

Espacio no perceptual de color esférico RTP: Aplicación en discriminación de imágenes generadas por computador

Jean Pierre Díaz Paz, Humberto Loaiza Correa

Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Cali,
Colombia

{jean.diaz, humberto.loaiza}@correounivalle.edu.co

Resumen. Este artículo presenta un espacio de color no perceptual basado en coordenadas esféricas llamado *RTP* por las siglas de *Rho*, *Theta* y *Phi*. De manera similar al conocido espacio *HSV*, *RTP* desacopla la información de cromaticidad (θ, φ) e intensidad (ρ), pero representa los tonos rojizos de manera continua. Para evaluar las potencialidades del espacio propuesto, se abordó el problema de discriminación entre imágenes reales y generadas por computador, donde se obtuvo una precisión promedio en la identificación de 84.55%. El desempeño alcanzado supera los obtenidos con los espacios *RGB*, *HSI* y *HSV*, mostrando diferencias estadísticamente significativas. El espacio *RTP* puede usarse en otras aplicaciones donde el desacople de los componentes cromáticos juegan un papel principal en la discriminación de los objetos contenidos en las imágenes.

Palabras clave. Espacio de color, gráficos computacionales, procesamiento de imágenes.

Spherical Non-Perceptual Color Space RTP: Identifying Computer Graphics

Abstract. This paper presents a non-perceptual color space based on spherical coordinates that is called *RTP* after *Rho*, *Theta* and *Phi*. Like *HSV* space color, *RTP* decouples the information associated to chrominance (θ, φ) and intensity (ρ), however *RTP* keeps together the reddish colors. To show the potentials of our color space, we approach the problem of identifying either an image is a computer graphic or a photorealistic image. We got an average accuracy of 84.55% detecting computer graphics and outperforming the ones from *RGB*, *HSV* and *HSI* color spaces with statistically significant differences on classification average accuracy. *RTP* color space can be used in other issues where chrominance decoupling improves the discriminant capability.

Keywords. Color space, computer graphics, image processing.

1. Introducción

El color es una característica de bajo nivel que brinda información relevante en diversas aplicaciones en visión por computador [1]. El color de un objeto puede representarse mediante la distribución espectral de potencia en un amplio rango de longitudes de onda, sin embargo esta representación no guarda correspondencia con la forma en que los conos de la retina humana captan la luz en solo tres bandas espectrales (Rojo: $\sim 600nm$, Verde: $\sim 550nm$ y Azul: $\sim 460nm$) [2]. Debido a esto, se han propuesto diversos espacios de color [3], usualmente de tres dimensiones [4], que representan la reacción humana ante los estímulos en las tres longitudes de onda mencionadas[5]. Así, la información contenida en las imágenes de color se relaciona directamente con la escena y se codifica de acuerdo con el espacio de color utilizado. Los espacios de color *HSV* y *HSI* son ampliamente usados por su capacidad de desacople en la información de cromaticidad e intensidad, sin embargo, debido a su geometría, los colores rojizos se separan y existen indeterminaciones en las componentes de cromaticidad asociadas a los tonos de gris. Con miras a disminuir estos inconvenientes, se propone un espacio no-perceptual basado en coordenadas esféricas que desacopla la cromaticidad de la intensidad sin desagrupar los colores correspondientes a las distintas tonalidades de rojo y permitiendo también

encontrar distancias entre colores usando aproximaciones euclidianas.

Para validar el potencial del espacio propuesto, se aborda el problema de discriminación entre imágenes sintéticas realistas (*Computer Graphics - CG*) e imágenes naturales (*Photographic Images - PG*) [6, 7, 8, 9]. Este problema toma cada día mayor relevancia en el ámbito judicial debido a la falsificación y adulteración de evidencias con imágenes sintéticas que presentan mayor realismo.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: En la sección 2 se describen los principales espacios de color utilizados en procesamiento de imágenes. En la sección 3 se introduce el espacio de color *RTP*, junto con su geometría y las transformaciones $RGB \leftrightarrow RTP$. En la sección 4, se describe el problema de discriminación de imágenes sintéticas y reales, así como la metodología de evaluación del desempeño del espacio *RTP*. En la sección 5 se presenta el análisis de los resultados obtenidos. En la sección 6 se presentan las conclusiones sobre el espacio propuesto, donde se destaca la capacidad de desacople de la cromaticidad e intensidad respecto a los espacios de color *HSI*, *HSV*, *RGB*; y la capacidad de discriminación en el problema de diferenciación entre imágenes reales y sintéticas. Posteriormente, se muestran los agradecimientos a las personas e instituciones involucradas en el desarrollo de este trabajo. Finalmente, se listan las fuentes bibliográficas sobre las que se basó este trabajo.

2. Espacios de color

Los espacios de color, usualmente de tres dimensiones [4], permiten representar matemáticamente la reacción humana ante los estímulos de luz en las longitudes de onda correspondientes a los colores primarios Rojo, Verde y Azul [2]. Los espacios de color pueden clasificarse en perceptuales y no-perceptuales [1]. Los espacios *Perceptuales* buscan modelar los cambios de cromaticidad e intensidad percibidos por el sistema visual humano, para detectar las diferencias de la percepción del color mediante métricas.

