

Anexo A. Color y Transformaciones

A.1. Color

El color es el resultado de estimular los receptores ubicados en la retina del ojo humano con radiación electromagnética correspondiente a la región visible del espectro, mejor conocida como luz, la cual tiene longitudes de onda de 400 a 700 nm, provocando el fenómeno de visión y percepción del color [28].

De acuerdo a la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*, Comisión Internacional de Iluminación) [32] el color es un atributo de la percepción visual que consiste en cualquier combinación de contenido cromático y acromático; y que puede ser descrito por nombres cromáticos (rojo, amarillo, naranja, azul, rosa, etc.) o nombres de colores acromáticos (blanco, gris, negro, etc.) y calificarse (brillante, oscuro, tenue, claro, etc.), o por combinaciones de estos nombres.¹

¹ El color percibido depende de la distribución espectral del estímulo de color, del tamaño, forma, estructura y los alrededores del área del estímulo, del estado de adaptación del sistema visual del observador y la experiencia de éste en situaciones previas o similares de observación [32].

Para poder utilizar el color como indicador visual en el procesamiento digital de imágenes es necesario poder representarlo y expresarlo formalmente, por lo cual se han creado diferentes modelos o sistemas de especificación del color.

A.2. Espacios de color

Un espacio de color es una representación matemática de un conjunto de colores, la cual facilita su creación, manipulación, especificación y visualización, mediante un sistema de coordenadas o parámetros que describen alguna característica del color.

A.2.1. RGB

RGB (*Red, Green and Blue*; rojo, verde y azul) es un modelo de color aditivo² (fig. A.1a) basado en la teoría tricromática del color.³ Sus colores primarios son el rojo, verde y azul, los cuales al mezclarse en diferentes proporciones generan otros colores. Es el espacio de color más usado en procesamiento de imágenes, gráficos de computadora y sistemas multimedia.

Es un sistema coordenado cartesiano [12], usualmente representado gráficamente como un cubo de color RGB (fig. A.1b), donde los vértices del cubo son los colores primarios (rojo, verde y azul) y secundarios (cyan, magenta y amarillo), en el origen se sitúa el negro, y en el vértice más alejado a éste, el blanco. En la línea diagonal que une a estos dos puntos, se extiende la escala de grises. Los colores son puntos dentro del cubo, definidos por vectores desde el origen. La longitud de estos vectores está determinada por los valores máximos que

² Los sistemas de color aditivos producen color sobre un fondo oscuro a través de la combinación de diferentes luces de colores, conocidos como primarios [32].

³ La visión de color tricromática es la habilidad de los humanos y algunos animales de ver diferentes colores mediante la interacción de tres tipos de células sensibles al color llamadas conos. Cada una de ellas contiene un pigmento fotosensible, especialmente susceptible a una determinada longitud de onda de la luz [32].

maneja la imagen, pero por conveniencia generalmente se normalizan o se expresan como porcentaje [13].

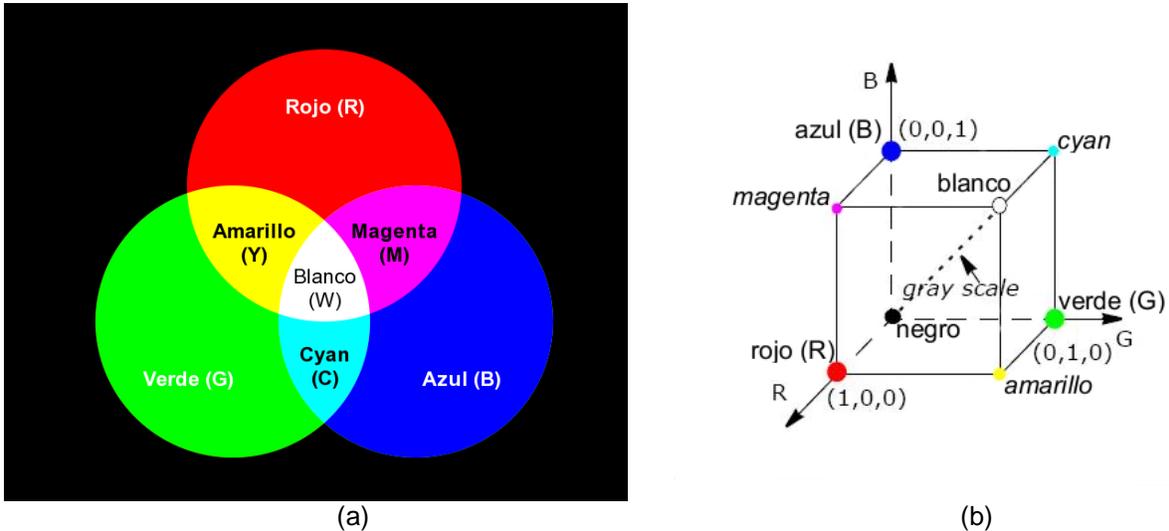


Fig. A.1. (a) Mezcla aditiva de los colores primarios RGB, (b) Representación del sistema RGB. Imagen tomada de [17].

