

Análisis Técnico de la Digitalización de Imágenes: Profundidad de Color y Cuantificación de Colores

I. Fundamentos de la Digitalización de Imágenes: El Proceso de Conversión Analógico-Digital

La digitalización de una imagen es el proceso fundamental de convertir una escena del mundo real, que es inherentemente analógica y continua, en una representación numérica que un computador puede procesar y almacenar. Este proceso de conversión analógico-digital (ADC) se compone de tres etapas secuenciales: muestreo, cuantificación y codificación.¹ Para comprender la naturaleza de una imagen digital, es imperativo diseccionar estos componentes, ya que establecen los fundamentos de la resolución, la profundidad de color y los artefactos visuales.

A. Discretización del Dominio Espacial: El Muestreo (Sampling)

El primer desafío en la digitalización es la discretización del dominio espacial. Una imagen analógica (como la luz que entra en una lente de cámara) es una función continua en el espacio bidimensional.³ El muestreo es el proceso que convierte esta función continua en una secuencia numérica discreta, imponiendo una estructura finita.³

Conceptualmente, el muestreo superpone una rejilla (matriz) sobre la imagen analógica.⁴ En cada intersección de esta rejilla, se toma una "muestra" de la señal, registrando su intensidad o valor de color en ese punto geográfico específico.⁴ Cada una de estas muestras espaciales se convierte en un **píxel** (Picture Element).

El resultado de este proceso es una matriz de datos bidimensional.⁵ La densidad de esta rejilla se denomina *tasa de muestreo* y determina directamente la *resolución espacial* de la imagen digital.⁴ Por ejemplo, una tasa de muestreo que produce una matriz de 1024 x 1024 píxeles ⁶ captura más detalles espaciales (mayor resolución) que una que produce 256 x 256 píxeles. Por lo tanto, el muestreo digitaliza las coordenadas espaciales (x, y) de la imagen, definiendo "dónde" se almacena la información.⁷

B. Discretización del Dominio de Amplitud: La Cuantificación (Quantization) de la Señal

Una vez que el espacio ha sido discretizado por el muestreo, el valor de cada píxel (su amplitud, intensidad o color) sigue siendo analógico, es decir, puede tomar cualquier valor dentro de un rango continuo. La segunda etapa, la cuantificación, se encarga de discretizar este dominio de amplitud.⁴

La cuantificación es el proceso de convertir el *rango continuo* de valores de intensidad de cada píxel en un *conjunto finito de valores discretos* preestablecidos.² A cada muestra de amplitud continua se le asigna el nivel discreto más cercano dentro de un conjunto definido.⁴ Por ejemplo, en una imagen en escala de grises, todos los valores de brillo continuos entre 0.9 y 1.0 podrían ser "mapeados" al valor discreto 255 (blanco).

Este es el primer y más fundamental significado del término "cuantificación". Es un proceso de aproximación y, por naturaleza, introduce un error, conocido como *ruido de cuantificación*.¹ El número de niveles discretos disponibles en este conjunto finito es el factor más crítico para determinar la fidelidad de la señal. Este número se define por la *profundidad de bits* (bit depth) asignada al proceso.⁸

La profundidad de bits es, por tanto, una *consecuencia* y una *medida numérica* de la resolución del paso de cuantificación.

- Una cuantificación de **8 bits** define 2^8 (256) niveles discretos.⁵
- Una cuantificación de **16 bits** define 2^{16} (65,536) niveles discretos.⁸

Cuanto mayor sea el número de bits utilizados en la cuantificación, mayor será el número de niveles, menor será el error de aproximación (ruido de cuantificación) y mayor será la calidad y precisión de la señal resultante.⁸ Por lo tanto, la cuantificación digitaliza la *amplitud* ("qué" información de color o intensidad) de cada píxel.⁷

C. El Paso Final: Codificación (Encoding)

La etapa final del ADC es la codificación.¹ En este punto, el proceso de cuantificación ha asignado a cada píxel un nivel discreto (p. ej., el nivel "112" de un total de 256). La codificación es el proceso de asignar un código digital binario único a cada uno de estos niveles de amplitud.²

Para una cuantificación de 8 bits (256 niveles), la codificación asigna un número binario de 8 bits a cada nivel: el nivel 0 se codifica como "00000000", el nivel 1 como "00000001", y así sucesivamente hasta el nivel 255, que se codifica como "11111111".⁵

El producto final de estas tres etapas (muestreo, cuantificación y codificación) es la imagen digital: una matriz de datos⁵ donde cada celda (píxel) contiene un valor numérico binario que representa la información lumínica de ese punto específico en el espacio.

II. Definición y Análisis de la Profundidad de Color (Bit Depth)

La profundidad de color (bit depth) es la métrica que cuantifica la precisión con la que se representa el color de un solo píxel, basándose directamente en la resolución de la etapa de cuantificación-codificación descrita anteriormente.

A. Métricas Fundamentales: Bits por Píxel (bpp) vs. Bits por Canal (bpc)

Existe una ambigüedad terminológica significativa en el uso de "profundidad de bits", que es esencial aclarar. La confusión radica en la diferencia entre *bits por píxel* y *bits por canal*.