Se destacan los espacios *CIELAB*, *CIELUV* y *RLAB* en los cuales la distancia euclidiana entre dos colores es proporcional a la diferencia percibida entre dichos colores [10]. Los espacios *No-Perceptuales* no conservan uniformemente los cambios de cromaticidad ni intensidad de la percepción humana. Entre los espacios no-perceptuales se destacan los espacios *HSI*, *HSV*, *YIQ*, YC_bC_r y el espacio de colores oponentes $O_1O_2O_3$ [10]. Adicionalmente, en estudios anteriores se ha representado las componentes *H* y *S* de los espacios *HSI*, *HSV* como ángulos en sistemas de coordenadas esféricas cuyo eje polar es la línea de grises $R = G = B$ [11, 12].

Los espacios perceptuales presentan ventajas respecto a los no-perceptuales debido a la relación directa de sus métricas con la percepción humana, sin embargo su adopción ha resultado lenta debido a su complejidad computacional y al requerimiento de calibración de los equipos involucrados [1]. Aspectos que hacen de los espacios no-perceptuales una alternativa conveniente para al procesamiento de imágenes, pues sus métricas resultan de fácil obtención a partir de los datos capturados por los sensores y para la mayoría de aplicaciones, no es necesario que correspondan fielmente a la percepción humana.

A continuación, para efectos de ilustración y comparación con el espacio propuesto, se describen tres espacios no-perceptuales de color de amplio uso.

2.1. Espacio RGB

El espacio RGB es un estándar que se usa en la mayoría de dispositivos de captura y visualización de imágenes. Se basa en la adición de los iluminantes primarios Rojo, Verde y Azul, generando una representación rectangular de tres dimensiones con origen en el negro y cuyos vectores generadores corresponden a los iluminantes primarios.

En este espacio, un color *C* es descrito por una terna de valores (C_R, C_G, C_B) que representan la intensidad asociada en cada una de las bandas mencionada, sin embargo, no es lineal con respecto a la percepción visual humana. La Fig. 1 ilustra los colores obtenidos por los planos $Red = 1$, $Green = 0$ y $Blue = 1$.

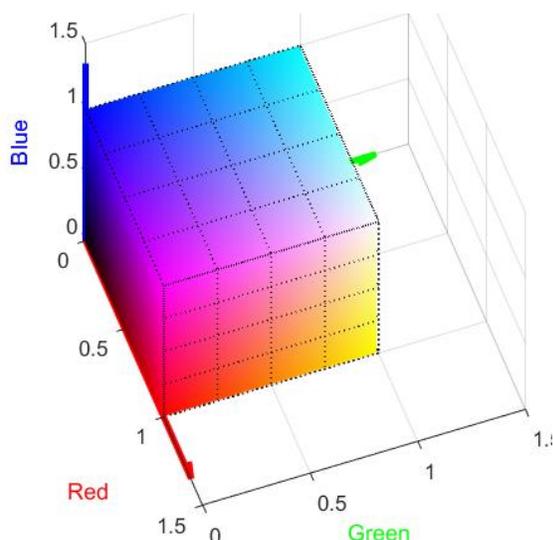


Fig. 1. Cubo de color en el espacio *RGB*. Las fronteras de este cubo son los colores pertenecientes a los planos *Red* = 0, *Green* = 0, *Blue* = 0, *Red* = 1, *Green* = 1 y *Blue* = 1

Los colores C_1 y C_2 que representan la misma cromaticidad con distinta intensidad se describen en el espacio *RGB* como: $C_1^{RGB} = (C_{R1}, C_{G1}, C_{B1})$ y $C_2^{RGB} = (k \cdot C_{R1}, k \cdot C_{G1}, k \cdot C_{B1})$ donde $k \neq 1$ es una constante real que permite cumplir que $0 < \{|C_1| |C_2|\} \leq 1$ [13, 14]. Puede observarse que la intensidad del color tiene efectos sobre las tres componentes del espacio *RGB*; presentando acoples en las tres componentes relacionados con la intensidad del color.

2.2. Espacios HSI y HSV

En este espacio, un color C es descrito mediante una terna de valores (C_H, C_S, C_I) . Inicialmente, se define C' como la intercepción entre el segmento de línea \overline{OC} , comprendido entre el origen O y el color C , y el plano $R + G + B = 1$.

Después, se define la componente C_H como el ángulo izquierdo medido sobre el plano $R + G + B = 1$ desde la línea *Grís - Rojo* hasta C' . La componente C_S , corresponde a la proporción de pureza de C' frente a su matiz predominante.

Finalmente, la componente C_I corresponde a la intensidad de C medida como la proyección de

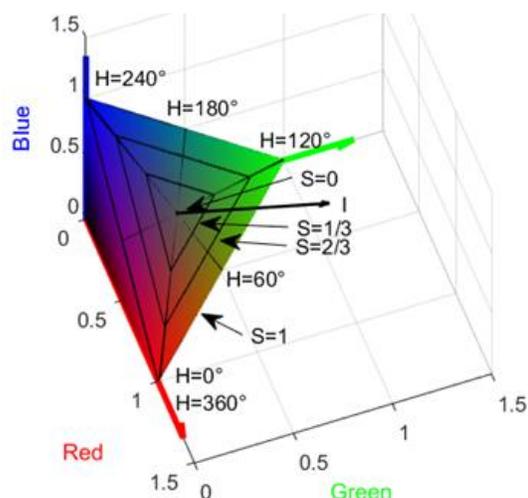


Fig. 2. Representación del espacio *HSI* en el sistema de coordenadas definido por el espacio *RGB*

C sobre la línea de grises. Las expresiones de transformación $RGB \rightarrow HSI$ son:

$$\begin{bmatrix} C_H \\ C_S \\ C_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(C_G - C_B)}{2C_R - C_G - C_B} \right) \\ 1 - \frac{C_R + C_G + C_B}{3} \\ \frac{C_R + C_G + C_B}{3} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

La Fig. 2 ilustra la relación de los componentes entre los espacios *HSI* y *RGB*.