Frecuentemente se utiliza el término *imagen RGB*, que puede expresarse como

$$I_{RGB} = (R, G, B) \tag{A.1}$$

para referirse a un arreglo de píxeles de color de tamaño $m \times n \times 3$ que define los componentes rojo (R), verde (V) y azul (B) para cada píxel individual (fig. A.2). El color de cada píxel está determinado por las intensidades rojas, verdes y azules almacenadas en cada plano de color en la posición del píxel [13].

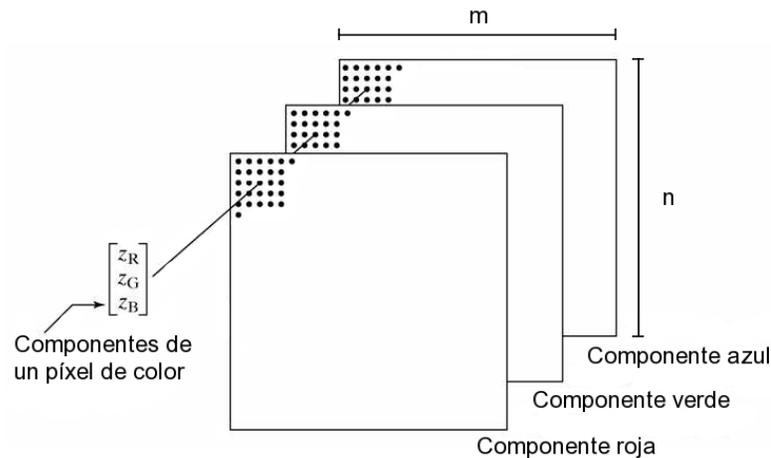


Fig. A.2. Esquema imagen RGB. Imagen tomada de [13].

I_{RGB} puede ser vista como una pila de tres imágenes en niveles de gris cada una asignada a un canal de color. Por lo tanto extendiendo esta idea, se puede pensar en una fusión de imágenes designando cada canal de color a diferentes (máximo tres) tipos de información [33].

A.2.2. Modelos HSI

Existen otros espacios cuyos parámetros están basados en la interpretación humana del color. Atributos como el matiz (H, del inglés *hue*)⁴, saturación (S), luminosidad (L), valor (V) o brillo (Br) son utilizados cuando se describe un color. Aún así, esta familia de modelos denominada genéricamente HSI (*Hue, Saturation and Intensity*; matiz, saturación e intensidad), es una derivación mediante transformaciones de coordenadas del espacio de color RGB [4, 28].

Ejemplos de los espacios más utilizados o mencionados en la bibliografía pertenecientes a esta familia pueden encontrarse en la tabla A.1. Esta variedad de nombres⁵ ha provocado que en repetidas ocasiones se usen indistintamente dificultando asociarlos con una descripción única. Aún así nos centraremos en los modelos HSV y HSL, no sólo por ser de los más utilizados, también porque son de los más consistentes en cuanto a sus especificaciones.

Tabla A.1. Familia de modelos HSI

Nombre modelo	Significado
HSB	<i>Hue, Saturation and Brightness</i> ; matiz, saturación y brillo.
HSI	<i>Hue, Saturation and Intensity</i> ; matiz, saturación y intensidad.
HSL / HLS	<i>Hue, Saturation and Lightness</i> ; matiz, saturación y luminosidad.
HSV	<i>Hue, Saturation and Value</i> ; matiz, saturación y valor.

⁴ El término *hue* también puede ser traducido como tono.

⁵ Que el término usado para la intensidad o el orden de los componentes varíe, se debe a que los nombres de los modelos fueron dados en diferentes momentos por distintas personas [20].

Una de las principales características de los modelos HSI es que separan la información de color de una imagen de su información de intensidad. La información de color está representada por los valores de H y S, mientras que la intensidad (I), que describe el brillo de la imagen, está determinada por la cantidad de luz [4]. Otras características que comparten son:

Tabla A.2. Característica de los modelos HSI

-
- 1) Son espacios de coordenadas cilíndricas (fig. A.3), donde:
 - H es el ángulo alrededor del eje vertical. Comienza con el rojo (0°), sigue el amarillo (60°), verde (120°), cyan (180°), azul (240°), magenta (300°) y finaliza nuevamente con el rojo (360°).
 - S es la distancia radial medida desde el eje vertical. Entre mayor la distancia, más saturado el color.
 - El eje vertical representa I y describe los niveles de gris. Su valor mínimo (parte inferior) es el negro mientras que en su valor máximo (parte superior) se encuentra el blanco [4, 28].
 - 2) En la transformación de RGB a HSI en los puntos correspondientes a $R = G = B$ en el cubo de color RGB, colores acromáticos o grises, $S = 0$ y por lo tanto H no está definido; además en estos puntos, el valor de I está dado por el valor común de R, G y B.
 - 3) Geométricamente equivale a colocar el cubo de color sobre su vértice negro con el vértice blanco justo hacia arriba, la línea que une a estos dos puntos corresponde a I^6 . Para determinar el componente I de cualquier punto de color, se debe pasar un plano perpendicular al eje I que lo contenga, la intersección es un punto I dentro del rango $[0,1]^7$.
 - 4) Los puntos R, G y B que son asignados a un valor común de I forman superficies de intensidad constante, que en el proceso de transformación del cubo RGB a un volumen HSI, cada una es proyectada a un plano perpendicular al eje I, intersectándolo en el origen. La proyección de estas superficies sobre el plano define una forma (triángulo, hexágono, etc), que depende de la función de I escogida y de sus valores específicos⁸.
-