1. **Bits por Píxel (bpp):** Esta es la definición formal de profundidad de color. Se refiere al número total de bits de información utilizados para representar el color de un solo píxel.⁹
2. **Bits por Canal (bpc):** La mayoría de los modelos de color (como RGB) son multicanal. Un color final se compone de la combinación de valores de canales de color primarios (Rojo, Verde y Azul).⁹ *Bits por canal* (bpc) define el número de bits asignados para almacenar el valor de *un solo* de estos canales.¹¹

La relación es: $\text{Bits por Píxel (bpp)} = \text{Bits por Canal (bpc)} \times \text{Número de Canales}$.

Esta distinción es la fuente de una confusión común. Por ejemplo, una "imagen GIF de 8 bits" se refiere a 8 *bpp* (256 colores totales en una paleta).¹² En cambio, un "archivo JPEG de 8 bits" o el "modo 8 bits" en software como Adobe Photoshop se refiere a 8 *bpc* (8 bits para Rojo, 8 para Verde, 8 para Azul), lo que resulta en un total de 24 *bpp*.¹²

El número total de colores únicos que una imagen puede representar se calcula como $2^{\text{bpc} \times \text{num_canales}}$. Para un sistema RGB de 8 bpc, esto es $2^{8 \times 3} = 256^3$, lo que equivale a 16,777,216 colores posibles.⁹

B. Análisis Comparativo de Profundidades de Bit Comunes

- **1-bit (Monocromo):** 1 bpp. Cada píxel es 0 o 1. Define $2^1 = 2$ colores (típicamente blanco y negro).⁹
- **8-bit (Escala de Grises):** 1 canal. 8 bpc = 8 bpp. Define $2^8 = 256$ tonos de gris.⁵
- **8-bit (Color Indexado):** 8 bpp. Define $2^8 = 256$ colores totales, pero estos 256 colores se seleccionan de una paleta más grande (p. ej., 16.7 millones).⁹ Este modelo se explora en la Sección III.
- **16-bit ("High Color"):** 16 bpp. Define $2^{16} = 65,536$ colores.¹⁵ A menudo se divide

en 5 bits para Rojo, 6 para Verde (al que el ojo es más sensible) y 5 para Azul.

- **24-bit ("True Color"):** 3 canales (RGB). 8 bpc. Total 24 bpp. Define 2^{24} (aprox. 16.7 millones) de colores.⁹

C. "True Color" (Color Verdadero): El Estándar de 24 bits (8 bpc)

El término "True Color" (Color Verdadero) se refiere universalmente al estándar de 24 bpp, o 8 bpc, en un modelo RGB.¹¹ Recibe este nombre porque la gama de 16.7 millones de colores que puede representar excede el umbral de la percepción humana, que se estima en alrededor de 10 millones de colores distintos.¹¹

Para el ojo humano, una imagen de 24 bits es perceptualmente "perfecta" o indistinguible de una paleta de colores continua. Por esta razón, se convirtió en el estándar para la computación y la visualización de consumo.¹⁸

D. Más allá de "True Color": Exploración de "Deep Color" (10, 16 y 32 bits)

Si 24 bits (8 bpc) ya es perceptualmente perfecto, surge una pregunta lógica: ¿cuál es el propósito de profundidades de bits aún mayores, comúnmente conocidas como "Deep Color"?

- **10 bpc (30 bpp):** Usado en monitores profesionales, define 2^{10} (1,024) niveles por canal, para un total de 1.07 mil millones de colores. Ayuda a reducir el *banding* en la visualización.²⁰
- **16 bpc (48 bpp):** Usado en fotografía digital de alta gama (p. ej., archivos RAW) y procesamiento. Define 2^{16} (65,536) niveles por canal, para un total de 281 billones (trillions) de colores.¹¹
- **32 bpc (Ambigüedad):** El término 32 bits es ambiguo.
 1. **RGBA:** Más comúnmente, se refiere a 24-bit True Color (8 bpc * 3 canales) más un *canal Alfa* adicional de 8 bits que define la transparencia u opacidad. No es más *color*, sino más *información* por píxel.¹⁵
 2. **CMYK:** En el dominio de la impresión, puede referirse a 8 bpc * 4 canales (Cian, Magenta, Amarillo, Negro).¹²

El propósito de profundidades de bits extremas, como 16 bpc (48 bpp), no es la *visualización* (ya que el ojo no puede ver la diferencia ¹¹), sino la *producción* y el *procesamiento*.

La precisión extra no está destinada al ojo humano, sino a la *matemática* del software de edición.¹¹ Un archivo de 8 bpc tiene solo 256 niveles discretos por canal. Si se realiza una corrección de tono agresiva (p. ej., "Niveles" o "Curvas" en Photoshop) en un gradiente suave, el software "estira" esos 256 valores.²⁴ Este estiramiento crea "huecos" o "pasos" en el histograma donde faltan valores. Visualmente, estos huecos se manifiestan como *banding*

(bandas de color) o *posterización*.²²

En cambio, un archivo de 16 bpc tiene 65,536 niveles por canal. Al aplicar la *misma* edición, la densidad de información es tan vasta que, incluso después de un estiramiento extremo, el número de niveles resultantes sigue siendo mucho mayor que los 256 que el monitor puede mostrar. No se perciben "huecos".

