

Fundamentos de fotografía digital

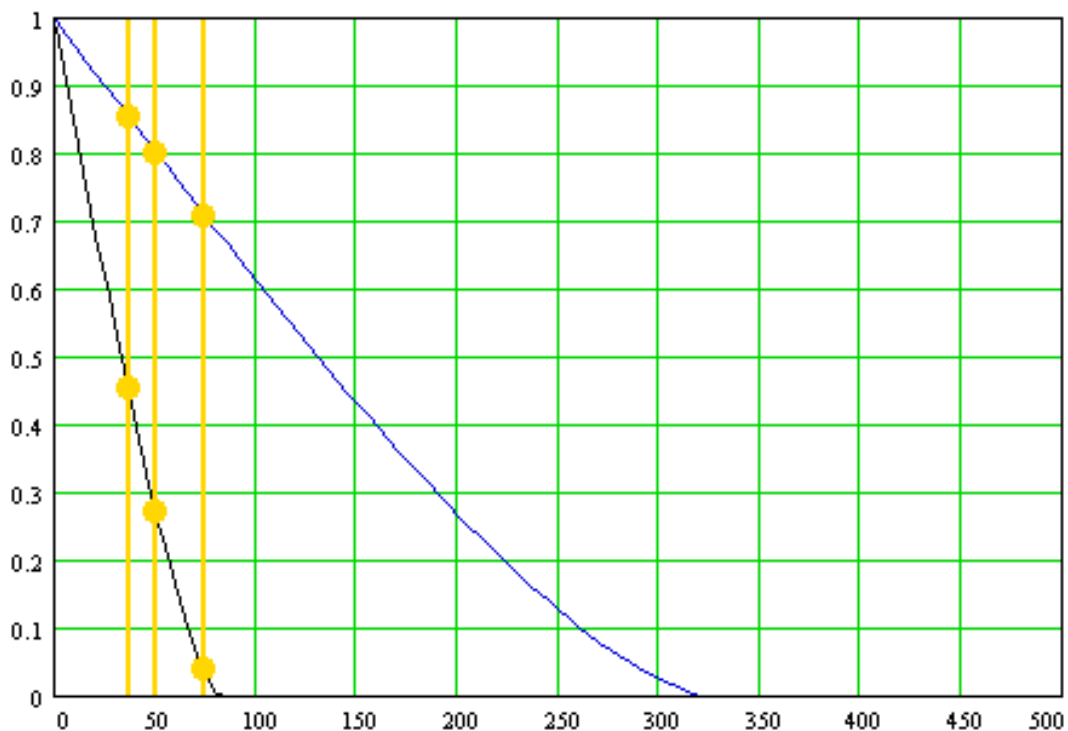
Efraín García y Rubén Osuna ©

6. Determinantes de la evolución de los sensores.

En esta sección veremos por qué el tamaño de los sensores y sus resoluciones tienden inexorablemente a unos valores de equilibrio.

Recordemos que para una impresión A4 ($\approx 8 \times 12$ pulgadas) con detalle real de 6 pares por milímetro, necesitaremos resolver, redondeando, 50 pares por milímetro en un sensor de $24 \times 36 \text{ mm}$ ($\approx 6 \times 8$), 75 pares por milímetro en un sensor APS ($\approx 6 \times 8 \times 1,5$), 95 pares en un sensor $4/3$ ($\approx 6 \times 8 \times 2$), y 35 pares en un sensor $37 \times 49 \text{ mm}$ ($\approx 6 \times 8 / 1,4$), que es el tamaño típico en los respaldos digitales actuales para cámaras de formato 6x6 ó 645 (la razón de diagonales del formato 35mm y ese sensor es de 1,4). Aplicando el *teorema de Nyquist* sin más correcciones, tendríamos una idea del número de píxeles que requerirían esos sensores. Pero sabemos que estas cifras se quedan algo cortas, pues pueden ser necesarias frecuencias de muestreo algo superiores a los 2 píxeles por ciclo.