⁶No significa que alguna geometría del espacio HSI se ajuste exactamente a la forma del cubo. Por lo que para representar el color en ambos espacios, los valores de S deben ser distorsionados en el proceso de conversión.

⁷ En el caso que el espacio esté normalizado, también puede referirse en términos de porcentaje (0 – 100%). Lo mismo aplica para S [12].

⁸ Para mayores detalles consultar [20]

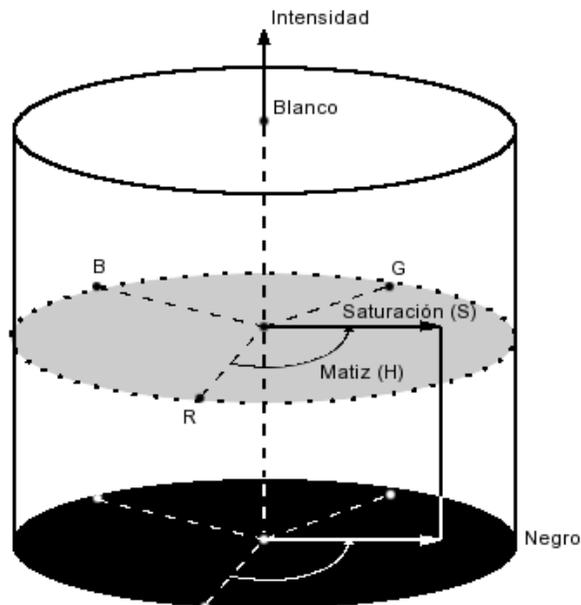


Fig. A.3. Representación general de los modelos HSI. Imagen tomada de [4].

El factor dominante en la selección de un modelo en particular de la familia HSI es la definición de I , ya que éste determina las superficies de intensidad constante y por lo tanto la forma del sólido de color que representa al modelo.

Al igual que en el caso de I_{RGB} , se puede hablar de imágenes HSV o HSL, para referirse a un arreglo de píxeles de color de tamaño $m \times n \times 3$ que define los componentes de matiz, saturación y valor o luminosidad para cada píxel individual

$$I_{HSV} = (H, S, V) \tag{A.2}$$

$$I_{HSL} = (H, S, L). \tag{A.3}$$

A.2.2.1. HSV

Es un sistema de coordenadas cilíndrico generalmente representado en forma de cono o pirámide hexagonal (fig. A.4a). S describe la cantidad de luz blanca que es agregada a un color (H). Entre menos luz blanca tenga el color, más saturado se encuentra éste. Podemos ver que los colores puros, aquellos con la máxima saturación y valor, se encuentran en la parte superior

exterior del modelo y conforme se acerca al eje vertical, manteniendo V constante, S decrece hasta obtener el blanco ($S = 0$); cuando S tiene este valor, H no está definido.

Si V disminuye, y el valor de S es diferente de cero, es como incorporar negro a un color por lo que éste se oscurece; en caso contrario ($S = 0$), se obtienen grises hasta alcanzar el negro ($V = 0$), en este punto tanto H como S no están definidos [10].

A.2.2.2. HSL

Comúnmente este modelo es representado como un doble cono o una pirámide hexagonal (fig. A.4b). En la parte superior del modelo (L tienen su valor máximo) se encuentra el blanco, en la parte inferior (valor mínimo de L) está el negro, en estos dos puntos el valor de H y S no están definidos. Al igual que en el modelo anterior la saturación equivale a la distancia radial, y cuando es igual a cero se obtienen los grises, sólo que en este caso la máxima saturación ($S = 1$) de un color ocurre cuando L está a la mitad de su valor [10].

