures by deterministic placement of 2d materials. *Chemical Society Reviews*, (2017).
- [28] Charalambos C. Katsidis and Dimitrios I. Siapkas. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference. *Applied optics*, 41(19), 3978-3987. (2002).
- [29] Victor Manuel Freire Soler. Fabrication and Characterization of Macroscopic Graphene Layers on Metallic Substrates. PhD thesis, 01 (2014).
- [30] A. Castellanos-Gomez; M. Buscema; R. Molenaar; V. Singh, L. Janssen; H. S. J. van der Zant and G. A. Steele, 2D Mater., (2014).
- [31] Zar, Lawrence. Cavitation in ultrasonic cleaning and cell disruption. *Controlled Environments*. (2009)
- [32] Ramos, M.; Carrascoso, F.; Frisenda; R. et al. Ultra-broad spectral photo-response in FePS3 air-stable devices. *npj 2D Mater Appl* 5, 19. (2021).
- [33] Byrnes SJ. Multilayer optical calculations. ArXiv preprint .(2016)
- [34] Martínez de Velasco Sánchez Tembleque; L. Sistema de ajuste espectral mediante led de potencia para la medida de curva iv de células solares multiunión. No Publicado. (2019)

Anexo A: Gráficas complementarias

En este anexo se encuentran las gráficas de las simulaciones a mayores n para cada canal, las cuales se encuentran en la Fig. 26 para el canal verde, Fig. 27 para el canal rojo y Fig. 28 para el canal azul.

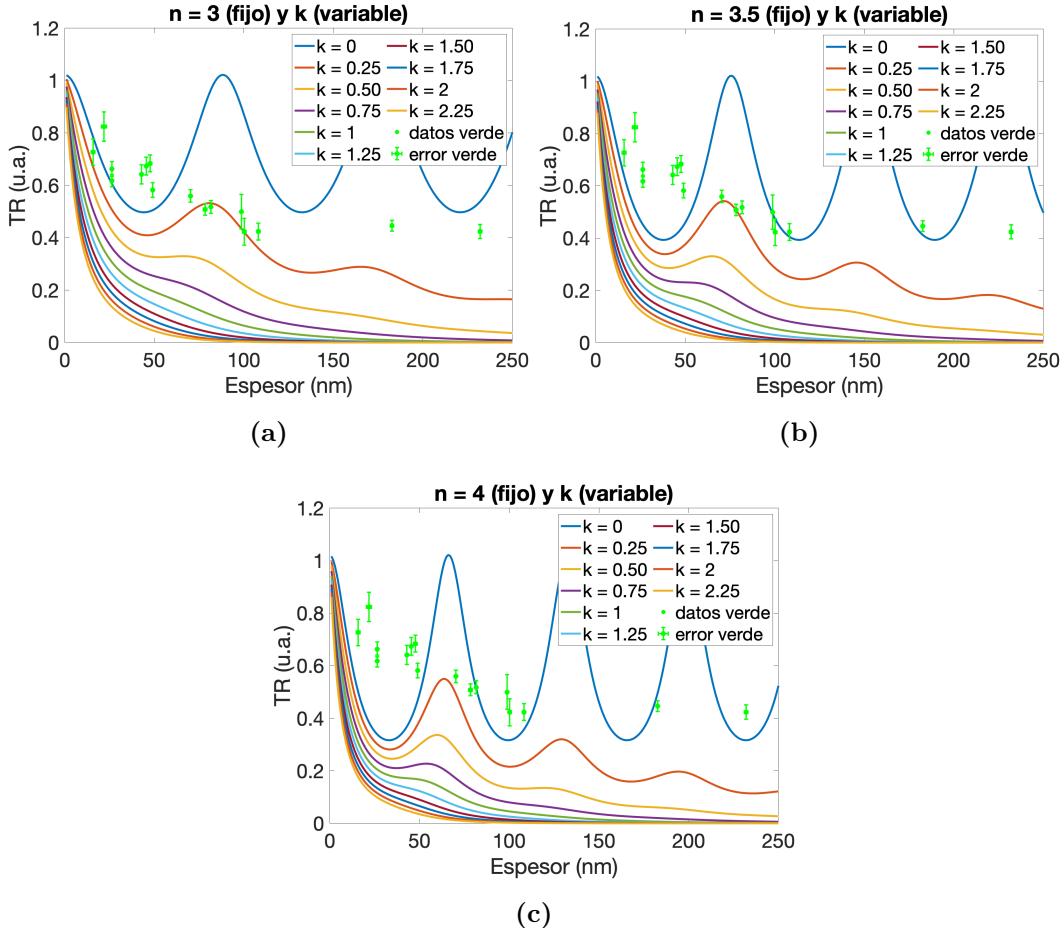


Figura 26: Simulación de TR a n mayores para k fijo y $\lambda = 530$ nm

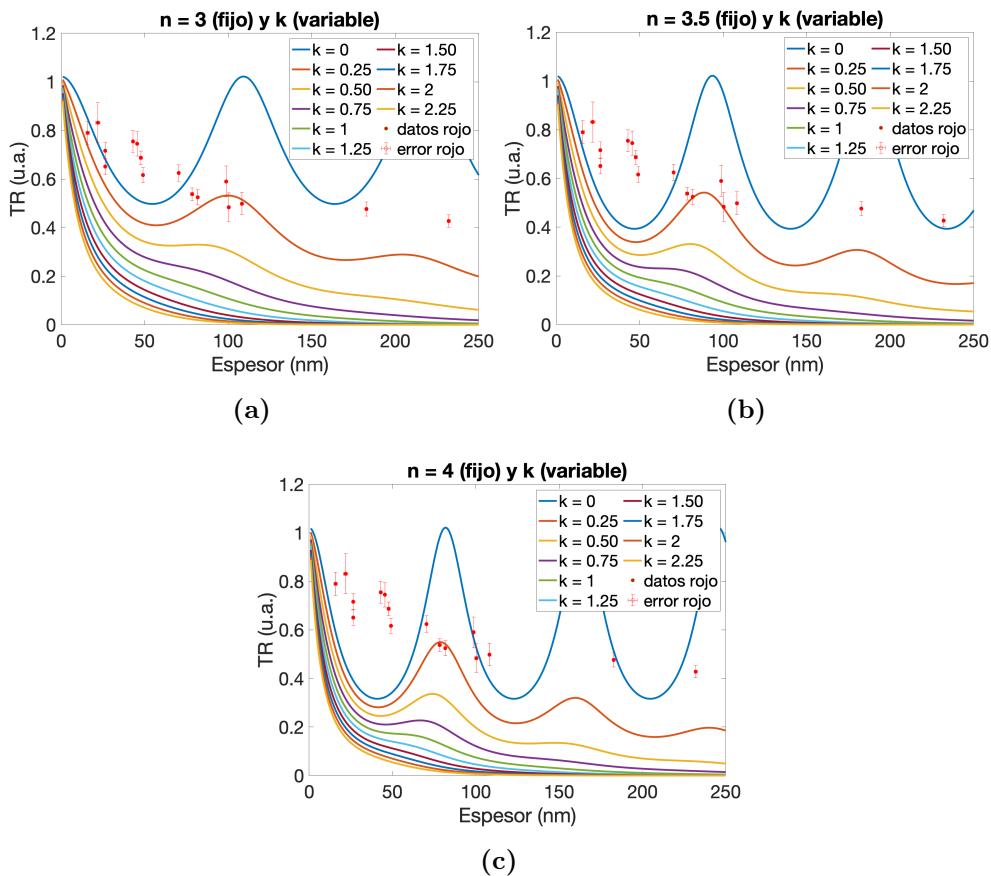


Figura 27: Simulación de TR a n mayores para k fijo y $\lambda = 655$ nm

Anexo B: Código análisis transmitancia

```

1 clear all
2
3 %%%%%%%% CARGAR Y PROCESAR LA IMAGEN %%%%%%
4
5 M=imread('Scripts analisis transmitancia/x50 T.png'); %imread es
   para leer imagen y nos devuelve un tensor
6 %M=imread('Scripts analisis transmitancia/x20 Muestra 2.jpg');
7 %M = imrotate(M1,330,"bilinear",'crop');
8 %M = imrotate(M1,327,"bilinear",'crop');
9
10 %Se divide el tensor en RGB
11 R=squeeze(M(:,:,1));    %squeeze devuelve un arreglo con los mismos
   elementos que el arreglo de entrada R, pero con las dimensiones
   de longitud 1 eliminadas
12 G=squeeze(M(:,:,2));