Los espacios *HSI* y *HSV* tienen las mismas componentes de cromaticidad, y difieren en el valor de intensidad del color. La transformación $RGB \rightarrow HSV$ se define como:

$$\begin{bmatrix} C_H \\ C_S \\ C_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(C_G - C_B)}{2C_R - C_G - C_B} \right) \\ 1 - \frac{C_R + C_G + C_B}{\max(C_R, C_G, C_B)} \\ \frac{C_R + C_G + C_B}{3} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Dos colores que representan la misma cromaticidad con diferentes intensidades se

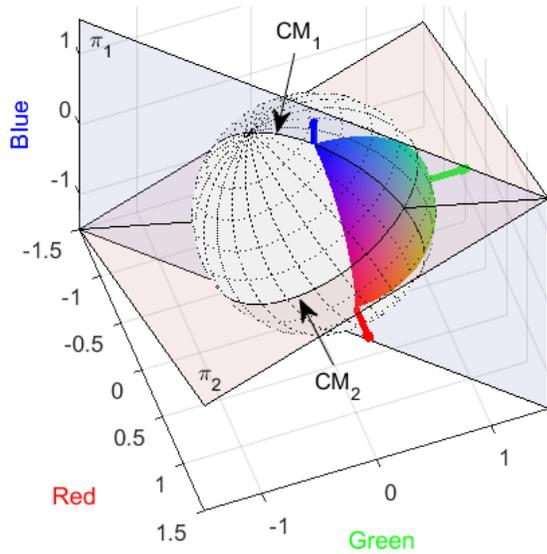


Fig. 3. Definición de la geometría del espacio *RTP* respecto al espacio *RGB*

representan en el espacio *RGB* como $C_1^{RGB} = (C_{R1}, C_{G1}, C_{B1})$ y $C_2^{RGB} = (k \cdot C_{R1}, k \cdot C_{G1}, k \cdot C_{B1})$. A partir de las transformaciones de la ecuación (1), se representan en el espacio *HSI* como $C_1^{HSI} = (C_{H1}, C_{S1}, C_{I1})$ y $C_2^{HSI} = (C_{H1}, C_{S1}, k \cdot C_{I1})$.

A partir de las transformaciones de la ecuación (2), se representan en el espacio *HSV* como $C_1^{HSV} = (C_{H1}, C_{S1}, C_{V1})$ y $C_2^{HSV} = (C_{H1}, C_{S1}, k \cdot C_{V1})$. Así, en los espacios de color *HSI* y *HSV*, las componentes (C_H, C_S) describen la cromaticidad de manera desacoplada a las componentes de intensidad C_I y C_V respectivamente.

En los espacios *HSV* y *HSI*, se presentan indeterminaciones en las componentes *H* asociadas a los tonos grises. Además, para el color negro, se indetermina también la componente *S*.

3. Espacio RTP

Tomando como base el espacio *RGB*, se define una esfera de radio unitario cuyo centro se ubica en el origen, que corresponde al color negro. Se define el plano π_1 que contiene los colores: negro (0,0,0), azul (0,0,1) y blanco (1,1,1).

También, se define el plano π_2 de manera que contenga la recta de grises ($R = G = B$) y sea

perpendicular a π_1 . Las intercepciones de los planos π_1 y π_2 con la esfera, definen los círculos máximos CM_1 y CM_2 respectivamente (ver Fig. 3).

Aunque la esfera mencionada contempla puntos en todos los octantes del espacio *RGB*, los colores solo están definidos para el octante en el cual $\{R, G, B\} \geq 0$.

Partiendo de la geometría descrita, se propone un espacio de color esférico llamado *RTP* (*Rho, Theta, Phi*) en el que un color C^{RTP} se representa como una terna de valores en un sistema de coordenadas esféricas $(C_\rho, C_\theta, C_\phi)$ con origen *O* en el color negro. Cada una de las componentes en el espacio *RTP* se describen a continuación:

- C_ρ es la norma de \overrightarrow{OC} . Para un color determinado, $0 \leq C_\rho \leq \sqrt{3}$.
- C_θ es el ángulo que forma \overrightarrow{OC} respecto al plano π_1 , considerando que la dirección positiva del ángulo va en sentido rojo a verde. Para un color determinado, $-\frac{\pi}{3.55} \leq C_\theta \leq \frac{\pi}{3.55}$.
- C_ϕ es el ángulo que forma \overrightarrow{OC} respecto al plano π_2 , considerando que la dirección positiva del ángulo va en sentido amarillo a azul. Para un color determinado, $-\frac{\pi}{5.11} \leq C_\phi \leq \frac{\pi}{3.3}$.