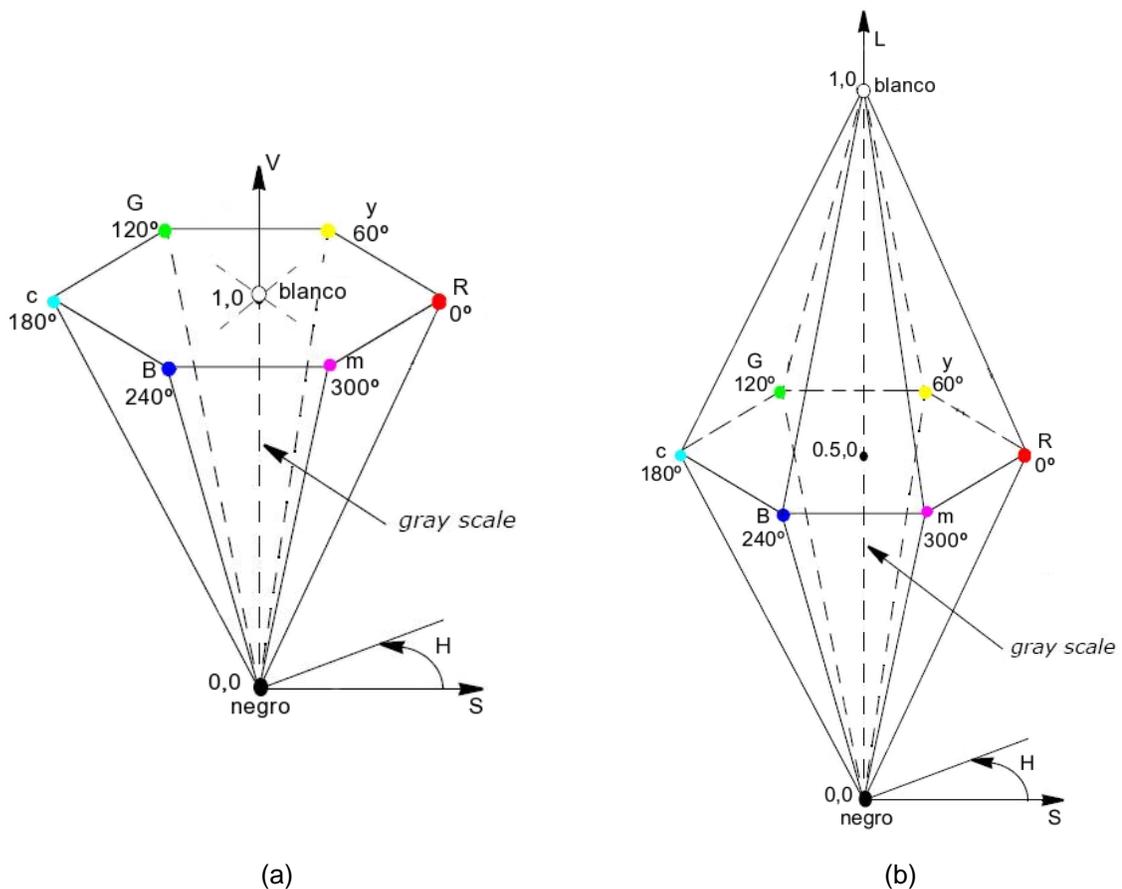


Fig. A.4. (a) Modelo HSV; (b) Modelo HSL. Imágenes tomadas de [17]

A.3. Transformaciones

A.3.1. RGB – HSV

La conversión de RGB a HSV está dada por las siguientes expresiones⁹:

$$M = \max (R, G, B) \quad (\text{A.4})$$

$$m = \min (R, G, B) \quad (\text{A.5})$$

$$V = M \quad (\text{A.6})$$

$$S = \begin{cases} 0 & , \text{ si } M = 0 \\ \frac{M - m}{M} & \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

$$H' = \begin{cases} \frac{G - B}{M - m} & , \text{ si } M = R \\ 2 + \frac{B - R}{M - m} & , \text{ si } M = G \\ 4 + \frac{R - G}{M - m} & , \text{ si } M = B \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

$$H = \begin{cases} \text{no definido,} & \text{ si } S = 0 \\ 60H' + 360 & , \text{ si } H' < 0 \\ 60H' & \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

⁹ Para más información sobre éstas y las siguientes conversiones ver [10, 28]

A.3.2. HSV – RGB

$$i = \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor \quad (\text{A.10})$$

$$f = \frac{H}{60} - i \quad (\text{A.11})$$

$$p = V (1 - S) \quad (\text{A.12})$$

$$q = V \left[1 - (S \cdot f) \right] \quad (\text{A.13})$$

$$t = V \left[1 - (S (1 - f)) \right] \quad (\text{A.14})$$

$$(R,G,B) = \begin{cases} (V,V,V), & \text{si H no está definido} \\ (V,t,p), & \text{si } i = 0 \\ (q,V,p), & \text{si } i = 1 \\ (p,V,t), & \text{si } i = 2 \\ (p,q,V), & \text{si } i = 3 \\ (t,p,V), & \text{si } i = 4 \\ (V,p,q), & \text{si } i = 5 \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

A.3.3. RGB – HSL

$$L = \frac{M+m}{2} \quad (\text{A.16})$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{si } M = m \\ \frac{M-m}{M+m}, & \text{si } L \leq 0.5 \\ \frac{M-m}{2-(M+m)}, & \text{si } L > 0.5 \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

$$H' = \begin{cases} \frac{G-B}{M-m}, & \text{si } M=R \\ 2 + \frac{B-R}{M-m}, & \text{si } M=G \\ 4 + \frac{R-g}{M-m}, & \text{si } M=B \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

$$H = \begin{cases} \text{no definido}, & \text{si } S=0 \\ 60H' + 360, & \text{si } H' < 0 \\ 60H' & \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