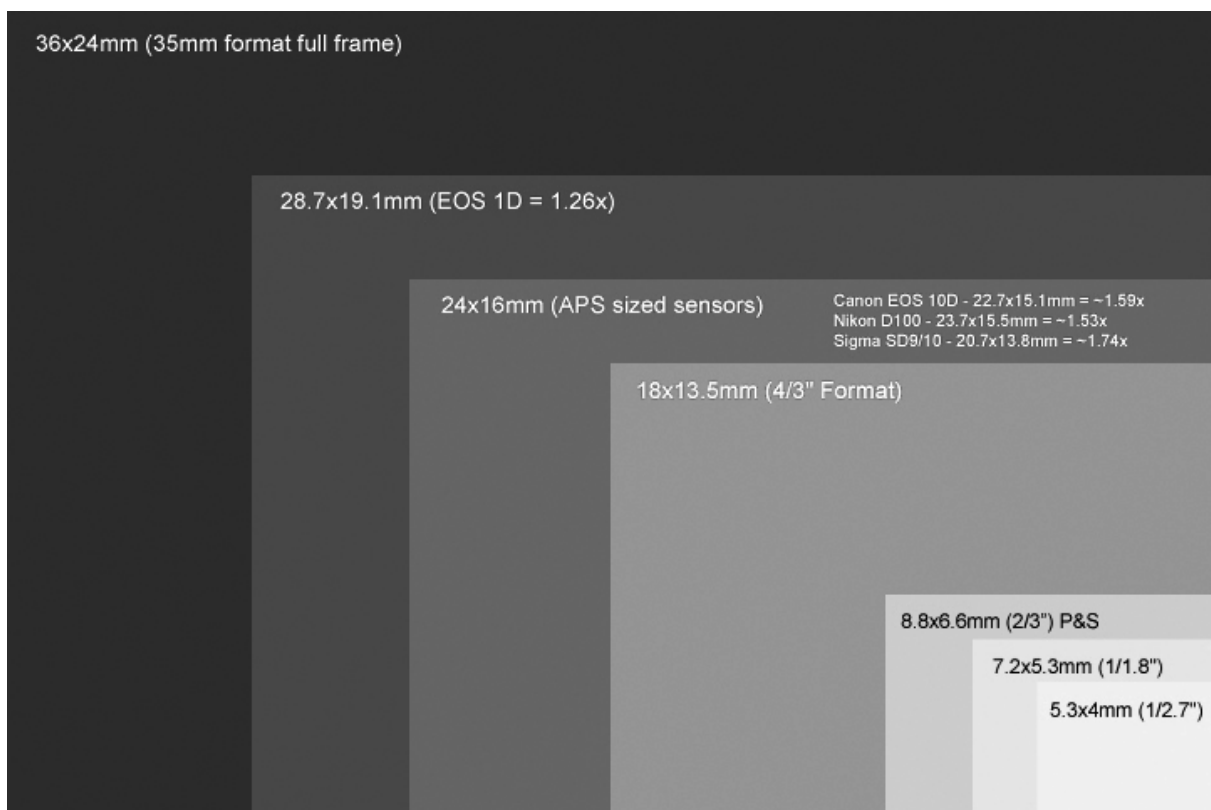
Recordemos el gráfico con las dos MTF que utilizamos para discutir el tema de la calidad de imagen. En el gráfico que sigue hemos representado las resoluciones necesarias de los diferentes sensores para una impresión A4 a 6 pares. Puede observarse fácilmente cómo el nivel de contraste que proporciona un objetivo ideal es mayor a 35 pares para cualquier apertura, y progresivamente menor conforme pasamos a 50 y 75 pares por milímetro. Es obvio que la cámara de formato medio proporcionará una imagen impresa de más calidad, lo que se verifica también para el medio químico.



Curvas MTF, y requerimientos de impresión para distintos tamaños de sensor.

Si en vez de los 6 pares por milímetro consideramos el rango de 0,5 a 2 pares (que determina la percepción subjetiva de calidad, como señalamos en la sección previa), el esfuerzo resolutivo exigido al sensor de 35mm estará comprendido entre 4 y 16 pares, el sensor 4/3 tendrá que resolver entre 8 y 33 pares, mientras que para el sensor APS-C la exigencia será de 7,5 y 26 pares aproximadamente y para el sensor de 37x49mm entre 3 y 12 pares por milímetro. El contraste a esas resoluciones proporcionado por objetivo y sensor debe ser el máximo posible, y cuanto menor sea la exigencia que la impresión impone al sensor mayor será el contraste (basta observar una curva MTF).

Hay quien piensa que en la fotografía digital sólo cuenta el número de píxeles, y que el tamaño del sensor sólo tiene importancia en lo referente al tamaño de las fotocélulas, pero no es así como vemos, pues el tamaño del sensor determina la posición de las líneas amarilla y azul.