Las componentes angulares (C_θ, C_ϕ) corresponden a los arcos sobre la esfera unitaria medidos a partir de los círculos máximos CM_1 y CM_2 , como se muestra en la ecuación 3.

Dadas estas definiciones, la transformación de colores, $RGB \rightarrow RTP$ se define como:

$$\begin{bmatrix} C_\rho \\ C_\theta \\ C_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{C_R^2 + C_G^2 + C_B^2} \\ \tan^{-1} \left(-\frac{3(C_R - C_G)}{\sqrt{2(C_R + C_G + C_B)}} \right) \\ \tan^{-1} \left(\frac{-\frac{1}{6}(C_R + C_G) + \frac{\sqrt{2}}{3}C_B}{\sqrt{\frac{5}{6}(C_R^2 + C_G^2 + \frac{2}{5}C_B^2) + \frac{2}{3}(C_R C_B - \frac{C_R C_G}{2} + C_G C_B)}} \right) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

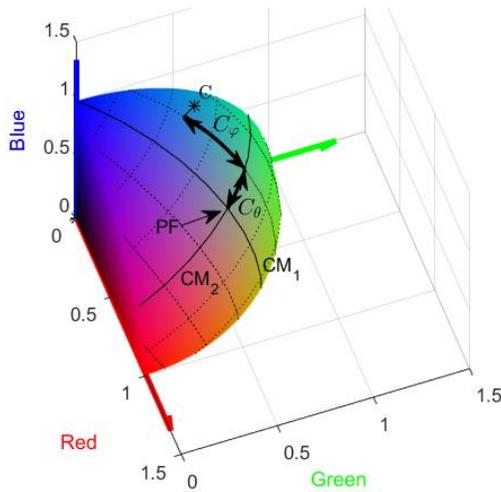


Fig. 5. Casquete de colores de intensidad unitaria con separación cada 15°. El punto fundamental **PF** tiene coordenadas esféricas (1, 0, 0). Un color arbitrario **C**, de coordenadas esféricas $(C_\rho, C_\theta, C_\phi)$ es proyectado sobre la esfera unitaria en las coordenadas $(1, C_\theta, C_\phi)$

donde, $(C_\rho, C_\theta, C_\phi)$ son las coordenadas en el espacio **RTP** de un color **C** con coordenadas (C_R, C_G, C_B) , en el espacio RGB.

La transformación inversa, $RTP \rightarrow RGB$ queda determinada por:

$$\begin{bmatrix} C_R \\ C_G \\ C_B \end{bmatrix} = C_\rho \begin{bmatrix} \frac{\cos C_\phi \cos C_\theta}{\sqrt{3}} - \frac{\cos C_\phi \sin C_\theta}{\sqrt{2}} - \frac{\sin C_\phi}{\sqrt{6}} \\ \frac{\cos C_\phi \cos C_\theta}{\sqrt{3}} + \frac{\cos C_\phi \sin C_\theta}{\sqrt{2}} - \frac{\sin C_\phi}{\sqrt{6}} \\ \frac{\cos C_\phi \cos C_\theta}{\sqrt{3}} - \sqrt{\frac{2}{3}} \sin C_\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dos colores con la misma cromaticidad pero con diferentes intensidades (afectado por k), se representan en el espacio **RTP**, usando la transformación $RGB \rightarrow RTP$ (ecuación (3)), como $C_1^{RTP} = (C_{\rho 1}, C_{\theta 1}, C_{\phi 1})$ y $C_2^{RTP} = (k \cdot C_{\rho 1}, C_{\theta 1}, C_{\phi 1})$. Se observa que en el espacio de color **RTP**, las componentes cromáticas (C_θ, C_ϕ) no se ven afectadas por k ; mientras que la componente de intensidad C_ρ se modifica en la misma proporción que la intensidad de cada componente en el

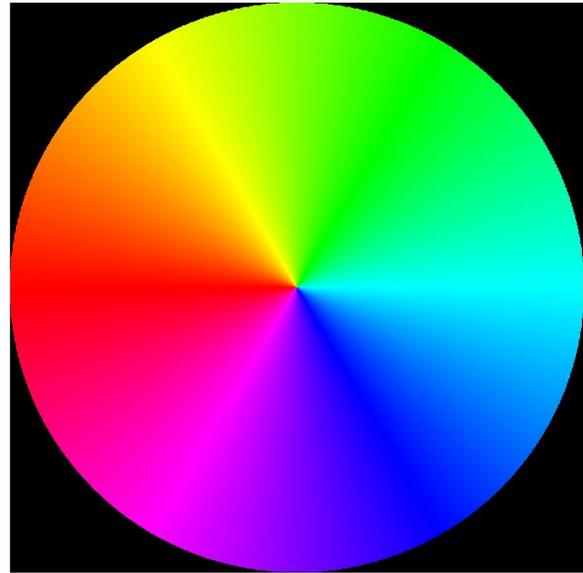


Fig. 4. Imagen sintética del círculo cromático

espacio **RGB**. Esto evidencia el desacople entre las componentes cromáticas (C_θ, C_ϕ) y la componente de intensidad C_ρ .