```

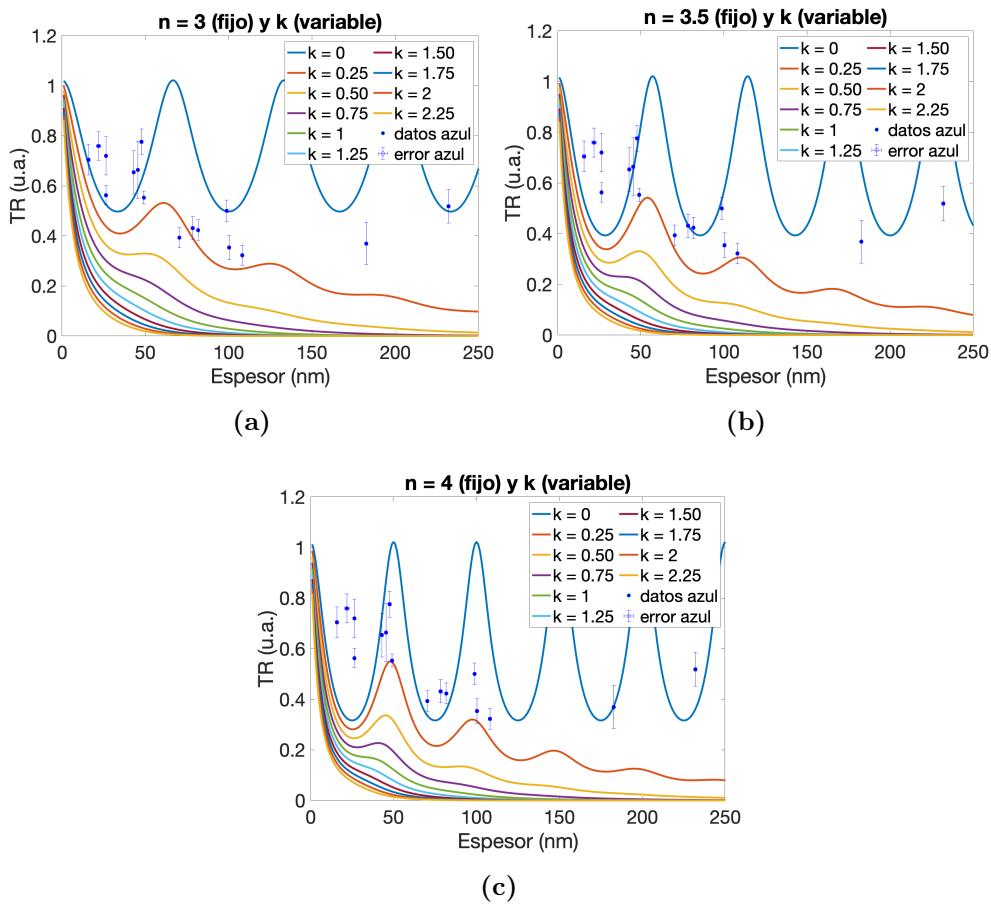


Figura 28: Simulación de TR a n mayores para k fijo y $\lambda = 400$ nm

```

13 B=squeeze(M(:,:,3));
14
15 %%%%%% DEFINIR DIMENSIONES Y COORDENADAS %%%%%%
16
17 [nx,ny]=size(R) %Creamos variables nx y ny para representar
18
19 X=1:1:nx; %esto se lee desde 1 de 1 en 1
20 Y=1:1:ny; %se encuentran en pixeles (1px = 264,5833 micrometros)
21 Y1=double(squeeze(Y));
22 Ym=Y1.*264.58;
23
24 %Se traza una linea vertical para analisis de grosores cada muestra
25 %y cada
26 %terraza a analizar necesita una j distinta
27 j=410;

```

```
28 %j1 = [2200,2000,3600,2000,3000,3000,2350,1550,2300]; J Muestra
29 %j2 = [410,250,130,365,485,425,350,400,175]; J Muestra
30
31 %Se define un cuadrado de coordenadas en cada muestra para hacer un
32 %promedio de los pixeles de sustrato
33
34 %Defino las coordenadas del cuadrado
35 coordsM1 = [3358, 3985; 36, 351]; %Coordenadas para M1
36 coordsM1rot = [700, 1000; 750, 1050]; %Coordenadas M1 rotado 30
37     grados
38 coordsM2_up = [600, 1120; 70, 200]; %Coordenadas M2 arriba
39 coordsM2rot = [450, 750; 115, 220]; %Coordenadas M2 rotado
40 coordsM2_down = [800, 1000; 10, 300]; %Coordenadas M2 abajo
41
42 x1 = coordsM1(1, 1);
43 x2 = coordsM1(1, 2); %variar en funcion de la muestra
44 y1 = coordsM1(2, 1);
45 y2 = coordsM1(2, 2);
46
47 % Se extrae la region del cuadrado para cada canal
48 square_R = R(x1:x2, y1:y2);
49 square_G = G(x1:x2, y1:y2);
50 square_B = B(x1:x2, y1:y2);
51
52 %Se declaran variables que contengan los datos en la linea que
53     recorre j
54 L_r=double(squeeze(R(j,:))); %usamos double para hacer que no sea
55     binario y tener valores de punto flotante
56 L_g=double(squeeze(G(j,:)));
57 L_b=double(squeeze(B(j,:)));
58
59 %Se grafica la traspuesta de la muestra deseada en RGB con filtro
60     gris
61 figure
62 imagesc(R')
63 colormap('gray')
64 hold on
65 figure
66 imagesc(G')
67 colormap('gray')
68 hold on
```

```
65 figure
66 imagesc(B')
67 colormap('gray')
68
69 %Se grafica la transmitancia en la vertical J
70 figure
71 plot(Y,L_r,'red')
72 hold on
73 plot(Y,L_g,'green')
74 hold on
75 plot(Y,L_b,'blue')
76 xlabel('Y pixel') % TO DO convertir pixeles a posicion en micras
77 ylabel('Intensidad Pixel (a.u.)')
78 set(gca,'FontSize',18)
79 %%%%%%%%%%%%%% CALCULAR TRANSMITANCIAS RELATIVAS Y ERRORES
80 %%%%%%%%%%%%%%
81 %Se promedian los pixeles recopilados del sustrato
82 T_sr = mean(square_R(:));
83 T_sg = mean(square_G(:));
84 T_sb = mean(square_B(:));
85
86 % Convertir los datos a tipo double para tener valores de punto
     flotante
87 square_R_double = double(square_R);
88 square_G_double = double(square_G);
89 square_B_double = double(square_B);
90
91 % Calcular la varianza de T_sr
92 var_T_sr = var(square_R_double(:));
93 var_T_sg = var(square_G_double(:));
94 var_T_sb = var(square_B_double(:));
95
96 % Calcular la desviacion estandar de T_sr
97 std_T_sr = std(square_R_double(:));
98 std_T_sg = std(square_G_double(:));
99 std_T_sb = std(square_B_double(:));
100
101 %CALCULAMOS LA TRANSMITANCIA RELATIVA (importante el punto)
102 T_r=double(L_r./T_sb);
103 T_g=double(L_g./T_sg);
104 T_b=double(L_b./T_sb);
105
```

```
106 %Y sus errores
107 err_T_r = T_r * (std_T_sr/T_sr)
108 err_T_g = T_g * (std_T_sg/T_sg)
109 err_T_b = T_b * (std_T_sb/T_sb)
110
111 %Se grafica la Transmitancia relativa (NORMALIZADA)
112 figure
113 plot(Y,T_r,'red','LineWidth',1)
114 hold on
115 plot(Y,T_g,'green','LineWidth',1)
116 hold on
117 plot(Y,T_b,'blue','LineWidth',1)
118 xlabel('Y pixel') % TO DO convertir pixeles a posicion en micras
119 ylabel('TR (u.a.)')
120 set(gca,'FontSize',18)
121
122 %Igual pero en micrometros
123 figure
124 plot(Ym,T_r,'red','LineWidth',1)
125 hold on
126 plot(Ym,T_g,'green','LineWidth',1)
127 hold on
128 plot(Ym,T_b,'blue','LineWidth',1)
129 xlabel('Y micrometros') % TO DO convertir pixeles a posicion en
    micras
130 ylabel('TR (u.a.)')
131 set(gca,'FontSize',20)
132
133 Transmitancias relativas para cada grosor MUESTRA 1
134 %Se calculan y grafican promedios de transmitancia relativa en
    regiones especificas
135 % Defino los limites del rango de pixeles
136
137 ini1 = [1050, 120, 500, 450, 950, 795, 795, 3300, 3450];
138 fin1 = [2300, 360, 700, 650, 1150, 1020, 1010, 3475, 3530];
139 %j1 = [2200,2000,3600,2000,3000,3000,2350,1550,2300];
140
141 %Extraer el rango de transmitancias relativas en la fila j(i) cada
    terraza
142 %necesita una j distinta (tener en cuenta al principio del programa
    )
143 rango_T_r = T_r(1, ini1(2):fin1(2));
144 rango_T_g = T_g(1, ini1(2):fin1(2));
```

```
145 rango_T_b = T_b(1, ini1(2):fin1(2));  
146  
147 %Calcular la media de las transmitancias relativas en el rango  
    especificado  
148 media_rango_T_r = mean(rango_T_r)  
149 media_rango_T_g = mean(rango_T_g)  
150 media_rango_T_b = mean(rango_T_b)  
151  
152 %Extraigo el rango de errores que me interesa  
153 rango_err_T_r = err_T_r(1, ini1(2):fin1(2));  
154 rango_err_T_g = err_T_g(1, ini1(2):fin1(2));  
155 rango_err_T_b = err_T_b(1, ini1(2):fin1(2));  
156  
157 % sumando tambien los cuadrados de los errores  
158 suma_cuadrados_r = sum((rango_T_r - media_rango_T_r).^2 +  
    rango_err_T_r.^2);  
159 suma_cuadrados_g = sum((rango_T_g - media_rango_T_g).^2 +  
    rango_err_T_g.^2);  
160 suma_cuadrados_b = sum((rango_T_b - media_rango_T_b).^2 +  
    rango_err_T_b.^2);  
161 % Divide esta suma por el numero de datos menos uno (grados de  
    libertad)  
162 desv_est_ajustada_r = sqrt(suma_cuadrados_r / (length(rango_T_r) -  
    1))  
163 desv_est_ajustada_g = sqrt(suma_cuadrados_g / (length(rango_T_g) -  
    1))  
164 desv_est_ajustada_b = sqrt(suma_cuadrados_b / (length(rango_T_b) -  
    1))  
165  
166  
167 Transmitancias relativas para cada grosor Fleke 2  
168  
169 %Quiero la media de las transmitancias relativas entre ciertos  
    pixeles  
170 % Defino los limites del rango de pixeles  
171  
172 ini2 = [360, 660, 600, 255, 280, 170, 345, 370, 550];  
173 fin2 = [390, 720, 640, 275, 320, 200, 370, 410, 560];  
174 %j2 = [410,250,130,365,485,425,350,400,175];  
175  
176 % Extraer el rango de transmitancias relativas en la fila j(i) cada  
    terraza
```

```

177 %necesita una j distinta (tener en cuenta al principio del programa
    )
178 rango_T_r = T_r(1, ini2(1):fin2(1));
179 rango_T_g = T_g(1, ini2(1):fin2(1));
180 rango_T_b = T_b(1, ini2(1):fin2(1));
181 % Calcular la media de las transmitancias relativas en el rango
    especificado
182 media_rango_T_r = mean(rango_T_r)
183 media_rango_T_g = mean(rango_T_g)
184 media_rango_T_b = mean(rango_T_b)

185
186 %Extraigo el rango de errores que me interesa
187 rango_err_T_r = err_T_r(1, ini2(1):fin2(1));
188 rango_err_T_g = err_T_g(1, ini2(1):fin2(1));
189 rango_err_T_b = err_T_b(1, ini2(1):fin2(1));

190
191 % sumando tambien los cuadrados de los errores
192 suma_cuadrados_r = sum((rango_T_r - media_rango_T_r).^2 +
    rango_err_T_r.^2);
193 suma_cuadrados_g = sum((rango_T_g - media_rango_T_g).^2 +
    rango_err_T_g.^2);
194 suma_cuadrados_b = sum((rango_T_b - media_rango_T_b).^2 +
    rango_err_T_b.^2);
195 % Divide esta suma por el numero de datos menos uno (grados de
    libertad)
196 desv_est_ajustada_r = sqrt(suma_cuadrados_r / (length(rango_T_r) -
    1))
197 desv_est_ajustada_g = sqrt(suma_cuadrados_g / (length(rango_T_g) -
    1))
198 desv_est_ajustada_b = sqrt(suma_cuadrados_b / (length(rango_T_b) -
    1))

199
200
201 %%%%%%%%%%%%%% DATOS Y GRAFICAS DE TR vs GROSOR MUESTRA 1
    %%%%%%
202
203 Xdata1= [70.35 ,26.42 ,15.88 ,21.92 ,108.2 ,100.3 ,13.68 ,81.77 ,78.40];
204 Yrdata1=
    [0.6246 ,0.6512 ,0.7897 ,0.8318 ,0.4986 ,0.4837 ,0.9967 ,0.5245 ,0.5378]
205 Ygdata1=
    [0.5597 ,0.6178 ,0.7267 ,0.8242 ,0.4238 ,0.4227 ,0.9794 ,0.5178 ,0.5080]
206 Ybdata1=
    [0.3933 ,0.5629 ,0.7047 ,0.7594 ,0.3226 ,0.3542 ,0.9742 ,0.4234 ,0.4315]