A.3.4. HSL – RGB

$$i = \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor \quad (\text{A.20})$$

$$f = \frac{H}{60} - i \quad (\text{A.21})$$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } L \leq 0.5 & \text{Si } L > 0.5 \\ \max = L (1+S) & \max = L (1+S) + S \end{array} \quad (\text{A.22})$$

$$\text{mid}_1 = L (2fS - 1 - S) \quad \text{mid}_1 = 2 \left[S (1-f) - \max (0.5-f) \right] \quad (\text{A.23})$$

$$\text{mid}_2 = L \left[2S (1-f) + 1 - S \right] \quad \text{mid}_2 = 2 \left[fL - \max (f-0.5) \right] \quad (\text{A.24})$$

$$\begin{array}{ll} \min = L (1-S) & \min = L (1+S) - S \end{array} \quad (\text{A.25})$$

$$(R,G,B) = \begin{cases} (L,L,L), & \text{si } S = 0 \\ (\max, mid_1, \min), & \text{si } i = 0 \\ (mid_2, \max, \min), & \text{si } i = 1 \\ (\min, \max, mid_1), & \text{si } i = 2 \\ (\min, mid_2, \max), & \text{si } i = 3 \\ (mid_1, \min, \max), & \text{si } i = 4 \\ (\max, \min, mid_2), & \text{si } i = 5 \end{cases} \quad (\text{A.26})$$

Las transformaciones de RGB a HSV y viceversa, se encuentran implementadas en MATLAB en las funciones *rgb2hsv* y *hsv2rgb* respectivamente [24].

Anexo B. Métodos de Registro

De acuerdo a Maintz [21] los métodos de registro de imágenes médicas pueden clasificarse por medio de nueve criterios principales:

Tabla B.1. Clasificación métodos de registro imágenes médicas

Criterio	Descripción
1) Dimensionalidad	Cuántas dimensiones espaciales tienen las imágenes (2D, 3D), y si el tiempo también es una de ellas.
2) Naturaleza de la base de registro	Elementos que sirven de apoyo al registro (marcas fiduciaras o "hitos"): <ul style="list-style-type: none">• Extrínseco: marcas ajenas al paciente introducidas en el espacio de la imagen.• Intrínseco: la información de referencia es generada por el propio paciente.• Registro no basado en las imágenes: Es posible, si los sistemas de coordenadas de los escáneres involucrados se encuentran calibrados uno al otro.
3) Naturaleza de la transformación	<ul style="list-style-type: none">• Rígida: solo están permitidas las rotaciones y traslaciones.• Afín: mapea líneas paralelas sobre líneas paralelas.• Proyectiva: mapea líneas sobre líneas.• Elástica: mapea líneas sobre curvas y es "no lineal".
4) Dominio de la transformación	<ul style="list-style-type: none">• Global: la transformación se aplica a la imagen completa• Local: cada sección de la imagen tienen su propia transformación definida, pero los bordes entre secciones deben coincidir (criterio de continuidad).
5) Interacción	Tres niveles de interacción pueden presentarse:

- Automático: el usuario sólo proporciona las imágenes y datos de adquisición.
 - Interactivo: el usuario hace el registro, asistido por software que le proporciona una impresión visual o numérica del estado actual de la transformación.
 - Semiautomático: el usuario puede participar inicializando el algoritmo o dirigiéndolo.
- 6) Procedimiento de optimización Los parámetros que componen la transformación de registro pueden ser calculados directamente de los datos que se tienen disponibles, o mediante métodos de optimización.
- 7) Modalidades involucradas
- Monomodalidad: las imágenes a registrar pertenecen a la misma modalidad
 - Multimodalidad: las imágenes provienen de diferentes modalidades.
 - Modalidad a modelo: Solo una imagen está involucrada, mientras que la otra “modalidad” es un modelo matemático o computacional, ya sea anatómico o fisiológico.
- 8) Sujeto
- Intrasujeto: todas las imágenes a utilizar fueron adquiridas del mismo paciente
 - Intersujeto: se utilizan imágenes de pacientes distintos o también puede usarse un modelo
 - Atlas: una imagen pertenece a un solo paciente mientras la otra está construida de información de una base de datos obtenida utilizando imágenes de varios pacientes, a manera de un “promedio”, o modelo representativo.
- 9) Objeto De acuerdo a la parte del cuerpo de donde es adquirida la imagen (p. ej. de la cabeza se pueden obtener imágenes del cerebro, ojos, dientes, etc.).
-

Anexo C. Proceso de Registro con SPM

SPM es un software orientado al análisis estadístico de imágenes cerebrales, el cual es efectuado en tres etapas principales: procesamiento espacial, estimación de los parámetros de un modelo estadístico y realización de inferencias sobre los parámetros. Dentro de la etapa de procesamiento espacial se llevan a cabo los procesos de realineación, registro, normalización y segmentación.