A partir de las ecuaciones de transformación, $RGB \rightarrow RTP$ y $RTP \rightarrow RGB$ (3) y (4), se deduce que:

- Las componentes (C_θ, C_ϕ) del espacio **RTP** se indeterminan para el color negro; sin embargo, este color queda completamente definido con la componente radial $C_\rho = 0$. En el espacio **RGB**, el negro es representado por la terna $(0,0,0)$.
- La recta $(C_\rho, 0,0)$ es la recta de tonos de grises. En el espacio **RGB**, la recta de grises es representada por la terna (k, k, k) con $0 \leq k \leq 1$.
- La trayectoria $(1,0, C_\phi)$ muestra el cambio de amarillo a azul pasando por el gris, con una intensidad unitaria (Fig. 4).
- La trayectoria $(1, C_\theta, \min C_\phi)$ muestra el cambio de rojo a verde pasando por el amarillo con una intensidad unitaria (Fig. 4).
- La componente radial C_ρ contiene la información de intensidad, dejando la información de cromaticidad contenida en las componentes angulares (C_θ, C_ϕ) .

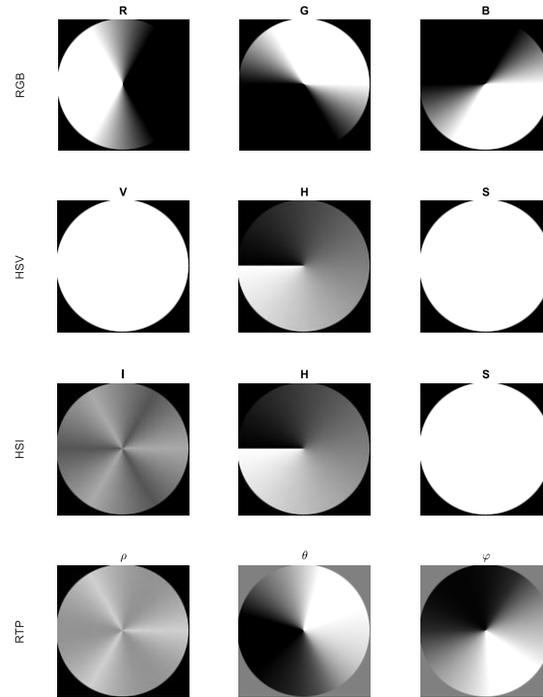


Fig. 6. Descomposición del círculo cromático en los espacios de color *RGB*, *HSV*, *HSI* y *RTP*.



Fig. 7. Muestras del banco de imágenes [21]. En la columna izquierda: Imágenes naturales. En la columna derecha: Imágenes sintéticas

La Fig. 5 muestra una imagen sintética a color, el círculo cromático, la cual exhibe un amplio rango de cromaticidades.

Las componentes correspondientes a los espacios de color *RGB*, *HSV*, *HSI* y *RTP* para el círculo cromático se muestran en la Fig. 6, en la que se observa que existe una relación directa entre la componente *I* del espacio *HSI* y la componente ρ del espacio *RTP*.

Las componentes (*H*, *S*) de los espacios *HSV* y *HSI* codifican, de la misma manera, la cromaticidad de la imagen y presentan un cambio abrupto en la zona correspondiente a los rojos, aunque las cromaticidades son cercanas. Este cambio no se presenta en las componentes (θ , φ) del espacio *RTP*, lo cual constituye una ventaja en la descripción de colores, pues las diferencias entre dos colores son siempre consistentes.

4. Evaluación

El espacio *RTP* puede aplicarse a todos los problemas de visión artificial donde el color es un elemento diferenciador. Para efectos de validar su utilidad, se compara el desempeño entre los espacios *RGB*, *HSI* y *HSV* y *RTP* en el problema de discriminación entre imágenes sintéticas realistas generadas por computador (Computer Graphics - CG) e imágenes naturales capturadas por sensores fotosensibles (Photographic Images - PG) [6]. Este problema es un tema de investigación abierto [6, 7, 8, 9] y de alta complejidad debido al avance del software y la sofisticación de los equipos de cómputo [6] para crear imágenes sintéticas con un alto grado de realismo.

Como las imágenes sintéticas no representan escenas reales, podrían llevar a los seres humanos a la toma de decisiones basados en información falsa. Por esta razón, cobra especial importancia poder discriminar las imágenes sintéticas [7, 8, 9]. La Fig. 7 ilustra dos imágenes naturales y dos imágenes sintéticas que podrían interpretarse como naturales. Estas imágenes fueron tomadas del Banco de Imágenes Fotográficas y Gráficos Computarizados Fotorrealistas desarrollado en la Universidad de Columbia [21]. Para evaluar cuantitativamente el desempeño de un espacio de color respecto a otro

x	b
a	c

Fig. 8. Ubicación de los píxeles de contexto para generar la imagen de predicción y posteriormente el error de predicción

se adoptó el protocolo propuesto en [7], el cual se ha utilizado ampliamente para la discriminación de imágenes reales y sintéticas. Este protocolo incluye una etapa de extracción de características y una de clasificación que se describen a continuación:

4.1. Extracción de características

Para asignar una de las clases planteadas (CG o PG) a una imagen, los momentos estadísticos de funciones características aplicadas a imágenes

Para asignar una de las clases planteadas (CG o PG) a una imagen, los momentos estadísticos de funciones características aplicadas a imágenes descompuestas mediante la transformada Wavelet se utilizan como descriptores.