```

```
207
208 figure
209 plot(Xdata1, Yrdata1, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
210 xlabel('Thickness (nm)')
211 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
212 title('RT vs th rojo')
213
214 figure
215 plot(Xdata1, Ygdata1, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'g')
216 xlabel('Thickness (nm)')
217 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
218 title('RT vs th azul')
219
220 figure
221 plot(Xdata1, Ybdata1, 'go', 'MarkerFaceColor', 'b')
222 xlabel('Thickness (nm)')
223 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
224 title('RT vs th verde')
225
226 figure
227 plot(Xdata1, Ygdata1, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g')
228 hold on
229 plot(Xdata1, Ybdata1, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'b')
230 hold on
231 plot(Xdata1, Yrdata1, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
232 xlabel('Thickness (nm)')
233 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
234 title('RT vs th')
235
236 %%%%%%%% DATOS Y GRAFICAS DE TR vs GROSOR MUESTRA 2
237 %%%%%%%%
238 Xdata2= [98.79,49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
239 Yrdata2= [0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
240 Ygdata2= [0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];
241 Ybdata2= [0.44,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];
242
243 figure
244 plot(Xdata2, Yrdata2, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
245 xlabel('Thickness (nm)')
246 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
247 title('RT vs th rojo')
248
```

```
249 figure
250 plot(Xdata2, Ybdata2, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'b')
251 xlabel('Thickness (nm)')
252 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
253 title('RT vs th azul')
254
255 figure
256 plot(Xdata2, Ygdata2, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g')
257 xlabel('Thickness (nm)')
258 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
259 title('RT vs th verde')
260
261 figure
262 plot(Xdata2, Ygdata2, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g')
263 hold on
264 plot(Xdata2, Ybdata2, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'b')
265 hold on
266 plot(Xdata2, Yrdata2, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
267 xlabel('Thickness (nm)')
268 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
269 title('RT vs th')
270
271
272 LOS DOS FLEKES
273 %%%%%%%% DATOS Y GRAFICAS DE TR vs GROSOR AMBAS MUESTRAS
274 %%%%%%%%
275 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.77,78.40,98.79,
276 49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
277
278 Yrdata= [0.6246,0.6512,0.7897,0.8318,0.4986,0.4837,0.5245,0.5378,
279 0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
280 Ygdata=[0.5597,0.6178,0.7267,0.8242,0.4238,0.4227,0.5178,
281 0.5080,0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];
282 Ybdata= [0.3933,0.5629,0.7047,0.7594,0.3226,0.3542,0.4234,0.4315
283 ,0.50,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];
284
285 Err_Xdata= [0.489,0.694,0.989,1.392,0.743,0.812,0.4215,0.9620
286 ,0.396,0.548,0.5390,0.912,0.615,0.892,0.3830,0.656]
287 Err_Yrdata = [0.0339,0.0328,0.0475,0.0825,0.0464,0.0674,0.0316,
288 0.0260,0.0632,0.0314,0.0341,0.0282,0.0287,0.0253,0.0499,0.0441];
289 Err_Ygdata =
290 [0.0235,0.0229,0.0505,0.0558,0.0321,0.0452,0.0248,0.0224
```

```
290 ,0.0656,0.0281,0.0284,0.0323,0.0208,0.0268,0.0338,0.0365];
291 Err_Ybdata =
292 [0.0406,0.0385,0.0606,0.0570,0.0406,0.0400,0.0415,0.0457,0.0428
293 ,0.0256,0.0761,0.0511,0.0845,0.0676,0.1143,0.0863];
294
295 figure
296 plot(Xdata, Yrdata, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
297 hold on
298 errorbar(Xdata, Yrdata, Err_Yrdata, Err_Yrdata, Err_Xdata, Err_Xdata,
299 'o');
300 xlabel('Espesor (nm)')
301 ylabel('TR (u.a.)')
302 %title('RT vs th rojo')
303 ylim([0,1.1])
304 xlim([0,250])
305 set(gca,'FontSize',20)
306
307 figure
308 plot(Xdata, Ygdata, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'g')
309 hold on
310 errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata, Err_Ygdata, Err_Xdata, Err_Xdata,
311 'ogreen');
312 xlabel('Espesor (nm)')
313 ylabel('TR (u.a.)')
314 %title('RT vs th verde')
315 ylim([0,1.1])
316 xlim([0,250])
317 set(gca,'FontSize',20)
318
319 figure
320 plot(Xdata, Ybdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'b')
321 hold on
322 errorbar(Xdata, Ybdata, Err_Ybdata, Err_Ybdata, Err_Xdata, Err_Xdata,
323 'obule');
324 xlabel('Espesor (nm)')
325 ylabel('TR (u.a.)')
326 %title('RT vs th azul')
327 ylim([0,1.1])
328 xlim([0,250])
329 set(gca,'FontSize',20)
330
331 figure
332 plot(Xdata, Ygdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g')
```

```
329 hold on
330 plot(Xdata, Ybdata, 'bo', 'MarkerFaceColor', 'b')
331 hold on
332 plot(Xdata, Yrdata, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'r')
333 xlabel('Espesor (nm)')
334 ylabel('TR(u.a.)')
335 %title('RT vs th')
336 ylim([0,1.1])
337 xlim([0,250])
338 set(gca,'FontSize',20)
```