En esta pequeña guía nos centraremos en el proceso de registro de dos imágenes del mismo paciente pero de diferentes modalidades. Es este el proceso que tuvimos que aplicar antes de realizar la fusión de ambas imágenes.

C.1. Inicio SPM

- 1) Iniciar MATLAB¹
- 2) Escribir en la ventana de comandos (*command window*):

```
>> spm
```

aparecerá la ventana de inicio de SPM

¹ Para instalar y usar el software SPM es necesario tener instalado Matlab en el equipo

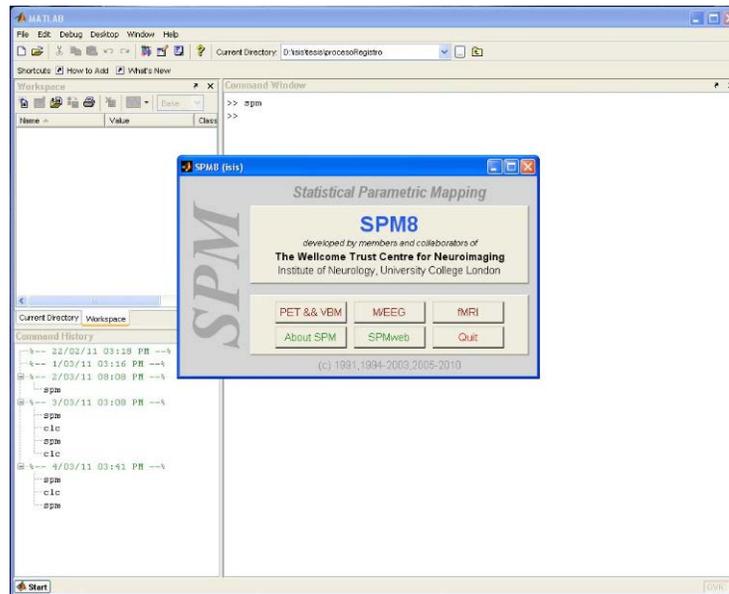


Fig. C.1. Ventana de inicio de SPM8

3) Seleccionar la opción de fMRI (o según el tipo de I_F). Aparecerá la interfaz estándar de SPM

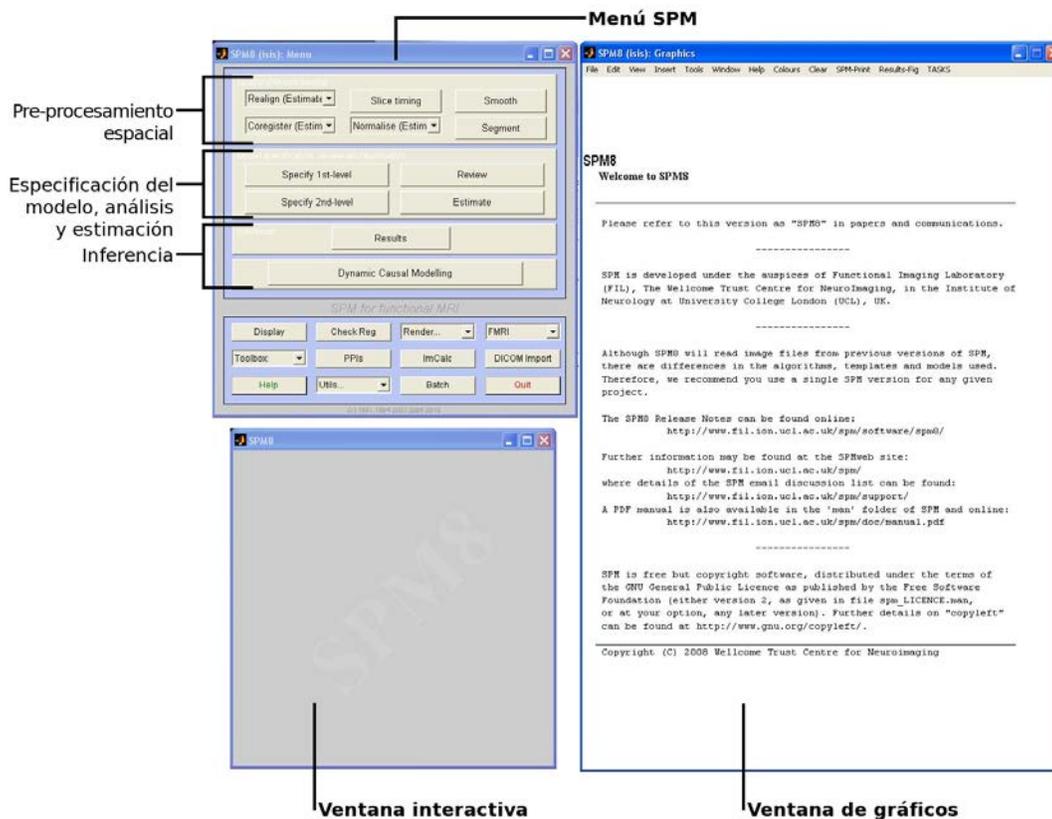


Fig. C.2. Ventanas que componen la interfaz gráfica de SPM y etapas del análisis de SPM

C.2. Realineación

En caso de contar con series temporales de imágenes funcionales del mismo sujeto, éstas deben realinearse para eliminar los artefactos debidos al movimiento del paciente durante el estudio. Si las imágenes² se encuentran realineadas, pasar a la etapa de registro (11).