El histograma de una imagen digital *I*, o una de sus sub-bandas Wavelet, cuyos valores de intensidad corresponden a una variable aleatoria, es una función de densidad de probabilidad $h(I)$ de *N* divisiones. Se define entonces, una función característica $H(I)$ como la transformada de Fourier de $h(I)$ y el *n*-ésimo momento estadístico de $H(I)$ de acuerdo con la expresión de la Ecuación (5) [7]:

$$M_n = \frac{\sum_{j=1}^{N/2} f_j^n |H(f_j)|}{\sum_{j=1}^{N/2} |H(f_j)|}. \quad (5)$$

Sea I^X una imagen en el espacio de color *X*. Cada componente de I^X se descompone en 3 niveles mediante la transformada Haar Wavelet. En cada nivel $i = 1, 2, 3$, existen 4 sub-bandas (Aproximación, Horizontal, Vertical y Diagonal), por lo cual, considerando que la componente de I^X es la sub-banda de nivel $i = 0$, se tienen 13 sub-bandas, de las que se extraen los 3 primeros

momentos estadísticos definidos en la Ecuación (5).

De estas sub-bandas se obtienen 39 características asociadas a cada componente de color en el espacio X . De la misma forma, se definen 39 características para la imagen de error de predicción en la componente de color correspondiente.

Así, en los espacios tridimensionales de color, los vectores característicos son de 234 dimensiones. La imagen de error de predicción se estima como la diferencia entre una imagen y su versión predicha. El algoritmo de predicción utilizado está dado por:

$$\hat{x} = \begin{cases} \max(a, b) & c \leq \min(a, b), \\ \min(a, b) & c \geq \max(a, b), \\ a + b - c & \text{otro caso,} \end{cases} \quad (6)$$

donde \hat{x} es la predicción del valor de x .

El contexto del pixel x se define por la posición relativa de los píxeles a, b, c , que se muestra en la Fig. 8.

4.2. Clasificación

Como clasificador se utiliza una Máquina de Vectores de Soporte, *SVM*, con kernel Función de Base Radial, *RBF*. La *SVM* es un algoritmo de aprendizaje de máquinas basado en la teoría de aprendizaje estadístico y se usa ampliamente en problemas de reconocimiento de patrones.

La *SVM* se implementa con *LIBSVM*, una librería abierta de aprendizaje de máquinas desarrollada en la *National Taiwan University* [22].

Se emplea el método de búsqueda en grilla para definir los valores óptimos para los parámetros de regularización y dispersión (C, γ) del kernel *RBF* [23].

La precisión asociada a cada combinación (C, γ) se encuentra mediante el proceso de validación cruzada con *10-fold* dejando uno afuera.

5. Resultados

Inicialmente, se buscan los parámetros óptimos (C, γ) que maximizan la precisión promedio en la

Tabla 1. Parámetros óptimos (C, γ) para los clasificadores

Espacio	C	γ
RGB	$2^{19.8}$	$2^{-1.6}$
HSI	$2^{14.6}$	2^{-1}
HSV	$2^{18.8}$	$2^{-4.6}$
RTP	$2^{17.8}$	$2^{-4.8}$

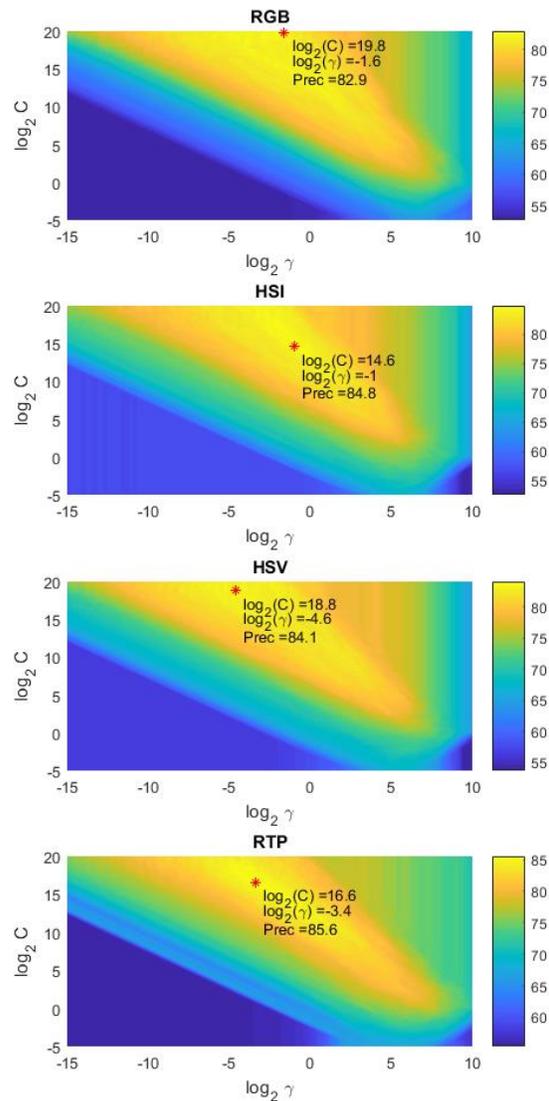
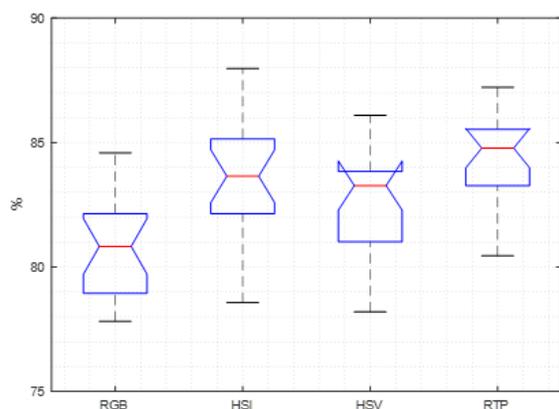
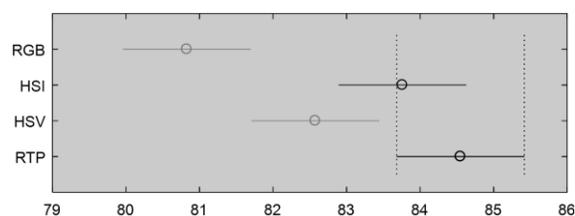