Anexo C: Código simulaciones

```
1 TRANSMITANCIA EN FUNCION DEL GROSOR
2 N FIJA Y K VARIABLE, LAMBDA EN VERDE
3 % transmitancia para una longitud de onda en funcion del thickness
4 clear all
5 t_mat=1:250; %nm
6 lambda=530; %nm
7
8 %SE FIJA N Y VARIA K
9 n_material=1;
10
11 k_material0=0;
12 k_material1=0.25;
13 k_material2=0.5;
14 k_material3=0.75;
15 k_material4=1;
16 k_material5=1.25;
17 k_material6=1.5;
18 k_material7=1.75;
19 k_material8=2;
20 k_material9=2.25;
21
22 %Creamos los arrays de n y de k
23 n_array=[1 n_material 1.4235];
24
25 k0_array=[0 k_material0 0];
26 k1_array=[0 k_material1 0];
27 k2_array=[0 k_material2 0];
28 k3_array=[0 k_material3 0];
29 k4_array=[0 k_material4 0];
```

```
30 k5_array=[0 k_material5 0];
31 k6_array=[0 k_material6 0];
32 k7_array=[0 k_material7 0];
33 k8_array=[0 k_material8 0];
34 k9_array=[0 k_material9 0];
35
36 %Hacemos un bucle for para todos los arrays
37 for i=1:length(t_mat)
38 t_array=[100000000 t_mat(i) 100000000];
39
40 %Aplicamos thinfilmgeneral
41 [t,Tran0,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k0_array,lambda);
42 [t,Tran1,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k1_array,lambda);
43 [t,Tran2,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k2_array,lambda);
44 [t,Tran3,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k3_array,lambda);
45 [t,Tran4,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k4_array,lambda);
46 [t,Tran5,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k5_array,lambda);
47 [t,Tran6,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k6_array,lambda);
48 [t,Tran7,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k7_array,lambda);
49 [t,Tran8,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k8_array,lambda);
50 [t,Tran9,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n_array,k9_array,lambda);
51
52 [t_sus,Tran_sus,r_sus,Ref_sus]=thinfilmgeneral([10000000
      10000000],[1 1.45],[0 0],lambda);
53
54 %Recopilamos los distintos T(i)
55 T0(i)=Tran0;
56 T1(i)=Tran1;
57 T2(i)=Tran2;
58 T3(i)=Tran3;
59 T4(i)=Tran4;
60 T5(i)=Tran5;
61 T6(i)=Tran6;
62 T7(i)=Tran7;
63 T8(i)=Tran8;
64 T9(i)=Tran9;
65
66 T_s(i)=Tran_sus;
67 L(i)=lambda;
68
69 end
70
71 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,98.79,
```

```
72 49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
73 Yrdata= [0.6246,0.6512,0.7897,0.8318,0.4986,0.4837,0.5245,0.5378
74 ,0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
75 Ygdata= [0.5597,0.6178,0.7267,0.8242,0.4238,0.4227,0.5178,0.5080,
76 0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];
77 Ybdata= [0.3933,0.5629,0.7047,0.7594,0.3226,0.3542,0.4234,0.4315,
78 0.5,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];
79
80 Err_Xdata=
81 [0.489,0.694,0.989,1.392,0.743,0.812,0.4215,0.9620,0.396,
82 0.548,0.5390,0.912,0.615,0.892,0.3830,0.656];
83 Err_Yrdata =
84 [0.0339,0.0328,0.0475,0.0825,0.0464,0.0591,0.0316,0.0260,
85 0.0632,0.0314,0.0341,0.0282,0.0287,0.0253,0.0499,0.0441];
86 Err_Ygdata =
87 [0.0235,0.0229,0.0505,0.0558,0.0321,0.0515,0.0248,0.0224,
88 0.0656,0.0281,0.0284,0.0323,0.0208,0.0268,0.0338,0.0365];
89 % figure
90 % plot(t_mat,T1);
91 % hold on
92 % plot(t_mat,T_s);
93
94 figure
95 plot(t_mat,T0./T_s,'DisplayName','k = 0')
96 hold on
97 plot(t_mat,T1./T_s,'DisplayName','k = 0.25')
98 hold on
99 plot(t_mat,T2./T_s,'DisplayName','k = 0.50')
100 hold on
101 plot(t_mat,T3./T_s,'DisplayName','k = 0.75')
102 hold on
103 plot(t_mat,T4./T_s,'DisplayName','k = 1')
104 hold on
105 plot(t_mat,T5./T_s,'DisplayName','k = 1.25')
106 hold on
107 plot(t_mat,T6./T_s,'DisplayName','k = 1.50')
108 hold on
109 plot(t_mat,T7./T_s,'DisplayName','k = 1.75')
110 hold on
```

```
111 plot(t_mat,T8./T_s,'DisplayName','k = 2')
112 hold on
113 plot(t_mat,T9./T_s,'DisplayName','k = 2.25')
114 hold on
115 plot(Xdata, Ygdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g','DisplayName',
116      datos verde')
116 %plot(Xdata, Yrdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'r','DisplayName',
117      datos rojo')
117 %plot(Xdata, Ybdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'b','DisplayName',
118      datos azul')
118 hold on
119 errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata,Err_Ygdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
120      'ogreen','DisplayName','error verde');
120 %errorbar(Xdata, Yrdata, Err_Yrdata,Err_Yrdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
121      'ored','DisplayName','error rojo');
121 %errorbar(Xdata, Ybdata, Err_Ybdata,Err_Ybdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
122      'oblu','DisplayName','error azul');
122 xlabel('Espesor (nm)')
123 ylabel('TR (u.a.)')
124 title('n = 1 (fijo) y k (variable)')
125 set(gca,'FontSize',30)
126 legend boxon
127 legend('Location','northeast')
128 lgd = legend;
129 lgd.NumColumns = 2;
130
131
132 K FIJA Y N VARIABLE, LAMBDA EN VERDE
133 % transmitancia para una longitud de onda en funcion del thickness
134 clear all
135 t_mat=1:250; %nm
136 lambda=400; %nm
137
138 %SE FIJA K Y VARIA N
139 k_material=0.25;
140
141 n_material0=1.25;
142 n_material1=1.40;
143 n_material2=1.55;
144 n_material3=1.70;
145 n_material4=1.85;
146 n_material5=2;
147 n_material6=2.15;
```

```
148 n_material7=2.30;
149 n_material8=2.45;
150 n_material9=2.60;
151
152 %Creamos los arrays de n y de k
153 k_array=[0 k_material 0];
154 n0_array=[1 n_material0 1.45];
155 n1_array=[1 n_material1 1.45];
156 n2_array=[1 n_material2 1.45];
157 n3_array=[1 n_material3 1.45];
158 n4_array=[1 n_material4 1.45];
159 n5_array=[1 n_material5 1.45];
160 n6_array=[1 n_material6 1.45];
161 n7_array=[1 n_material7 1.45];
162 n8_array=[1 n_material8 1.45];
163 n9_array=[1 n_material9 1.45];
164
165 %Hacemos un bucle for para todos los arrays
166 for i=1:length(t_mat)
167 t_array=[100000000 t_mat(i) 100000000];
168
169 %Aplicamos thinfilmgeneral
170 [t,Tran0,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n0_array,k_array,lambda);
171 [t,Tran1,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n1_array,k_array,lambda);
172 [t,Tran2,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n2_array,k_array,lambda);
173 [t,Tran3,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n3_array,k_array,lambda);
174 [t,Tran4,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n4_array,k_array,lambda);
175 [t,Tran5,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n5_array,k_array,lambda);
176 [t,Tran6,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n6_array,k_array,lambda);
177 [t,Tran7,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n7_array,k_array,lambda);
178 [t,Tran8,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n8_array,k_array,lambda);
179 [t,Tran9,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n9_array,k_array,lambda);
180
181 [t_sus,Tran_sus,r_sus,Ref_sus]=thinfilmgeneral([10000000
182 10000000],[1 1.45],[0 0],lambda);
183
184 %Recopilamos los distintos T(i)
185 T0(i)=Tran0;
186 T1(i)=Tran1;
187 T2(i)=Tran2;
188 T3(i)=Tran3;
189 T4(i)=Tran4;
190 T5(i)=Tran5;
```

```
190 T6(i)=Tran6;
191 T7(i)=Tran7;
192 T8(i)=Tran8;
193 T9(i)=Tran9;
194
195 T_s(i)=Tran_sus;
196 L(i)=lambda;
197
198 end
199
200 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,98.79,
201 49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
202 Yrdata= [0.6246,0.6512,0.7897,0.8318,0.4986,0.4837,0.5245,0.5378
203 ,0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
204 Ygdata= [0.5597,0.6178,0.7267,0.8242,0.4238,0.4227,0.5178,0.5080
205 ,0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];
206 Ybdata= [0.3933,0.5629,0.7047,0.7594,0.3226,0.3542,0.4234,0.4315
207 ,0.5,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];
208
209 Err_Xdata= [0.489,0.694,0.989,1.392,0.743,0.812,0.4215,0.9620,0.396
210 ,0.548,0.5390,0.912,0.615,0.892,0.3830,0.656];
211 Err_Yrdata =
212 [0.0339,0.0328,0.0475,0.0825,0.0464,0.0591,0.0316,0.0260
213 ,0.0632,0.0314,0.0341,0.0282,0.0287,0.0253,0.0499,0.0441];
214 Err_Ygdata =
215 [0.0235,0.0229,0.0505,0.0558,0.0321,0.0515,0.0248,0.0224
216 ,0.0656,0.0281,0.0284,0.0323,0.0208,0.0268,0.0338,0.0365];
217 Err_Ybdata =
218 [0.0406,0.0385,0.0606,0.0570,0.0406,0.0489,0.0415,0.0457
219 ,0.0428,0.0256,0.0761,0.0511,0.0845,0.0676,0.1143,0.0863];
220
221
222
223
224 figure
225 plot(t_mat,T0./T_s,'DisplayName','n = 1.25')
226 hold on
227 plot(t_mat,T1./T_s,'DisplayName','n = 1.40')
228 hold on
229 plot(t_mat,T2./T_s,'DisplayName','n = 1.55')
```

```
230 hold on
231 plot(t_mat,T3./T_s,'DisplayName','n = 1.70')
232 hold on
233 plot(t_mat,T4./T_s,'DisplayName','n = 1.85')
234 hold on