Por lo tanto, la profundidad de bits tiene dos propósitos distintos:

1. **8 bpc (24 bpp)** es un formato de *entrega y visualización*, optimizado para la percepción humana.
2. **16 bpc (48 bpp)** es un formato de *producción, edición y archivo*, optimizado para la *resiliencia algorítmica* y para prevenir errores de redondeo que se acumulan durante el posprocesamiento.¹¹

Tabla II-A: Matriz de Profundidad de Color y Capacidad Tonal

Profundidad de Bits (Nombre Común)	Bits por Canal (bpc)	Canales	Bits por Píxel (bpp)	Niveles por Canal	Número Total de Colores
1-bit (Monocromo)	1	1	1	$2^1 = 2$	2^9
8-bit (Escala de Grises)	8	1	8	$2^8 = 256$	256 tonos de gris ¹²
8-bit (Color Indexado)	(N/A)	(N/A)	8	(N/A)	256 (de una paleta) ⁹
16-bit ("High Color")	5 (R, B), 6 (G)	3 (RGB)	16	$2^{16} = 65,536$	$65,536^{15}$
24-bit ("True Color")	8	3 (RGB)	24	$2^8 = 256$	$256^3 \approx 16.7$ millones ¹⁰
32-bit (True Color + Alfa)	8	4 (RGBA)	32	$2^8 = 256$	≈ 16.7 millones + 256 niveles de alfa ²³
48-bit ("Deep Color")	16	3 (RGB)	48	$2^{16} = 65,536$	$65,536^3 \approx 281$ billones ¹¹

III. El Doble Significado de la Cuantificación: De la Captura a la Optimización

El término "cuantificación" es una de las principales fuentes de confusión en el procesamiento de imágenes porque se utiliza para describir dos procesos fundamentalmente diferentes.

A. Desambiguación del Término: Cuantificación (Señal) vs. Cuantificación de Colores (Imagen)

1. **Cuantificación (Nivel de Señal) (ADC):** Como se definió en la Sección I.B, este es el proceso de digitalización que mapea una amplitud de señal continua (analógica) a un valor discreto. Este proceso *crea* la profundidad de bits inicial de la imagen (p. ej., 16 bpc).²
2. **Cuantificación de Colores (Nivel de Imagen):** Este es un proceso de *posprocesamiento* que se aplica a una imagen *ya digitalizada*. Su objetivo es *reducir* el número de colores distintos utilizados en la imagen.²⁵ Es una forma de **cuantificación vectorial**.²⁷

Un flujo de trabajo típico para ilustrar la diferencia:

1. Un escáner captura una fotografía usando **Cuantificación-ADC** a 16 bpc (48 bpp), creando un archivo con billones de colores potenciales.
2. Para subir esta imagen a un sitio web en formato GIF, se aplica un algoritmo de **Cuantificación-Color** para *reducir* esos colores a una paleta optimizada de solo 256 colores (8 bpp).

B. El Modelo de Color Indexado (Indexed Color)

El mecanismo técnico que permite la Cuantificación de Colores (reducción) es la arquitectura de *color indexado*.²⁶ Para entenderlo, primero debe contrastarse con la arquitectura de *color verdadero* (True Color).

- **True Color (Color Verdadero):** Como se describió en la Sección II, este es un modelo de acceso *directo*.¹⁶ Cada píxel en la matriz de la imagen almacena *directamente* su propio valor de color completo (p. ej., un valor RGB de 24 bits).²⁸
- **Indexed Color (Color Indexado):** Este es un modelo de acceso *indirecto*.²⁷ En lugar de que cada píxel almacene su propio color, la imagen almacena una paleta de colores global, llamada **Tabla de Búsqueda de Colores (CLUT)** ²⁷ o simplemente paleta. Esta paleta es una lista (p. ej., con 256 entradas) donde cada entrada *SÍ* almacena un valor de color verdadero (p. ej., 24 bits). El píxel en la imagen, en lugar de almacenar el valor de 24 bits, almacena únicamente un pequeño *índice* (un puntero) que indica qué entrada de la paleta le corresponde.²⁷ Si la paleta tiene 256 entradas (de 0 a 255), el índice solo requiere 8 bits.

La **Cuantificación de Colores** es el *proceso* de analizar una imagen de True Color para

decidir cuáles serán los 256 colores "óptimos" que se incluirán en la CLUT. El **Color Indexado** es la *arquitectura de almacenamiento* que utiliza esa CLUT resultante.

C. Análisis Comparativo: Arquitecturas de "True Color" vs. "Indexed Color"

El contraste entre estos dos modos de almacenamiento es fundamental para entender los formatos de archivo de imagen.

- **True Color (Color Verdadero):**
 - **Mecanismo:** Cada píxel almacena su propio valor RGB.²⁸
 - **Paleta (CLUT):** No existe.
 - **Flexibilidad de Color:** Cada píxel puede ser *cualquiera* de los 16.7 millones de colores.²⁸
 - **Tamaño de Píxel:** Grande (p. ej., 24 bits).
- **Indexed Color (Color Indexado):**
 - **Mecanismo:** Cada píxel almacena un *índice* a una CLUT.²⁷
 - **Paleta (CLUT):** Requerida. La paleta misma se almacena en el archivo.²⁷
 - **Flexibilidad de Color:** La imagen *entera* solo puede usar el número limitado de colores (p. ej., 256) que están *específicamente* en la CLUT.²⁷
 - **Tamaño de Píxel:** Pequeño (p. ej., 8 bits).