Fig. 9. Optimización de los parámetros de configuración del kernel para cada espacio evaluado

Tabla 2. Estadísticos de precisión para los espacios de color evaluados

Espacio	Promedio %	Desviación estándar
RGB	80.83	2.09
HSI	83.76	2.37
HSV	82.58	2.19
RTP	84.55	1.64

**Fig. 10.** Prueba ANOVA para la precisión en la clasificación de imágenes naturales y sintéticas sobre 20 ejecuciones usando los espacios de color RGB, HSI, HSV y RTP**Fig. 11.** Intervalos de confianza en la identificación de imágenes generadas por computador para los espacios de color evaluados

clasificación para cada espacio de color evaluado. La clasificación promedio se encuentra mediante la validación cruzada $10 - fold$ dejando uno afuera.

La figura 9 ilustra las superficies de precisión obtenidas para cada espacio de color evaluado y se resaltan, con asteriscos, los puntos óptimos de cada una.

En la Tabla 1 se listan los valores (C, γ) óptimos que se identificaron en las superficies de precisión mencionadas.

Para comparar el efecto de los espacios de color sobre la clasificación, se obtuvo la media de la precisión en clasificación sobre 20 ejecuciones del experimento con los valores óptimos (C, γ) identificados para cada espacio de color (ver Tabla 2). En cada ejecución, se seleccionaron aleatoriamente 5/6 partes del banco de imágenes (1334 imágenes) para conformar el conjunto de entrenamiento. El resto del banco de imágenes (266 imágenes) se utilizó como conjunto de prueba.

Tabla 2 muestra el promedio y la desviación estándar de las precisiones obtenidas en las 20 ejecuciones para cada espacio de color evaluado, donde se encuentra que el mejor desempeño se obtiene con el espacio *RTP*, pues tiene la mayor precisión media (84.55%) con la menor desviación estándar (1.64) en el conjunto evaluado.

La Fig. 10 muestra el diagrama de caja de las precisiones obtenidas con cada espacio de color, y el respectivo análisis de varianza ANOVA de una vía. Como $P = 1.65E - 6 < 0.05$, puede afirmarse que existen diferencias estadísticamente significativas entre los clasificadores y que, debido a que en el protocolo de pruebas desarrollado se varía únicamente el espacio de color, esta diferencia puede ser atribuida a los espacios de color evaluados.

Los intervalos de confianza, con un nivel de confianza de 95%, correspondientes a la precisión media en la clasificación asociada a cada espacio de color se muestran en la Fig. 11. El espacio *RGB* tiene diferencias estadísticamente significativas respecto a los espacios *HSI*, *HSV* y *RTP* ubicándose como el de menor desempeño en la clasificación. Por su parte, el espacio *HSI* tiene diferencias estadísticamente significativas solamente respecto al espacio *RGB*.

El espacio *HSV* presenta diferencias estadísticamente significativas y muestra un mejor desempeño que el espacio *RGB*, a la vez que presenta diferencias estadísticamente significativas y muestra un peor desempeño que el espacio *RTP*. El espacio propuesto presenta diferencias estadísticamente significativas con los espacios *RGB* y *HSV* con un mejor desempeño que estos. Aunque no existen diferencias

estadísticamente significativas con el espacio HSI, puede observarse que hay leves mejoras en el desempeño.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta que el valor promedio de precisión asociado al espacio *RTP* es mayor, puede afirmarse que este espacio constituye una mejora en la representación de color al compararse con los espacios *RGB*, *HSI* y *HSV*.

6. Conclusión

En este artículo se propuso un espacio no perceptual de color que permite describir los colores mediante coordenadas esféricas. En este espacio, como ocurre con los espacios *HSI* y *HSV*, que son ampliamente usados por la comunidad científica en el área de procesamiento digital de imágenes en color, se desacopla la información de cromaticidad de la información de intensidad.

Sin embargo, debido a la geometría del espacio *RTP*, no se desagrupan los colores correspondientes a las distintas tonalidades de rojo, permitiendo también encontrar distancias entre colores de manera directa y cercana a la perceptual.