235 plot(t_mat,T5./T_s,'DisplayName','n = 2')
236 hold on
237 plot(t_mat,T6./T_s,'DisplayName','n = 2.15')
238 hold on
239 plot(t_mat,T7./T_s,'DisplayName','n = 2.30')
240 hold on
241 plot(t_mat,T8./T_s,'DisplayName','n = 2.45')
242 hold on
243 plot(t_mat,T9./T_s,'DisplayName','n = 2.60')
244 hold on
245 %plot(Xdata, Ygdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g','DisplayName',
246 %      datos verde')
246 %plot(Xdata, Yrdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'r','DisplayName',
247 %      datos rojo')
247 plot(Xdata, Ybdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'b','DisplayName',
248 %      datos azul')
248 hold on
249 %errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata,Err_Ygdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
250 %          'ogreen','DisplayName','error verde');
250 %errorbar(Xdata, Yrdata, Err_Yrdata,Err_Yrdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
251 %          'ored','DisplayName','error rojo');
251 errorbar(Xdata, Ybdata, Err_Ybdata,Err_Ybdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
252 %          'obblue','DisplayName','error azul');
252 xlabel('Espesor (nm)')
253 ylabel('TR (u.a.)')
254 title('k = 0.25 y n (variable)')
255 set(gca,'FontSize',30)
256 legend boxon
257 legend('Location','northeast')
258 lgd = legend;
259 lgd.NumColumns = 2;
260
261 N Y K VARIABLE, LAMBDA EN VERDE
262 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,98.79,
263 49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
264 Yrdata= [0.6246,0.6512,0.7897,0.8318,0.4986,0.4837,0.5245,0.5378,
265 0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
266 Ygdata= [0.5597,0.6178,0.7267,0.8242,0.4238,0.4227,0.5178,0.5080,
```

```
267 0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];  
268 Ybdata= [0.3933,0.5629,0.7047,0.7594,0.3226,0.3542,0.4234,0.4315,  
269 0.5,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];  
270  
271 Err_Xdata=  
272 [0.489,0.694,0.989,1.392,0.743,0.812,0.4215,0.9620,0.396,  
273 0.548,0.5390,0.912,0.615,0.892,0.3830,0.656];  
274 Err_Yrdata =  
275 [0.0339,0.0328,0.0475,0.0825,0.0464,0.0591,0.0316,0.0260,  
276 0.0632,0.0314,0.0341,0.0282,0.0287,0.0253,0.0499,0.0441];  
277 Err_Ygdata =  
278 [0.0235,0.0229,0.0505,0.0558,0.0321,0.0515,0.0248,0.0224,  
279 0.0656,0.0281,0.0284,0.0323,0.0208,0.0268,0.0338,0.0365];  
280 Err_Ybdata =  
281 [0.0406,0.0385,0.0606,0.0570,0.0406,0.0489,0.0415,0.0457,  
282 0.0428,0.0256,0.0761,0.0511,0.0845,0.0676,0.1143,0.0863];  
283  
284 t_mat=1:250; %nm  
285 lambda=530; %nm  
286  
287 n_material0=2.2  
288 k_material=0.2  
289  
290 %Creamos los arrays de n y de k  
291 k_array=[0 k_material 0];  
292 n0_array=[1 n_material0 1.4235];  
293  
294 %Hacemos un bucle for para todos los arrays  
295 for i=1:length(t_mat)  
296 t_array=[100000000 t_mat(i) 100000000];  
297  
298 %Aplicamos thinfilmgeneral  
299 [t,Tran0,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n0_array,k_array,lambda);  
300 [t_sus,Tran_sus,r_sus,Ref_sus]=thinfilmgeneral([10000000  
301 10000000],[1 1.45],[0 0],lambda);  
302  
303 %Recopilamos los distintos T(i)  
304 T0(i)=Tran0;  
305 T_s(i)=Tran_sus;  
306  
307 L(i)=lambda;  
308  
309 end
```

```
305
306 figure
307 plot(t_mat,T0./T_s,'green')
308 hold on
309 plot(Xdata, Ygdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'g')
310 %plot(Xdata, Yrdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'r')
311 %plot(Xdata, Ybdata, 'go', 'MarkerFaceColor', 'b')
312 hold on
313 errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata,Err_Ygdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
314 'ogreen');
315 xlabel('Thickness')
316 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
317 title('k=0 y n (variable)')
318
319 REPRESENTACION CON LOS DATOS SIMULADOS
320 % transmitancia para una longitud de onda en funcion del thickness
321 clear all
322 t_mat=1:250 %nm
323 lambda=530 %nm
324
325 %Mantememos fijo la n
326 k_material=0.198; %CAMBIAR LA n
327 %Cambiamos la k
328 n_material0=2.153;
329
330 %Creamos los arrays de n y de k
331 k_array=[0 k_material 0];
332 n0_array=[1 n_material0 1.45];
333
334 %Hacemos un bucle for para todos los arrays
335
336 for i=1:length(t_mat)
337 t_array=[100000000 t_mat(i) 100000000];
338
339 %Aplicamos thinfilmgeneral
340 [t,Tran0,r,Ref]=thinfilmgeneral(t_array,n0_array,k_array,lambda);
341 [t_sus,Tran_sus,r_sus,Ref_sus]=thinfilmgeneral([10000000
342 10000000],[1 1.45],[0 0],lambda);
343
344 %Recopilamos los distintos T(i)
345 T0(i)=Tran0;
346 T_s(i)=Tran_sus;
```

```
346 L(i)=lambda;
347
348 end
349
350 Xdata= [70.35 ,26.42 ,15.88 ,21.92 ,108.2 ,100.3 ,81.73 ,78.40 ,98.79
351 ,49.07 ,26.42 ,47.70 ,182.7 ,232.0 ,45.50 ,42.99];
352 Yrdata= [0.6246 ,0.6512 ,0.7897 ,0.8318 ,0.4986 ,0.4837 ,0.5245 ,0.5378
353 ,0.59 ,0.6166 ,0.7161 ,0.6870 ,0.4763 ,0.4277 ,0.7448 ,0.7547];
354 Ygdata= [0.5597 ,0.6178 ,0.7267 ,0.8242 ,0.4238 ,0.4227 ,0.5178 ,0.5080 ,
355 0.50 ,0.5821 ,0.6625 ,0.6838 ,0.4461 ,0.4237 ,0.6734 ,0.6416];
356 Ybdata= [0.3933 ,0.5629 ,0.7047 ,0.7594 ,0.3226 ,0.3542 ,0.4234 ,0.4315
357 ,0.5 ,0.5532 ,0.7200 ,0.7758 ,0.3689 ,0.5188 ,0.6640 ,0.6537];
358
359 Err_Xdata= [0.489 ,0.694 ,0.989 ,1.392 ,0.743 ,0.812 ,0.4215 ,0.9620 ,0.396
360 ,0.548 ,0.5390 ,0.912 ,0.615 ,0.892 ,0.3830 ,0.656];
361 Err_Yrdata =
362 [0.0339 ,0.0328 ,0.0475 ,0.0825 ,0.0464 ,0.0591 ,0.0316 ,0.0260 ,
363 0.0632 ,0.0314 ,0.0341 ,0.0282 ,0.0287 ,0.0253 ,0.0499 ,0.0441];
364 Err_Ygdata =
365 [0.0235 ,0.0229 ,0.0505 ,0.0558 ,0.0321 ,0.0515 ,0.0248 ,0.0224
366 ,0.0656 ,0.0281 ,0.0284 ,0.0323 ,0.0208 ,0.0268 ,0.0338 ,0.0365];
367 Err_Ybdata =
368 [0.0406 ,0.0385 ,0.0606 ,0.0570 ,0.0406 ,0.0489 ,0.0415 ,0.0457
369 ,0.0428 ,0.0256 ,0.0761 ,0.0511 ,0.0845 ,0.0676 ,0.1143 ,0.0863];
370
371 %GRAFICO PARA VERDE
372 figure
373 plot(t_mat,T0./T_s,'green')
374 hold on
375 plot(Xdata, Ygdata, 'ro', 'MarkerFaceColor', 'g')
376 hold on
377 errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata,Err_Ygdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
378 'ogreen');
379 xlabel('Thickness (nm)')
380 ylabel('Relative Transmittance (a.u.)')
381 title('RT vs th verde')
382 ylim([0,1.1])
383
384 TRANSMITANCIA EN FUNCION DE LAMBDA EN SiO2/Si
385 clear all
386
387 % Simulacion transmitancia en funcion de la longitud de onda para
388 un
```

```
384 % thickness , suponiendo que conocemos indice de refraccion n+ik
385
386 %Se declaran los grosores por separado por si hay algunos que no se
387 %necesiten en la simulacion.
388 t1_material=21.24; %nm
389 t2_material=70.35;
390 t3_material=15.88;
391 t4_material=98.79;
392 t5_material=49.07;
393 t6_material=26.42;
394 t7_material=47.70;
395 %t8_material=;
396 t9_material=182.7;
397
398
399 n_material=2.051;
400 k_material=0.2698;
401
402 %Construimos arrays de thickness e indices de refraccion para el
        sistema de
403 %multicapas, en este ejemplo, aire semiinfinito, material , 300 nm
        de SiO2 y
404 %Si semiinfinito.
405
406 t1tr_array=[100000000 t1_material 300 100000000]; % nm
407 t2tr_array=[100000000 t2_material 300 100000000];
408 t3tr_array=[100000000 t3_material 300 100000000];
409 t4tr_array=[100000000 t4_material 300 100000000];
410 t5tr_array=[100000000 t5_material 300 100000000];
411 t6tr_array=[100000000 t6_material 300 100000000];
412 t7tr_array=[100000000 t7_material 300 100000000];
413 %t8_array=[100000000 t8_material 300 100000000];
414 t9tr_array=[100000000 t9_material 300 100000000];
415
416 %El indice de refraccion del SiO2 es 1.46 + 0i, y el del Si es
        4.123 +
417 %0.048i
418
419 n1_array=[1 n_material 1.46 4.123];
420 k1_array=[0 k_material 0 0.048];
421
422 %Bucle de calculo de Transmitancia y Reflectancia iterando sobre
        lambda
```

```
423 %En esta iteracion se usa la funcion thinfilmgeneral para calcular
424     la
425     %transmitancia y reflectancia.
426 i=1;
427 for lambda=400:800
428
429     [t1,Tran1,r,Ref1tr]=thinfilmgeneral(t1tr_array,n1_array,
430         k1_array,lambda);
431     [t2,Tran2,r,Ref2tr]=thinfilmgeneral(t2tr_array,n1_array,
432         k1_array,lambda);
433     [t3,Tran3,r,Ref3tr]=thinfilmgeneral(t3tr_array,n1_array,
434         k1_array,lambda);
435     [t4,Tran4,r,Ref4tr]=thinfilmgeneral(t4tr_array,n1_array,
436         k1_array,lambda);
437     [t5,Tran5,r,Ref5tr]=thinfilmgeneral(t5tr_array,n1_array,
438         k1_array,lambda);
439     [t6,Tran6,r,Ref6tr]=thinfilmgeneral(t6tr_array,n1_array,
440         k1_array,lambda);
441     [t7,Tran7,r,Ref7tr]=thinfilmgeneral(t7tr_array,n1_array,
442         k1_array,lambda);