D. Aplicaciones y Propósito de la Cuantificación de Colores (Reducción)

El objetivo principal de reducir una imagen de True Color a Indexed Color es la **compresión de datos**. El ahorro de almacenamiento es significativo: se pasa de almacenar 24 bits por cada píxel a almacenar solo 8 bits por píxel (más el pequeño tamaño de la paleta).

Esta técnica es la base de formatos de archivo como GIF y PNG-8.²⁶ Es ideal para optimizar imágenes para la web, donde los tamaños de archivo más pequeños reducen el uso de ancho de banda y mejoran los tiempos de carga.²⁵ Históricamente, también fue crucial para que las imágenes se mostraran en hardware de visualización antiguo que estaba físicamente limitado a paletas de 16 o 256 colores.²⁶ Finalmente, puede usarse de forma intencionada para crear efectos visuales estilizados o "retro" (posterización).²⁵

Tabla III-A: Comparativa de Arquitecturas de Color: True Color vs. Indexed Color

Característica	True Color (p. ej., 24-bit)	Indexed Color (p. ej., 8-bit)
Mecanismo de Almacenamiento	Directo: El píxel almacena el valor RGB ²⁸	Indirecto: El píxel almacena un índice ²⁷

Valor por Píxel	Un valor de 24 bits (p. ej., R:8, G:8, B:8)	Un valor de 8 bits (p. ej., Índice 0-255)
Uso de Paleta (CLUT)	No ²⁸	Sí, la CLUT es un componente central ²⁷
Profundidad de Bits Típica (bpp)	24 bpp	8 bpp (también 1, 2, 4 bpp)
Colores Simultáneos Máx.	16.7 millones ¹¹	256 (o el tamaño de la paleta) ⁹
Formatos de Archivo (Ejemplos)	JPEG, PNG-24, BMP ¹⁷	GIF, PNG-8 ²⁶

IV. Análisis Algorítmico de la Cuantificación de Colores para la Reducción de Paleta

El proceso de Cuantificación de Colores (reducción) es un desafío computacional. Si una imagen de True Color tiene 1 millón de colores únicos (N), ¿cómo selecciona un algoritmo los 256 colores (K) "mejores" para construir la CLUT (paleta)? El objetivo es encontrar una paleta que minimice el error visual percibido entre la imagen original y la imagen cuantificada.²⁶ Varios algoritmos abordan este problema, siendo los más notables "Median Cut" y "Octree".

A. El Algoritmo "Median Cut" (Corte Mediano)

El algoritmo Median Cut (Corte Mediano) es un método adaptativo que divide el espacio de color basándose en la distribución de los píxeles de la imagen.³¹ Su premisa es que cada entrada en la paleta final debe representar aproximadamente el mismo número de píxeles de la imagen original.³¹

El proceso es el siguiente ³¹:

1. **Inicialización:** Se crea una "caja" 3D (en el espacio de color RGB) que contiene todos los píxeles de la imagen original.
2. **Iteración:**
 - a. Se selecciona una caja para dividir (inicialmente, solo hay una).
 - b. Se determina la dimensión (R, G o B) más larga de esa caja (es decir, el canal con el mayor rango de valores).
 - c. Se ordenan todos los píxeles dentro de esa caja según su valor en ese eje más largo.
 - d. La caja se divide en dos nuevas cajas en la mediana de esa lista ordenada (el píxel en el medio de la lista).
3. **Repetición:** Este proceso se repite, dividiendo recursivamente las cajas (generalmente se elige la caja con más píxeles para la siguiente división) hasta que se ha dividido el espacio en el número deseado de cajas (p. ej., 256).
4. **Paleta Final:** Las 256 cajas resultantes representan la paleta. El color representativo

para cada caja (es decir, cada entrada de la paleta) se calcula *promediando* los valores RGB de todos los píxeles que terminaron dentro de esa caja.³¹

La ventaja del Median Cut es que produce resultados de muy alta calidad, ya que asigna más entradas de paleta a las regiones de color que están más pobladas en la imagen, adaptándose al contenido específico de la misma.³¹

B. El Algoritmo "Octree" (Árbol Octal)

El algoritmo Octree (Árbol Octal) utiliza una estructura de datos de árbol jerárquico donde cada nodo puede tener hasta ocho hijos.³³ Esta estructura se mapea perfectamente al espacio de color 3D (RGB), donde una división en el punto medio de cada eje (R, G y B) produce ocho sub-cubos (hijos) ($2 \times 2 \times 2 = 8$).