En el problema de identificación de imágenes generadas por computador, el espacio de color *RTP* usado en la etapa de extracción de características, permitió que las características aumentaran su capacidad de discriminación mejorando los resultados obtenidos respecto a los espacios *HSI* y *RGB*. Esto permite afirmar que el espacio *RTP* tiene potencial en diversas aplicaciones de procesamiento de imágenes en color.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Departamento Colombiano de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS, y la Universidad del Valle. Además, fue desarrollado en el Laboratorio de Visión Artificial del grupo de investigación Percepción y Sistemas Inteligentes - PSI, de la Universidad el Valle en Colombia.

Referencias

1. **Shamoi, P., Inoue, A., & Kawanaka, H. (2014).** Perceptual color space: Motivations, methodology, applications. *7th Int. Conf. Soft Comput. Intell. Syst. (SCIS'14), 15th Int. Symp. Adv. Intell. Syst. (ISIS'14)*, pp. 1354–1359. DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044882.
2. **Ford, A. & Roberts, A. (1998).** *Colour space conversions*. Westminster Univ. London, pp. 1–31.
3. **Alarcon, T. & Dalmau, O. (2014).** Color categorization models for color image segmentation. *Proceeding Advances in Low-Level Color Image*, pp. 303–327. DOI: 10.1007/978-94-007-7584-8_10.
4. **Susstrunk, S., Buckley, R., & Swen, S. (1999).** Standard RGB color spaces. *Color Image Proceeding Color Science, Systems and Applications*, Vol. 134, No. 38, pp. 127–134.
5. **Zhou, L. & Hansen, C.D. (2016).** A survey of colormaps in visualization. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, Vol. 22, No. 8, pp. 2051–2069. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2489649.
6. **Birajdar, G.K. & Mankar, V.H. (2017).** Computer graphic and photographic image classification using local image descriptors. *Def. Sci. J.*, Vol. 67, No. 6, pp. 654–663. DOI: 10.14429/dsj.67.10079.
7. **Chen, W., Shi, Y.Q., & Xuan, G. (2007).** Identifying computer graphics using HSV color model and statistical moments of characteristic functions. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 1123–1126. DOI: 10.1109/ICME.2007.4284852.
8. **Lyu, S. & Farid, H. (2005).** How realistic is photorealistic? *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 53, No. 2, pp. 845–850, DOI: 10.1109/TSP.2004.839896.
9. **Li, W., Zhang, T., Ping, X., & Zheng, E. (2010).** Identifying photorealistic computer graphics using second-order difference statistics. *Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov.*, pp. 2316–2319.
10. **Cepeda-Negrete, J., Sanchez-Yanez, R.E., Correa-Tome, F.E., & Lizarraga-Morales, R.A. (2017).** Dark image enhancement using perceptual color transfer. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 14935–14945. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763898.
11. **Chen, T., Ma, J., & Deng, Z. (2013).** Attributes of color represented by a spherical model. *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 22, No. 4, DOI: 10.1117/1.JEI.22.4.043032.
12. **Levene, S.B. (1993).** *Color analysis based upon transformation to spherical coordinate*. pp. 1–11.

13. Lynch, S.E., Drew, M.S., & Finlayson, G.D. (2013). Colour constancy from both sides of the shadow edge. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 899–906.
14. Gómez, E. (2016). *Aportes a la constancia del color computacional usando máquinas de aprendizaje*. Universidad del Valle.
15. Yan, B.D. & Yu, Y. (2013) study on detection of human motion using a RGB color space shadow method with mechanics properties. *Advanced Research on Information Science, Automation and Material System III*, Vol. 703, pp. 304–307. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.703.304.
16. Dong, X., Wang, K., & Jia, G. (2009). moving object and shadow detection based on RGB color space and edge ratio. *Proceeding 2nd International Congress on Image and Signal*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/CISP.2009.5301770.
17. Rozanda, N.E., Ismail, M., & Permana, I. (2015). Segmentation Google Earth imagery using k-means clustering and normalized RGB color space. *Computational Intelligence in Data Mining*, Vol. 1, pp. 375–386. DOI: 10.1007/978-81-322-2205-7_36.
18. Pengsen, K. & Zhenming, Y. (2017). Image blurred region detection based on RGB color space information and local standard deviation. *IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, pp. 2177–2181. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054403.
19. Amarger, V., Ramik, D.M., Sabourin, C., Madani, K., Moreno, R., Rossi, L., & Graña, M. (2012). Spherical coordinates framed RGB color space dichromatic reflection model based image segmentation: Application to wildland fires' outlines extraction. *Proceeding 3rd International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*, Vol. 7, pp. 19–24. DOI: 10.1109/IPTA.2012.6469529.
20. Yi, J., Park, J., Kim, J., & Choi, J. (2003). Robust skin color segmentation using a 2D plane of RGB color space. *Computer and Information Sciences*, pp. 413–420. DOI: 10.1007/978-3-540-39737-3_52.
21. Ng, T., Chang, S., Hsu, J., & Pepeljugoski, M. (2004). *Columbia photographic images and photorealistic computer graphics dataset*. pp. 1–23.
22. Chang, C.C. & Lin, C.J. (2011). LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 27–27-27. DOI: 10.1145/1961189.1961199.
23. Rasouli, A. & Tsotsos, J.K. (2017). The effect of color space selection on detectability and discriminability of colored objects. *Computer Science, Computer Vision and Pattern Recognition*.

Article received on 23/10/2018; accepted on 19/11/2019.
Corresponding author is Jean Pierre Díaz-Paz.