443     % [t8,Tran8,r,Ref8tr]=thinfilmgeneral(t8tr_array,n_array,k_array,
444         ,lambda);
445     [t9,Tran9,r,Ref9tr]=thinfilmgeneral(t9tr_array,n1_array,
446         k1_array,lambda);
447     [t_sus,Tran_sus,r_sus,Reftr_sus]=thinfilmgeneral([10000000 300
448         10000000],[1 1.46 4.123],[0 0 0.048],lambda);
449
450 %Reflectancias en SiO2/Si
451
452 R1tr(i)=Ref1tr;
453 R2tr(i)=Ref2tr;
454 %R3(i)=Ref3tr;
455 R4tr(i)=Ref4tr;
456 R5tr(i)=Ref5tr;
457 R6tr(i)=Ref6tr;
458 R7tr(i)=Ref7tr;
459 %R8(i)=Ref8tr;
460 R9tr(i)=Ref9tr;
461 R_str(i)=Reftr_sus;
462
463
464 %Calculo de la energia
```

```
455 L(i)=lambda;
456 h = 4.135667696e-15;
457 c = 299792458;
458 lambda_m(i) = L(i) * 1e-9;
459 E(i) = 4.135667696e-15.*3e8./lambda_m(i);
460 i=i+1;
461
462 end
463
464 %Grafico el contraste en SiO2/Si (energia)
465
466 figure
467 plot(E,(R1tr-R_str)./(R1tr+R_str), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t1
= 21.24 nm");
468 hold on
469 plot(E,(R2tr-R_str)./(R2tr+R_str), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t2
= 70.35 nm");
470 %hold on
471 %plot(E,(R3tr-R_str)./(R3+R_s), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t3 =
15.88 nm");
472 hold on
473 plot(E,(R4tr-R_str)./(R4tr+R_str), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t4
= 98.79 nm");
474 hold on
475 plot(E,(R6tr-R_str)./(R6tr+R_str), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t6
= 26.42 nm");
476 hold on
477 plot(E,(R7tr-R_str)./(R7tr+R_str), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t7
= 47.70 nm");
478 hold on
479 plot(E,(R9tr-R_str)./(R9tr+R_str), 'LineWidth',2,'DisplayName'," t9
= 182.7 nm");
480 xlim([1.5,3])
481 xlabel('Energia (eV)')
482 ylabel('Contraste (u.a.)')
483 %title('Simulacion contraste para distintos grosores CrSBr')
484 set(gca,'FontSize',20)
485 legend boxon
486 legend('Location','northeast')
487
488
489 TRANSMITANCIA y REFLECTANCIA EN FUNCION DE LAMBDA EN PDMS
490 clear all
```

```
491
492 %Se declaran los grosores por separado por si hay algunos que no se
493 %necesiten en la simulacion.
494 t1_material=21.24; %nm
495 t2_material=70.35;
496 t3_material=15.88;
497 t4_material=98.79;
498 t5_material=49.07;
499 t6_material=26.42;
500 t7_material=47.70;
501 %t8_material=;
502 t9_material=182.7;
503
504 %n_material=2.124;
505 %k_material=0.229;
506
507 n_material=2.187;
508 k_material=0.223;
509
510 t1_array=[100000000 t1_material 100000000]; % nm
511 t2_array=[100000000 t2_material 100000000];
512 t3_array=[100000000 t3_material 100000000];
513 t4_array=[100000000 t4_material 100000000];
514 t5_array=[100000000 t5_material 100000000];
515 t6_array=[100000000 t6_material 100000000];
516 t7_array=[100000000 t7_material 100000000];
517 %t8_array=[100000000 t8_material 100000000];
518 t9_array=[100000000 t9_material 100000000];
519
520 %El indice de refraccion del SiO2 es 1.46 + 0i
521
522 n_array=[1 n_material 1.4235];
523 k_array=[0 k_material 0];
524
525 %Bucle de calculo de Transmitancia y Reflectancia iterando sobre
      lambda
526 %En esta iteracion se usa la funcion thinfilmgeneral para calcular
      la
527 %transmitancia y reflectancia.
528 i=1;
529 for lambda=400:800
530
531 [t1,Tran1,r,Ref1]=thinfilmgeneral(t1_array,n_array,k_array,
```

```
lambda);
532 [t2,Tran2,r,Ref2]=thinfilmgeneral(t2_array,n_array,k_array,
lambda);
533 [t3,Tran3,r,Ref3]=thinfilmgeneral(t3_array,n_array,k_array,
lambda);
534 [t4,Tran4,r,Ref4]=thinfilmgeneral(t4_array,n_array,k_array,
lambda);
535 [t5,Tran5,r,Ref5]=thinfilmgeneral(t5_array,n_array,k_array,
lambda);
536 [t6,Tran6,r,Ref6]=thinfilmgeneral(t6_array,n_array,k_array,
lambda);
537 [t7,Tran7,r,Ref7]=thinfilmgeneral(t7_array,n_array,k_array,
lambda);
538 % [t8,Tran8,r,Ref8]=thinfilmgeneral(t8_array,n_array,k_array,
lambda);
539 [t9,Tran9,r,Ref9]=thinfilmgeneral(t9_array,n_array,k_array,
lambda);
540 [t_sus,Tran_sus,r_sus,Ref_sus]=thinfilmgeneral([10000000
10000000],[1 1.4235],[0 0],lambda);

541
542 %Transmitancias en PDMS
543 T1(i)=Tran1;
544 T2(i)=Tran2;
545 T3(i)=Tran3;
546 T4(i)=Tran4;
547 T5(i)=Tran5;
548 T6(i)=Tran6;
549 T7(i)=Tran7;
550 %T8(i)=Tran8;
551 T9(i)=Tran9;
552 T_s(i)=Tran_sus;
553
554 %Reflectancias en PDMS
555 R1(i)=Ref1;
556 R2(i)=Ref2;
557 %R3(i)=Ref3;
558 R4(i)=Ref4;
559 R5(i)=Ref5;
560 R6(i)=Ref6;
561 R7(i)=Ref7;
562 %R8(i)=Ref8;
563 R9(i)=Ref9;
564 R_s(i)=Ref_sus;
```

```
565
566
567 %Se calcula la energia
568 L(i)=lambda;
569 h = 4.135667696e-15;
570 c = 299792458;
571 lambda_m(i) = L(i) * 1e-9;
572 E(i) = 4.135667696e-15.*3e8./lambda_m(i);
573 i=i+1;
574
575 end
576
577 %Grafico las Transmitancias en PDMS
578 figure
579 plot(L,T_s,'k');
580 hold on
581 plot(L,T1);
582 hold on
583 plot(L,T2);
584 hold on
585 plot(L,T3);
586 hold on
587 plot(L,T4);
588 hold on
589 plot(L,T5);
590 hold on
591 plot(L,T6);
592 hold on
593 plot(L,T7);
594 %hold on
595 %plot(L,T8);
596 hold on
597 plot(L,T9);
598
599 %Grafico las Transmitancias relativas en PDMS(long. de onda)
600 figure
601 plot(L,T1./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t1 = 21.24 nm')
602 hold on
603 plot(L,T2./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t2 = 70.35 nm')
604 hold on
605 plot(L,T3./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t3 = 15.88 nm')
606 hold on
607 plot(L,T4./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t4 = 98.79 nm')
```

```
608 %hold on
609 %plot(L,T5./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t5 = 49.07 nm')
610 hold on
611 plot(L,T6./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t6 = 26.42 nm')
612 hold on
613 plot(L,T7./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t7 = 47.70 nm')
614 % hold on
615 % plot(L,T8./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t8 = 21.24 nm')
616 hold on
617 plot(L,T9./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t9 = 182.7 nm')
618 ylim([0,1.1])
619 xlim([400,700])
620 xlabel('Longitud de onda (nm)')
621 ylabel('Transmitancia relativa (u.a.)')
622 title('Simulacion Transmitancia relativa para distintos grosores
CrSBr')
623 legend boxon
624 legend('Location','southeast')
625 legend('Interpreter','latex')
626
627
628 %Grafico transmitancias relativas en PDMS(Energia)
629 figure
630 plot(E,T1./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t1 = 21.24 nm')
631 hold on
632 plot(E,T2./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t2 = 70.35 nm')
633 %hold on
634 %plot(E,T3./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t3 = 15.88 nm')
635 hold on
636 plot(E,T4./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t4 = 98.79 nm')
637 hold on
638 plot(L,T5./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t5 = 49.07 nm')
639 hold on
640 plot(E,T6./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t6 = 26.42 nm')
641 %hold on
642 %plot(E,T7./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t7 = 47.70 nm')
643 % hold on
644 % plot(L,T8./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t8 = 21.24 nm')
645 hold on
646 plot(E,T9./T_s,'LineWidth',2,'DisplayName','t9 = 182.7 nm')
647 ylim([0,1.1])
648 xlim([1.5,3])
649 xlabel('Energia (eV)')
```

```
650 ylabel('Transmitancia relativa (a.u.)')
651 title('Simulacion Transmitancia relativa para distintos grosores
652 CrSBr')
653 legend boxon
654 legend('Location','southeast')
655 legend('Interpreter','latex')
656
657 %Grafico reflectancias en PDMS
658 figure
659 plot(L,R_s,'k');
660 hold on
661 plot(L,R1);
662 hold on
663 plot(L,R2);
664 % hold on
665 % plot(L,R3);
666 hold on
667 plot(L,R4);
668
669 %Grafico el contraste en PDMS (energia)
670 figure
671 plot(E,(R1-R_s)./(R1+R_s),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste t1
672 = 21.24 nm");
673 hold on
674 plot(E,(R2-R_s)./(R_s+R2),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste t2
675 = 70.35 nm");
676 %hold on
677 %plot(E,(R3-R_s)./(R3+R_s),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste
678 t3 = 15.88 nm");
679 hold on
680 plot(E,(R4-R_s)./(R4+R_s),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste t4
681 = 98.79 nm");
682 hold on
683 plot(E,(R6-R_s)./(R6+R_s),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste t6
684 = 26.42 nm");
685 hold on
686 plot(E,(R7-R_s)./(R7+R_s),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste t7
687 = 47.70 nm");
688 hold on
689 plot(E,(R9-R_s)./(R9+R_s),'LineWidth',2,'DisplayName',"Contraste t9
690 = 182.7 nm");
691 ylim([0,1])
```

```

685 xlim([1.5,3])
686 xlabel('Energia (eV)')
687 ylabel('Contraste (u.a.)')
688 title('Simulacion contraste para distintos grosores CrSBr')
689 legend boxon
690 legend('Location','southeast')
691 legend('Interpreter','latex')