El proceso es el siguiente ³⁴:

1. **Construcción (Inserción):** Se construye el árbol insertando el color de cada píxel de la imagen. El camino que sigue un color hacia abajo en el árbol se determina por sus bits RGB. En cada nivel, los bits de R, G y B se combinan para elegir uno de los 8 hijos.
2. **Acumulación en Hojas:** Los colores se insertan hasta una profundidad máxima (p. ej., 8 niveles). En los nodos *hoja* (el final de una rama), se mantiene una estadística: el número de píxeles que terminaron allí (references), y la suma total de sus valores R, G y B.
3. **Reducción (Poda):** Una imagen con muchos colores creará un árbol con muchas más hojas que las K (256) deseadas. El algoritmo debe entonces *reducir* el árbol. Comienza en el nivel más profundo y busca el nodo hoja con el menor recuento de references. Este nodo "menos importante" se *fusiona* con su nodo padre, sumando sus estadísticas (sum_R, sum_G, sum_B, references) a las del padre.
4. Este proceso de fusión se repite hasta que el número total de nodos hoja en el árbol es exactamente 256.
5. **Paleta Final:** Los 256 nodos hoja restantes forman la paleta. El color de cada entrada se calcula promediando sus estadísticas acumuladas: (sum_R / references, sum_G / references, sum_B / references).³⁴

C. Comparación de Algoritmos y Otros Enfoques

La elección del algoritmo de cuantificación implica un balance de ingeniería entre la calidad visual y la velocidad computacional.

- **Calidad vs. Velocidad:** En general, se considera que Median Cut produce paletas de *mejor* calidad visual, pero el algoritmo Octree es significativamente más *rápido*.³⁴ La operación de ordenación de píxeles en Median Cut (un costo de $O(N \log N)$) es computacionalmente más intensiva que la inserción y reducción del Octree (más cercano a $O(N)$).³⁵

- **Velocidad de Búsqueda:** El Octree tiene una ventaja adicional: la estructura del árbol, una vez construida, puede usarse como un mecanismo de búsqueda extremadamente rápido para mapear los píxeles de la imagen original a sus nuevos índices de paleta.³⁴
- **K-Means Clustering:** Otros métodos, como el clustering K-Means²⁶, también se utilizan. Este algoritmo trata los colores como puntos en un espacio 3D y encuentra iterativamente los K (256) "centroides" que mejor representan los K grupos de colores, minimizando la varianza. A menudo produce excelentes resultados, pero puede ser aún más lento que Median Cut.

V. Impacto Visual y Técnicas de Mitigación de Artefactos

La cuantificación, ya sea la cuantificación-ADC inicial o la cuantificación-color de reducción, es un proceso de aproximación. Cuando esta aproximación es demasiado agresiva (es decir, se usan muy pocos niveles o colores), se producen artefactos visuales perceptibles.

A. Análisis de Artefactos de Cuantificación: "Color Banding" (Bandas de Color) y "Posterización"

El artefacto más común y notorio de la cuantificación insuficiente se conoce como "**color banding**" (bandas de color) o "**posterización**".⁷

Este artefacto se define como la aparición de *transiciones abruptas, escalonadas o en "escalones"* en áreas de la imagen que deberían tener un gradiente de color suave y continuo, como un cielo despejado, una sombra sutil o un destello de lente.⁷ En lugar de una transición suave, el ojo percibe "bandas" o "contornos" artificiales (un efecto a veces llamado *false contouring*) que delimitan las áreas de color discretas.⁷

La causa raíz es simple: *niveles de cuantificación insuficientes*.⁷ No hay suficientes "colores intermedios" en la paleta o en la profundidad de bits para simular una transición suave.³

Es crucial entender que este artefacto visual idéntico (banding) puede tener dos causas fundamentales distintas, que se correlacionan directamente con los dos tipos de cuantificación definidos en este informe:

1. **Causa 1: Artefacto de Procesamiento (Baja Precisión bpc):** Como se discutió en la Sección II.D, esto ocurre cuando se aplican ediciones tonales agresivas a una imagen con una precisión de canal insuficiente (p. ej., 8 bpc). El "estiramiento" del histograma crea huecos en los 256 niveles del canal, lo que el ojo ve como bandas.²² La solución es trabajar en una profundidad de bits de producción más alta, como 16 bpc.¹⁴
2. **Causa 2: Artefacto de Compresión (Baja Paleta bpp):** Esto ocurre al aplicar Cuantificación-Color (reducción) a una imagen de True Color para convertirla a Indexed

Color (p. ej., PNG-8). Si un gradiente suave en la imagen original contenía 5,000 tonos únicos de azul, y el algoritmo de cuantificación (p. ej., Median Cut) solo asigna 10 de sus 256 colores de paleta para representar ese gradiente, el resultado será un *banding* severo.³

B. El Papel del "Dithering" (Tramado): Simulación de Tonos Intermedios

Para mitigar el *segundo* tipo de banding (el artefacto de compresión de paleta), se utiliza una técnica llamada **"dithering" o tramado**.²⁶

El dithering es una técnica que *crea la ilusión* de una mayor profundidad de color en imágenes con una paleta limitada.³⁹ En lugar de un mapeo simple, donde cada color original se asigna al color *más cercano* en la paleta (lo que causa el banding), el dithering *difunde el error de cuantificación* a los píxeles vecinos.⁴⁰

Mecanismo: El dithering aproxima un color faltante mediante una *difusión o mezcla* de píxeles de colores que *sí están disponibles* en la paleta.³⁰ Por ejemplo, para simular un tono de gris del 50% que no está en la paleta, el dithering puede crear un patrón de tablero de ajedrez de píxeles blancos y negros.