- 4) Seleccionar en el menú SPM *Realign (Estimate & Reslice)*.

Aparecerá la siguiente ventana

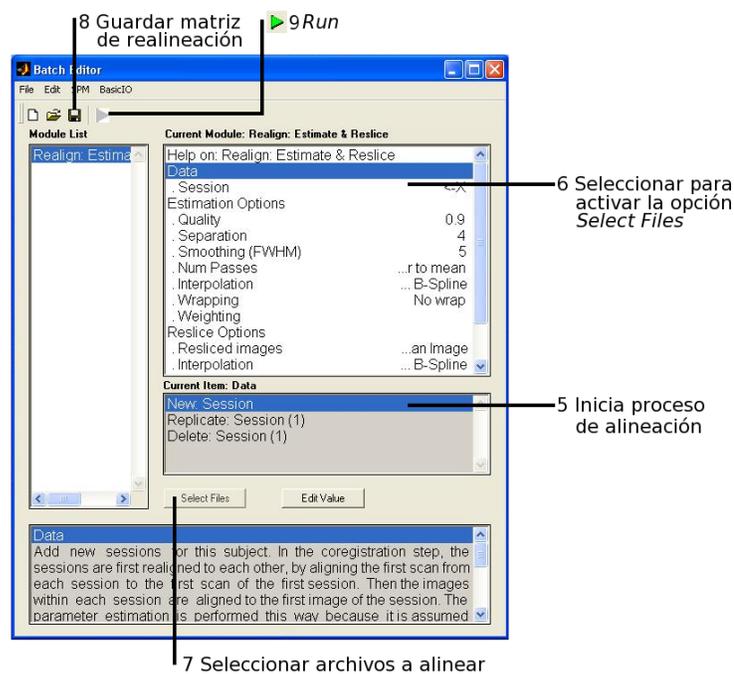


Fig. C.3. Alineación de imágenes

² SPM8 sólo trabaja con imágenes que tengan el formato NIfTI-1. SPM8 cuenta con una aplicación para convertir de formato DICOM al NIfTI-1, la se encuentra en la parte inferior del menú SPM (DICOM import). Seleccionar, elegir los archivos a convertir y por último indicar la carpeta donde se guardarán las nuevas imágenes

10) Cerrar la ventana y esperar que el proceso termine.

Mientras tanto en la ventana interactiva se mostrará el progreso de la realineación, mientras que en la ventana de gráficos, al finalizar se mostrarán las estimaciones de las traslaciones y rotaciones llevadas a cabo.

En el directorio dónde se encuentran las imágenes funcionales, se colocarán las imágenes realineadas, que podrán reconocerse por contar con el prefijo “r”, y una imagen promediada, que a su vez tendrá el prefijo “mean”, que es la que se utilizará en el registro.

Una vez con las imágenes alineadas se realizará el registro.

C.3. Registro

11) Elegir *coregister (estimate & reslice)* del menú SPM. Esta utilería es usada para registrar diferentes tipos de imágenes de mismo sujeto.

12) Se debe especificar una imagen de referencia y una imagen fuente, la cual se va a mover para que coincida con el destino (imagen de referencia).