```

Anexo D: Código ajuste

```

1 clear all
2
3 %Se declaran los datos obtenidos en analisis_transmitancia_TFG.mlx
4
5 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,98.79,
6 49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
7 Yrdata= [0.6246,0.6512,0.7897,0.8318,0.4986,0.4837,0.5245,0.5378
8 ,0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
9 Ygdata= [0.5597,0.6178,0.7267,0.8242,0.4238,0.4227,0.5178,0.5080
10 ,0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];
11 Ybdata= [0.3933,0.5629,0.7047,0.7594,0.3226,0.3542,0.4234,0.4315
12 ,0.5,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];
13
14 Err_Xdata= [0.489,0.694,0.989,1.392,0.743,0.812,0.4215,0.9620
15 ,0.396,0.548,0.5390,0.912,0.615,0.892,0.3830,0.656]
16 Err_Yrdata = [0.0339,0.0328,0.0475,0.0825,0.0464,0.0591,0.0316
17 ,0.0260,0.0632,0.0314,0.0341,0.0282,0.0287,0.0253,0.0499,0.0441];
18 Err_Ygdata = [0.0235,0.0229,0.0505,0.0558,0.0321,0.0515,0.0248
19 ,0.0224,0.0656,0.0281,0.0284,0.0323,0.0208,0.0268,0.0338,0.0365];
20 Err_Ybdata = [0.0406,0.0385,0.0606,0.0570,0.0406,0.0489,0.0415
21 ,0.0457,0.0428,0.0256,0.0761,0.0511,0.0845,0.0676,0.1143,0.0863];
22
23
24 cd('/Users/gabriel/Desktop/TFG/Scripts analisis transmitancia')
25 load('qe_sensor.mat')
26
27 figure
28 scatter(Xdata,Ybdata,'blue','filled');
29 hold on
30 scatter(Xdata,Ygdata,'green','filled');
31 scatter(Xdata,Yrdata,'red','filled');
32 set(gca,'FontSize',20)

```

```
33 xlabel('Thickness (nm)')
34 ylabel('Relative transmittance')
35
36 figure
37 scatter(l_blue,qe_blue,'blue')
38 hold on
39 scatter(l_green,qe_green,'green')
40 scatter(l_red,qe_red,'red')
41 set(gca,'FontSize',20)
42 xlabel('Wavelength (nm)')
43 ylabel('QE')
44
45 canal azul simulaciones
46 ddd=0:250;
47
48 figure
49 hold on
50 scatter(Xdata,Ybdata,'blue','filled')
51 set(gca,'FontSize',20)
52 xlabel('Espesor (nm)')
53 ylabel('TR (u.a.)')
54
55
56 %% Simulacion con QE
57 nre=[1 2.051 1.4235]; % en la nueva funcion defino todo las partes
    reales en un vector
58 nim=[0 0.2698 0]; % y las imaginarias en otro [aire material
    sustrato]
59 nrsu=[1 1.4235]; % para calcular la transmitancia del sustrato
60 nisu=[0 0];
61
62 nra= [1 2.716 1.4235];
63 nia = [0 0.3968 0];
64
65 nrb= [1 1.386 1.4235];
66 nib = [0 0.1429 0];
67 %lamb=400:25:500; % lambdas para normalizar la QE del sensor
68 %wei=[0.4 0.45 0.5 0.6 0.4]; % weights para normalizar la QE
69 lamb=l_blue;
70 wei=qe_blue./100;
71 wei=wei./sum(wei);
72
73
```

```
74 clear x yy yysus
75 x=ddd;
76
77 for j=1:length(x)
78     th=[100000 x(j) 100000];
79     thsu=[100000 100000];
80     Tranac=0;
81     Tranac_a=0;
82     Tranac_b=0;
83     Transusac=0;
84     Transusac_a=0;
85     for k=1:length(lamb)
86         [tf,Tran,rf,Refl]=thinfilmgeneral(th,nre,nim,lamb(k));
87         [tfa,Trana,rfa,Refla]=thinfilmgeneral(th,nra,nia,lamb(k));
88         [tfb,Tranb,rb,Reflb]=thinfilmgeneral(th,nrb,nib,lamb(k));
89         [tsus,Transu,rfsus,Refsus]=thinfilmgeneral(thsu,nrsu,nisu,lamb(
90 k));
91         Tranac=Tranac+Tran*wei(k);
92         Transusac=Transusac+Transu*wei(k);
93
94         Tranac_a=Tranac_a+Trana*wei(k);
95
96         Tranac_b=Tranac_b+Tranb*wei(k);
97     end
98     yy(j)=Tranac;
99     yysus(j)=Transusac;
100    yya(j) = Tranac_a;
101    yyb(j)= Tranac_b;
102 end
103 clear y
104 y=yy./yysus;
105 simblueqe=y;
106 y_a= yya./yysus;
107 y_b= yyb./yysus;
108
109 hold on
110 plot(ddd,y,'blue','DisplayName','Con QE','Color','blue')
111 hold on
112 plot(ddd,y_a,'+', 'DisplayName','Error azul (+)','Color','black');
113 hold on
114 plot(ddd,y_b,'--', 'DisplayName','Error azul (-)','Color','black');
115 hold on
```

```
116 errorbar(Xdata, Ybdata, Err_Ybdata,Err_Ybdata,Err_Xdata,Err_Xdata,'
117     oblue');
118 set(gca,'FontSize',20)
119 legend boxon
120 legend('datos azul','Con QE','Error azul (+)','Error azul (-)')
121 legend('Location','northeast')
122
123 blue channel fit with QE
124 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,
125 98.79,49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
126 Ybdata= [0.3933,0.5629,0.7047,0.7594,0.3226,0.3542,0.4234,
127 0.4315,0.44,0.5532,0.7200,0.7758,0.3689,0.5188,0.6640,0.6537];
128
129 n0=[1 0];
130 %lamb=400:25:500; % lambdas to normalize to quantum efficiency of
131 %the sensor
132 %wei=[0.4 0.45 0.5 0.6 0.4]./2.35; % weights to normalize to QE
133
134 n2=[1.4235 0];
135
136 lamb=l_blue;
137 wei=qe_blue./100;
138 wei=wei./sum(wei);
139
140 %% quiero comprobar que ocurre si fijo el indice de refraccion del
141 %% pdms n2
142 fblue2=@(a,c,x) fitqefeps3(x,a,n2(1),c,n2(2),n0,lamb,wei);
143
144 f2b=fit(Xdata',Ybdata',fblue2,'StartPoint',[1.88, 0.16],'Lower
145     ',[0,0],'Upper',[5,0.5])
146
147 %%evaluate fits
148 cc2=coeffvalues(f2b);
149
150 TTf2=fitqefeps3(ddd,cc2(1),n2(1),cc2(2),n2(2),n0,lamb,wei);
151 ttfblue2=TTf2;
152
153
154 figure
```

```
155 scatter(Xdata,Ybdata,'filled','blue')
156 hold on
157 plot(ddd,TTf2,'blue')
158 hold on
159 errorbar(Xdata, Ybdata, Err_Ybdata,Err_Ybdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
160 'obblue');
160 legend('datos azul','n = 2.051 + 0.2698i')
161 xlabel('Espesor (nm)')
162 ylabel('TR (u.a.)')
163 set(gca,'FontSize',20)
164
165 figure
166 TTerror2=Ybdata-fitqefeps3(Xdata,cc2(1),n2(1),cc2(2),n2(2),n0,lamb,
167 wei);
168 hold on
169 scatter(Xdata,TTerror2,'filled')
170
171 green channel
172
173 figure
174 scatter(Xdata,Ygdata,'green','filled')
175 set(gca,'FontSize',20)
176 xlabel('Espesor (nm)')
177 ylabel('TR (u.a.)')
178
179 hold on
180 %% simulacion nueva, comprobacion por consistencia
181 nre=[1 2.187 1.43]; % en la nueva funcion defino todo las partes
182 reales en un vector
183 nim=[0 0.223 0]; % y las imaginarias en otro [aire material
184 sustrato]
185 nrsu=[1 1.4235]; % para calcular la transmitancia del sustrato
186 nisu=[0 0];
187
188 nra= [1 2.546 1.4235];
189 nia = [0 0.2954 0];
190
191 nrb= [1 1.828 1.4235];
192 nib = [0 0.1506 0];
193
194 %lamb=475:25:600; % I divide the sensor spectrum in 5 bins
195 assuming the contributions of other wavelengths with lower than 50%
```

```
    do not add much
194 %wei=[0.4 0.5 0.7 0.8 0.6 0.4];
195 lamb=l_green;
196 wei=qe_green./100;
197 wei=wei./sum(wei);
198
199 wei=wei./sum(wei);
200
201 clear x yy yysus
202 x=ddd;
203
204 for j=1:length(x)
205     th=[100000 x(j) 100000];
206     thsu=[100000 100000];
207     Tranac=0;
208     Tranac_a=0;
209     Tranac_b=0;
210     Transusac=0;
211     Transusac_a=0;
212     for k=1:length(lamb)
213         [tf ,Tran ,rf ,Refl]=thinfilmgeneral(th,nre,nim,lamb(k));
214         [tfa ,Trana ,rfa ,Refla]=thinfilmgeneral(th,nra,nia,lamb(k));
215         [tfb ,Tranb ,rbf ,Reflb]=thinfilmgeneral(th,nrb,nib,lamb(k));
216         [tsus ,Transu ,rfsus ,Refsus]=thinfilmgeneral(thsu,nrsu,nisu,lamb(
217 k));
217         Tranac=Tranac+Tran*wei(k);
218         Transusac=Transusac+Transu*wei(k);
219
220         Tranac_a=Tranac_a+Trana*wei(k);
221
222         Tranac_b=Tranac_b+Tranb*wei(k);
223     end
224     yy(j)=Tranac;
225     yysus(j)=Transusac;
226     yya(j) = Tranac_a;
227     yyb(j)= Tranac_b;
228 end
229 clear y
230 y=yy./yysus;
231 simgreenqe=y;
232 y_a= yya./yysus;
233 y_b= yyb./yysus;
234
```

```
235
236 hold on
237 plot(ddd,y,'green','DisplayName',"Con QE",'Color','green');
238 hold on
239 plot(ddd,y_a,'+','DisplayName',"Error verde (+)","Color",'black');
240 hold on
241 plot(ddd,y_b,'--','DisplayName',"Error verde (-)","Color",'black');
242 hold on
243 errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata,Err_Ygdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
244 ogreen);
245 set(gca,'FontSize',20)
246 legend boxon
247 legend('datos verde','Con QE','Error verde (+)','Error verde (-)')
248 legend('Location','northeast')
249
250 green channel fit with QE
251 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,
252 98.79,49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
253 Ygdata= [0.5597,0.6178,0.7267,0.8242,0.4238,0.4227,0.5178,
254 0.5080,0.50,0.5821,0.6625,0.6838,0.4461,0.4237,0.6734,0.6416];
255
256 n0=[1 0];
257 %lamb=475:25:600; % I divide the sensor spectrum in 5 bins assuming
258 % the contributions of other wavelengths with lower than 50% do
259 % not add much
260 %wei=[0.4 0.5 0.7 0.8 0.6 0.4];
261 lamb=l_green;
262 wei=qe_green./100;
263 wei=wei./sum(wei);
264 %%fit nuevo
265 n2=[1.4235 0];
266
267 fgreen2=@(a,c,x) fitqefeps3(x,a,n2(1),c,n2(2),n0,lamb,wei);
268
269 f2g=fit(Xdata',Ygdata',fgreen2,'StartPoint',[1, 0],'Lower',[0,0],
270 'Upper',[5,0.5])
271 %%evaluate fits
272 cc2=coeffvalues(f2g);
273 TTf2=fitqefeps3(ddd,cc2(1),n2(1),cc2(2),n2(2),n0,lamb,wei);
```

```
274 ttfgreen2=TTf2;
275 figure
276 scatter(Xdata,Ygdata,'filled','green')
277 hold on
278
279 plot(ddd,TTf2,'green')
280 hold on
281 errorbar(Xdata, Ygdata, Err_Ygdata,Err_Ygdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
282 'ogreen');
283 legend('datos verde',"n = 2.187 + 0.223i")
284 xlabel('Espesor (nm)')
285 ylabel('TR (u.a.)')
286 set(gca,'FontSize',20)
287 figure
288 TTerror2=Ygdata-fitqefeps3(Xdata,cc2(1),n2(1),cc2(2),n2(2),n0,lamb,
289 'wei');
290 hold on
291
292 scatter(Xdata,TTerror2,'filled')
293
294
295
296
297
298
299
300
301 %% nueva simulacion
302 %% simulacion nueva, comprobacion por consistencia
303 nre=[1 2.135 1.45]; % en la nueva funcion defino todo las partes
304 reales en un vector
305 nim=[0 0.1961 0]; % y las imaginarias en otro [aire material
306 sustrato]
307 nrsu=[1 1.4235]; % para calcular la transmitancia del sustrato
308 nisu=[0 0];
309
310
311 nra= [1 2.448 1.4235];
312 nia = [0 0.2649 0];
313
314 nrb= [1 1.822 1.4235];
315 nib = [0 0.1272 0];
```

```

313
314 lamb=l_red;
315 wei=qe_red./100;
316 wei=wei./sum(wei);
317
318 clear x yy yysus
319 x=ddd;
320
321 for j=1:length(x)
322     th=[100000 x(j) 100000];
323     thsu=[100000 100000];
324     Tranac=0;
325     Tranac_a=0;
326     Tranac_b=0;
327     Transusac=0;
328     Transusac_a=0;
329     for k=1:length(lamb)
330         [tf ,Tran ,rf ,Refl]=thinfilmgeneral(th,nre,nim,lamb(k));
331         [tfa ,Trana ,rfa ,Refla]=thinfilmgeneral(th,nra,nia,lamb(k));
332         [tfb ,Tranb ,rb ,Reflb]=thinfilmgeneral(th,nrb,nib,lamb(k));
333         [tsus ,Transu ,rfsus ,Refsus]=thinfilmgeneral(thsu,nrsu,nisu,lamb(k));
334         Tranac=Tranac+Tran*wei(k);
335         Transusac=Transusac+Transu*wei(k);
336
337         Tranac_a=Tranac_a+Trana*wei(k);
338
339         Tranac_b=Tranac_b+Tranb*wei(k);
340         end
341         yy(j)=Tranac;
342         yysus(j)=Transusac;
343         yya(j) = Tranac_a;
344         yyb(j)= Tranac_b;
345     end
346     clear y
347     y=yy./yysus;
348     simredqe=y;
349     y_a= yya./yysus;
350     y_b= yyb./yysus;
351
352 hold on
353 plot(ddd,y,'red','DisplayName','Con QE','Color','red');
354 hold on