Efecto Perceptual: El ojo humano, especialmente a distancia, no percibe los píxeles individuales, sino que *mezcla* ópticamente el patrón de difusión, percibiendo el tono intermedio deseado (50% gris).³⁹

El dithering es un *trade-off*. No elimina el error, sino que lo *enmascara*.⁴⁰ Intercambia un artefacto estructurado y muy objetable (el *banding*) por un artefacto de ruido de bajo nivel o *granulosidad*³⁹, que es mucho menos distractor para el ojo. Es una técnica crucial para mejorar la calidad visual de las imágenes de color indexado (como GIF y PNG-8) que contienen gradientes.³⁰

VI. Implementación y Gestión de la Profundidad de Color en Formatos de Archivo

Los conceptos de True Color, Indexed Color, cuantificación y profundidad de bits se materializan en los formatos de archivo de imagen que se utilizan a diario. La elección del formato es, en esencia, una elección de arquitectura de color.

A. Caso de Estudio: GIF y PNG-8 (Color Indexado, 8 bpp)

- **GIF (Graphics Interchange Format):** Este formato utiliza *exclusivamente* el modelo de Color Indexado.¹⁷ Está limitado a una profundidad de bits máxima de 8 bpp, lo que

permite un máximo de 256 colores por imagen.¹⁷ Para crear un GIF a partir de una fotografía (True Color), es obligatorio un proceso de Cuantificación-Color (Sección IV).²⁶ Es muy susceptible al *banding* si no se aplica dithering. Soporta animación y transparencia básica de 1 bit (un píxel es totalmente transparente o totalmente opaco).¹⁷

- **PNG-8 (Portable Network Graphics - 8 bit):** Creado como un sucesor superior de GIF.³⁰ Al igual que GIF, utiliza un modelo de Color Indexado con un máximo de 8 bpp (256 colores).¹⁷ Es el formato ideal para logotipos, iconos y gráficos con áreas de color plano, donde proporciona una excelente compresión sin pérdidas.³ Su principal ventaja sobre GIF es el soporte para *dithering*³⁰ y un *canal alfa completo* de 8 bits, permitiendo una transparencia semitransparente suave.

B. Caso de Estudio: PNG-24 (Color Verdadero, 24 bpp)

- **PNG-24** es la variante de "True Color" del formato PNG.¹⁷ Utiliza una profundidad de 24 bpp (8 bpc) y *no* utiliza Color Indexado.¹⁷ Cada píxel almacena su valor RGB completo.²⁸
- Debido a que almacena 16.7 millones de colores, es el formato ideal para imágenes que no pueden tolerar la reducción de paleta: fotografías de alta calidad, gráficos complejos y, especialmente, *gradientes*.³
- Visualmente, un gradiente en PNG-24 será perfectamente suave, mientras que el mismo gradiente en PNG-8 mostrará *banding* (a menos que se use dithering).³ Su compresión es *lossless* (sin pérdidas), lo que preserva la calidad a costa de archivos de mayor tamaño.¹⁷

C. Caso de Estudio: JPEG (Color Verdadero, 24 bpp)

- **JPEG (Joint Photographic Experts Group):** Este formato también utiliza el modelo True Color, con una profundidad de 24 bpp (8 bpc).¹⁷ Al igual que PNG-24, *no* utiliza la Cuantificación-Color (reducción de paleta). Es el formato estándar para fotografías.¹⁷
- **Filosofía de Compresión Distinta:** Es fundamental comprender que JPEG y GIF/PNG-8 tienen filosofías de compresión opuestas.
 - **GIF/PNG-8** logran la compresión aplicando *Cuantificación-Color* (una forma de compresión *con pérdidas* de la información de color) para reducir la imagen a 8 bpp (Indexed Color). Luego, aplican una compresión *lossless* (sin pérdidas) a los datos de 8 bits resultantes.
 - **JPEG** ignora por completo la Cuantificación-Color. Mantiene el espacio de 24 bpp (True Color) y aplica un tipo de compresión *lossy* (con pérdidas) basada en la Transformada de Coseno Discreta (DCT) y el submuestreo de croma, que descarta información espacial de alta frecuencia que se asume que el ojo

humano no percibe con tanta agudeza.
En resumen, GIF/PNG-8 comprime *reduciendo la paleta*. JPEG comprime *descartando detalles espaciales/frecuenciales*.

D. Clarificación Final: PNG-32

El término "PNG-32" (o PNG de 32 bits) a menudo se malinterpreta como una mayor profundidad de *color*. No lo es.¹⁷ Es la designación informal para un archivo **PNG-24** (24-bit True Color) que también incluye un **canal Alfa de 8 bits** para la transparencia.²³ El cálculo es $8 (R) + 8 (G) + 8 (B) + 8 (\text{Alfa}) = 32$ bits por píxel.