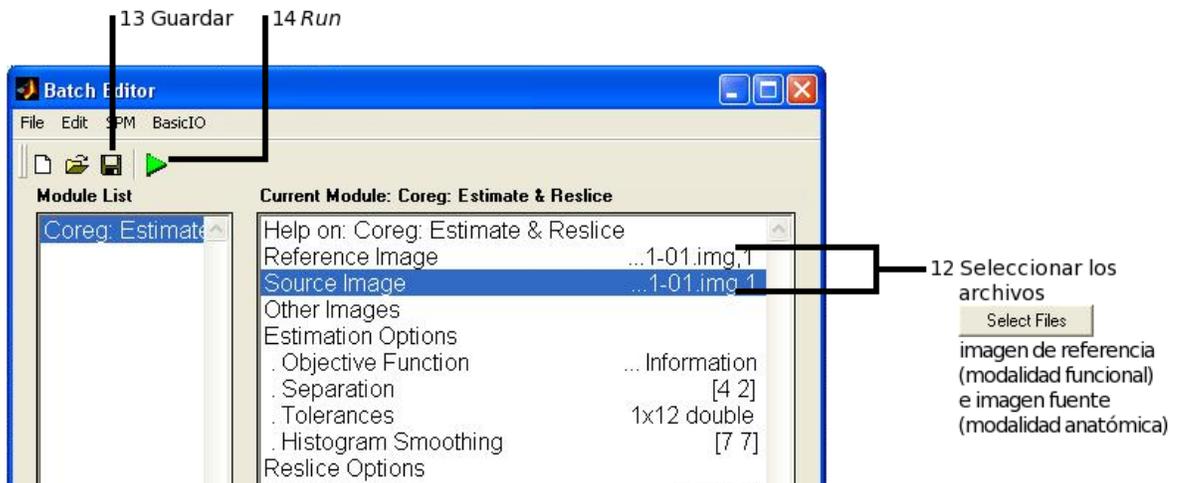


Fig. C.4.Registro de imágenes

- 15) Cerrar ventana.
- 16) Al finalizar se obtendrá una nueva imagen anatómica con las mismas dimensiones y coordenadas que la imagen funcional (la cual también tendrá el prefijo "r").
- 17) Ambas imágenes podrán observarse en la ventana de gráficos al terminar el proceso de registro.

Otro software recomendado para la alineación de imágenes cerebrales es FSL, una paquetería que contiene herramientas para el análisis de imágenes cerebrales, desarrollado por el *FMRIB Analysis Group*, perteneciente a la Universidad de Oxford.

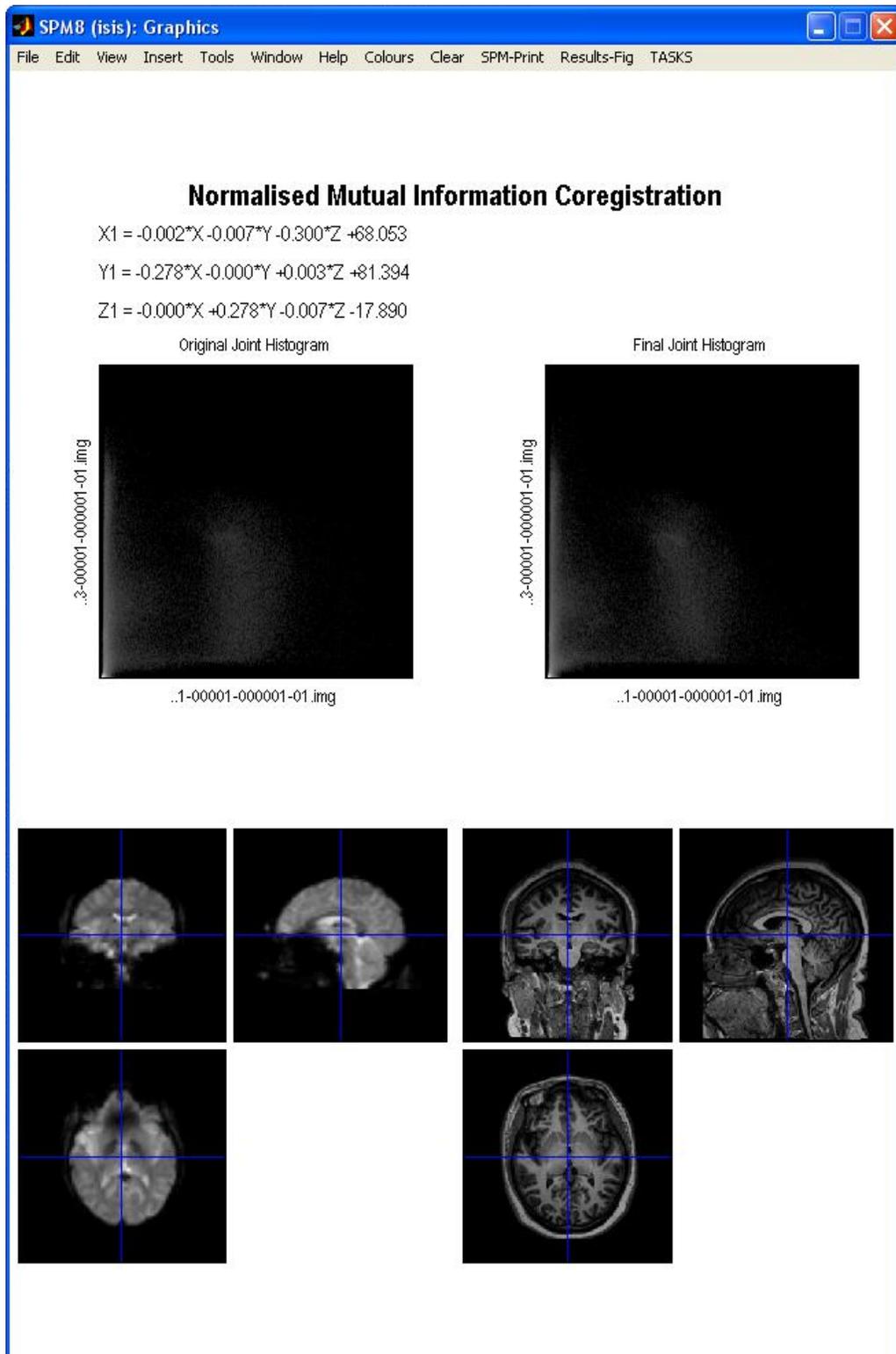


Fig. C.5. Imágenes registradas mostradas en la ventana de gráficos