```

```

355 plot(ddd,y_a,'+', 'DisplayName','Error rojo (+)', 'Color','black');
356 hold on
357 plot(ddd,y_b,'--', 'DisplayName','Error rojo (-)', 'Color','black');
358 hold on
359 %plot(t_mat,T0./T_s,'DisplayName','Sin QE', 'Color','m');
360 hold on
361 errorbar(Xdata, Yrdata, Err_Yrdata, Err_Yrdata, Err_Xdata, Err_Xdata, 'ored');
362 set(gca,'FontSize',20)
363 legend boxon
364 legend('datos rojo','Con QE','Error rojo (+)','Error rojo (-)')
365 legend('Location','northeast')
366
367
368 red channel fit with QE
369 Xdata= [70.35,26.42,15.88,21.92,108.2,100.3,81.73,78.40,
370 98.79,49.07,26.42,47.70,182.7,232.0,45.50,42.99];
371 Yrdata= [0.6246,0.6512,0.7897,0.8318,0.4986,0.4837,0.5245,
372 0.5378,0.59,0.6166,0.7161,0.6870,0.4763,0.4277,0.7448,0.7547];
373
374 n0=[1 0];
375 %lamb=575:25:700; % I divide the sensor spectrum in 5 bins assuming
376 % the contributions of other wavelengths with lower than 50% do
377 % not add much
378 %wei=[0.4 0.65 0.55 0.45 0.4 0.35];
379 lamb=l_red;
380 wei=qe_red./100;
381 wei=wei./sum(wei);
382
383 n2=[1.4235 0];
384
385 fred2=@(a,c,x) fitqefeps3(x,a,n2(1),c,n2(2),n0,lamb,wei);
386
387 fr2=fit(Xdata',Yrdata',fred2,'StartPoint',[1, 0],'Lower',[0,0],'
388 'Upper',[3.5,0.5])
389 cc2=coeffvalues(fr2);
390
391 TTf2=fitqefeps3(ddd,cc2(1),n2(1),cc2(2),n2(2),n0,lamb,wei);
392 ttfred2=TTf2;
393 figure
394 scatter(Xdata,Yrdata,'filled','red')

```

```
394 hold on
395 plot(ddd,TTf2,'red')
396 hold on
397 errorbar(Xdata, Yrdata, Err_Yrdata,Err_Yrdata,Err_Xdata,Err_Xdata,
398 'ored');
399 xlabel('Espesor (nm)')
400 ylabel('TR (u.a.)')
401 set(gca,'FontSize',20)
402 figure
403 TTerror2=Yrdata-fitqefeps3(Xdata,cc2(1),n2(1),cc2(2),n2(2),n0,lamb,
404 wei);
405 hold on
406 scatter(Xdata,TTerror2,'filled')
407 Resumen de resultados
408 f2b
409 f2g
410 fr2
411 figure
412 scatter(Xdata,Ybdata,'blue','filled');
413 hold on
414 scatter(Xdata,Ygdata,'green','filled');
415 scatter(Xdata,Yrdata,'red','filled');
416 set(gca,'FontSize',24)
417 xlabel('Thickness (nm)')
418 ylabel('Relative transmittance')
419
420 plot(ddd,ttfblue2,'blue');
421 plot(ddd,ttfgreen2,'green')
422 plot(ddd,ttfred2,'red')
423
424 figure
425 scatter(Xdata,Ybdata,'blue','filled');
426 hold on
427 scatter(Xdata,Ygdata,'green','filled');
428 scatter(Xdata,Yrdata,'red','filled');
429 set(gca,'FontSize',24)
430 xlabel('Thickness (nm)')
431 ylabel('Relative transmittance')
432 plot(ddd,simblueqe,'blue');
433 plot(ddd,simgreenqe,'green')
434 plot(ddd,simredqe,'red')
```