Tabla VI-A: Comparativa de Formatos de Archivo y Gestión del Color

Formato	Modelo de Color (Arquitectura)	Profundidad Típica (bpp)	Paleta (CLUT)	Tipo de Compresión	Soporte de Transparencia	Artefacto Típico
GIF	Indexed Color ¹⁷	8 bpp (Máx 256 colores) ¹⁷	Requerida ²⁷	Lossless (sobre índices)	1-bit (Básica) ¹⁷	Banding, Posterización
PNG-8	Indexed Color ³⁰	8 bpp (Máx 256 colores) ¹⁷	Requerida ³⁰	Lossless (sobre índices)	8-bit Alfa (Completa) ³⁰	Banding (si no hay dithering) ³⁸
PNG-24	True Color ³⁰	24 bpp (16.7M colores) ¹⁷	No ³⁰	Lossless (sobre RGB) ¹⁷	8-bit Alfa (Completa) ³⁰	Ninguno (Archivos grandes)
JPEG	True Color ¹⁷	24 bpp (16.7M colores) ¹⁷	No	Lossy (DCT)	No	Artefactos de compresión (bloques, ruido)

VII. Conclusiones

El análisis de la digitalización de imágenes, la profundidad de color y la cuantificación revela un sistema de conceptos interconectados y terminología frecuentemente ambigua. La comprensión técnica de estos procesos permite desentrañar las decisiones fundamentales que definen la calidad, el tamaño y la fidelidad de una imagen digital. Las conclusiones clave de este análisis son:

1. **La Digitalización como Dualidad:** La conversión analógico-digital depende de dos procesos de discretización: el **muestreo** (que define la resolución espacial o píxeles) y la **cuantificación** (que define la resolución de amplitud o color).
2. **Ambigüedad de la "Cuantificación":** Este término tiene dos significados distintos que son cruciales para desambiguar.
 - **Cuantificación-ADC:** El proceso de *creación* de la señal digital, que mapea la amplitud analógica a niveles discretos. La *profundidad de bits* (p. ej., 8 bpc, 16 bpc) es la medida de la resolución de este proceso.
 - **Cuantificación-Color:** Un proceso de *reducción* de posprocesamiento (compresión) que reduce una imagen de True Color a una paleta limitada (p. ej., 256 colores), habilitado por algoritmos como Median Cut u Octree.
3. **Ambigüedad de "Profundidad de Bits":** La distinción entre **bpp (bits por píxel)** y **bpc (bits por canal)** es fundamental. Un "archivo de 8 bits" puede significar 8 bpp (Indexed Color, 256 colores totales) o 8 bpc (True Color, 16.7 millones de colores totales). La falta de precisión en esta terminología es una fuente persistente de confusión.
4. **Propósito del "Deep Color" (16 bpc / 48 bpp):** La utilidad de las profundidades de bits que exceden la percepción humana (8 bpc / 24 bpp) no es la *visualización*, sino la *resiliencia matemática durante el posprocesamiento*. Los bits adicionales proporcionan "espacio de maniobra" algorítmico, previniendo artefactos de *banding* inducidos por la edición.
5. **Arquitectura de Color como Destino:** La elección de un formato de archivo es una elección de arquitectura de color. **True Color** (JPEG, PNG-24) almacena valores RGB directos, mientras que **Indexed Color** (GIF, PNG-8) utiliza una paleta (CLUT) y punteros de índice para lograr una compresión significativa a costa de la fidelidad del color.
6. **Causas Duales del "Banding":** El artefacto visual de *banding* (bandas de color) tiene dos causas distintas: es un *artefacto de procesamiento* cuando se edita con baja precisión (8 bpc), y es un *artefacto de compresión* cuando se reduce a una paleta limitada (8 bpp).
7. **Mitigación de Artefactos:** La técnica de **dithering** (tramado) es la solución perceptual al *banding* inducido por compresión, enmascarando el error de cuantificación mediante la sustitución de bandas abruptas por un ruido de alta frecuencia, que es visualmente menos objetable.

En última instancia, cada imagen digital es el producto de una serie de compensaciones entre la fidelidad espacial (muestreo), la fidelidad de la amplitud (cuantificación), el tamaño del archivo (compresión) y la percepción visual (dithering). Una comprensión profunda de estos componentes permite a los técnicos y artistas tomar decisiones informadas para optimizar las imágenes para su propósito específico, ya sea el archivo de calidad maestra, la edición profesional no destructiva o la entrega web eficiente.

Fuentes citadas

1. Conversión analógica-digital - Wikipedia, la enciclopedia libre, acceso: noviembre 10, 2025,

- https://es.wikipedia.org/wiki/Conversi%C3%B3n_anal%C3%B3gica-digital
2. Conversión analógico-digital, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/29e6d5dd-276e-47d0-9d08-2527292a7e39/content>
 3. Procesamiento Digital de Imágenes - lapi - UNAM, acceso: noviembre 10, 2025,
https://lapi.fi-p.unam.mx/assets/img/materias/PDI/materialesTemario/PDI_Cap2_Fundamentos_de_la_Imagen_Digital.pdf
 4. Image Sampling vs Quantization - GeeksforGeeks, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/image-sampling-vs-quantization/>
 5. umh1782 2021-22 Lección 002-9 - Adquisición de Imágenes: Transmisión de la Imagen- Muestreo - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=JiUnmq9CEA>
 6. Introducción a las imágenes digitales, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://grupo.us.es/gtocom/pid/tema1-1.pdf>
 7. Chapter 5: Sampling and Quantization, acceso: noviembre 10, 2025,
https://www.princeton.edu/~cuff/ele201/kulkarni_text/digitizn.pdf
 8. El proceso de digitalización - UOC, acceso: noviembre 10, 2025,
https://cv.uoc.edu/UOC/a/moduls/90/90_574b/web/main/m1/c1/6.html
 9. ¿Qué es la profundidad de color y para qué sirve? - CaseGuard, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://caseguard.com/es/articles/que-es-la-profundidad-de-color-y-para-que-sirve/>
 10. acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.lenovo.com/mx/es/glosario/profundidad-de-color/#:~:text=Se%20mide%20en%20bits%20por,16%2C7%20millones%20de%20colores.>
 11. Bit Depth - Cambridge in Colour, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/bit-depth.htm>
 12. Explicación de la profundidad de color - Corel, acceso: noviembre 10, 2025,
<http://product.corel.com/help/CorelDRAW/540240626/Main/ES/Doc/CorelDRAW-Understanding-color-depth.html>
 13. 8bit vs 16bit - Why most PROs get Bit Depth WRONG? - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=Y-wSHpNJs-8>
 14. PROFUNDIDAD DE COLOR - 8BITS VS 16BITS - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=HqqW_EgXwCo
 15. Profundidad de color: ¿qué es? | Lenovo México, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.lenovo.com/mx/es/glosario/profundidad-de-color/>
 16. Color depth - Wikipedia, acceso: noviembre 10, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Color_depth
 17. Formatos de imagen en la web - AulaDiv, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://www.auladiv.com/guia/formatosimag.htm>
 18. Profundidad de color | Adobe Analytics - Experience League, acceso: noviembre 10, 2025,
<https://experienceleague.adobe.com/es/docs/analytics/components/dimensions/color-depth>

19. ¿Qué es la profundidad de color? Aspectos importantes que debes ..., acceso: noviembre 10, 2025, <https://szledworld.com/es/que-es-la-profundidad-de-color-2>
20. ¿Qué es la profundidad de color? Clave para monitores profesionales, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.pccomponentes.com/profundidad-de-color-que-es>
21. Colores de Visualización: Cómo la Profundidad de Color Impacta en la Calidad de Imagen, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.soroban.com.pe/colores-de-visualizacion-como-la-profundidad-de-color-impacta-en-la-calidad-de-imagen/>
22. 8-Bit vs 16-Bit Photos: What's The Difference | Skylum Blog, acceso: noviembre 10, 2025, <https://skylum.com/blog/8-bit-vs-16-bit-photos-whats-the-difference>
23. Profundidad de color | Apoyo a la edición Web - Biblioteca Complutense, acceso: noviembre 10, 2025, <https://biblioteca.ucm.es/edicionweb/profundidad-de-color>
24. 8bit, 16bit and 32bit difference? I'm self taught. : r/graphic_design - Reddit, acceso: noviembre 10, 2025, https://www.reddit.com/r/graphic_design/comments/rhmuw7/8bit_16bit_and_32bit_difference_im_self_taught/
25. What is Color Quantization | Cloudinary Glossary, acceso: noviembre 10, 2025, <https://cloudinary.com/glossary/color-quantization>
26. Color quantization - Wikipedia, acceso: noviembre 10, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Color_quantization
27. Indexed color - Wikipedia, acceso: noviembre 10, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Indexed_color
28. images types; indexed color vs true color, 8-bits graphics ..., acceso: noviembre 10, 2025, <https://drububu.com/tutorial/image-types.html>
29. Index image vs. Truecolor Image | أنواع الصور الملونة : المعالجة الصورية - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=cBqFr_Vlh0
30. The Developer's Guide to PNG Formats: Maximizing Impact with ..., acceso: noviembre 10, 2025, <https://cloudinary.com/guides/image-formats/the-developers-guide-to-png-formats-maximizing-impact-with-png-8-and-png-24>
31. Median Cut Algorithms, acceso: noviembre 10, 2025, https://web.cs.wpi.edu/~matt/courses/cs563/talks/color_quant/CQmediancut.html
32. The Median Cut Algorithm for Color Quantization | by Gabriel Ytterberg | Medium, acceso: noviembre 10, 2025, https://medium.com/@gytterberg_14295/the-median-cut-algorithm-for-color-quantization-cc1128a0c534
33. octree color quantization / Tom MacWright | Observable, acceso: noviembre 10, 2025, <https://observablehq.com/@tmcw/octree-color-quantization>
34. Octree Color Quantization - Cubic, acceso: noviembre 10, 2025, <https://www.cubic.org/docs/octree.htm>
35. Octree Algorithm, acceso: noviembre 10, 2025, https://web.cs.wpi.edu/~matt/courses/cs563/talks/color_quant/CQoctree.html
36. Hice un programa que reduce la cantidad de colores en una imagen. : r/Python -

Reddit, acceso: noviembre 10, 2025,

https://www.reddit.com/r/Python/comments/lhqrb6/i_have_made_a_program_that_reduces_the_number_of/?tl=es-419

37. Color quantization using octrees - Leptonica, acceso: noviembre 10, 2025,

<http://www.leptonica.org/papers/colorquant.pdf>

38. PNG-8 vs PNG-24: which one should you use? - YouTube, acceso: noviembre 10,

2025, <https://www.youtube.com/watch?v=KebcPXGyNko>

39. Dithering (tramado) | IDIS, acceso: noviembre 10, 2025,

<https://proyectoidis.org/dithering/>

40. Dithering - Explicación - YouTube, acceso: noviembre 10, 2025,

<https://www.youtube.com/watch?v=o7h8vXEKWcc>