Tamaños relativos de los sensores más comunes (formato de 35mm y menores)

Los sensores APS-C tienen aproximadamente la mitad de superficie que los sensores de formato 35mm sin recorte, por lo que, a igual densidad, el número total de 'píxeles' o fotocélulas debe ser el doble. Dicho de otra forma, doble número de fotocélulas en un sensor de doble superficie no altera la frecuencia de muestreo.

Lo que ha venido ocurriendo hasta ahora en las cámaras réflex, como tendencia, es precisamente que la densidad tiende a ser la misma entre sensores de distintos tamaños, y que la diferencia en número de 'píxeles' acaba respondiendo a diferencias de tamaño de los sensores (aunque los sensores más grandes no necesitan frecuencias de muestreo tan altas).

Si llevamos la densidad actual en sensores APS a los de formato completo, tendremos una estimación del número total de píxeles que podemos esperar ver. La densidad de la Canon 20D o 30D supondría 21 millones de 'píxeles' en un sensor de formato 35mm sin recorte (24x36mm), mientras que la densidad de la Nikon D2X daría 28,5 millones de píxeles (864 milímetros cuadrados de superficie de un fotograma de 35mm dividido por los 0,00003025 milímetros cuadrados de cada celdilla de esa cámara). En 2008 ya estamos casi ahí, si bien las cámaras de formato APS-C han dado un nuevo salto en resolución.

Obsérvese que en un sensor de formato completo las dos densidades mencionadas permitirían una diferencia entre resolución de impresión (A4, 6 pares) y frecuencia Nyquist (línea amarilla y línea roja) de $80-50=30$ pares y $90-50=40$ pares respectivamente. Sin embargo, en un sensor de formato (aproximado) APS-C las dos densidades permiten diferencias de sólo $80-75=5$ pares y $90-75=15$ pares respectivamente. En efecto, si llevamos la frecuencia de muestreo a 200 píxeles por milímetro, estaremos hablando de fotocélulas de 5 micras de lado. En un sensor de 24x36mm tendríamos 35 millones de 'píxeles', en las variantes APS unos 17 millones y en un sensor de formato 4/3 casi alcanzaríamos los 10 millones.

Debe tenerse en cuenta que para *duplicar* la capacidad resolutive o frecuencia de muestreo de un sensor hay que *cuadruplicar* el número total de 'píxeles'. Por tanto, si con mucho esfuerzo duplicamos el número de 'píxeles', estaremos elevando la frecuencia de muestreo sólo un 50%, y el incremento en resolución efectiva (considerando el objetivo y los problemas de interpolación y exceso de señal) será incluso menor. Tendemos a caer en el error de pensar que un número doblemente grande de píxeles significa una ganancia doble en algún sentido. Por tanto, hay que tener cuidado cuando uno compara el número total de píxeles que ofrecen dos cámaras diferentes: 16 millones de píxeles supone un incremento de sólo el 15% de capacidad resolutive *teórica* del sensor respecto a 12 millones de píxeles, si ambos tienen el mismo tamaño. Sería el caso de la Canon 1Ds Mark II y la Canon 5D.

Un sensor 4/3 con 10 millones de píxeles (el de la Olympus E-420, E-510 o E-3) representaría un incremento de la frecuencia de muestreo de un 12% aproximadamente si lo comparamos con un sensor del mismo tamaño con 8 millones de píxeles (el de las Olympus E-300, E-330 y E-500). Un sensor APS de casi 17 millones de píxeles supone un incremento de la frecuencia de muestreo del 20% a lo sumo respecto al mismo sensor con 12 millones de píxeles (el de la Nikon D2X o la D300). Esas diferencias pueden ser casi inapreciables en la práctica en lo que respecta al detalle realmente captado (\rightarrow). En cambio, un sensor de formato completo con 35 millones de píxeles representa un incremento de la frecuencia de muestreo de un 75% con respecto al de un sensor de igual superficie con 12 millones de píxeles y más de un 50% respecto de uno con 16 millones de píxeles (Canon 5D o Nikon D3 y Canon 1Ds Mark II respectivamente). El margen para los sensores más grandes es más amplio.

Incrementos adicionales en la densidad de píxeles pueden resultar imposibles a partir de cierto punto sin serios sacrificios en la calidad de imagen debido al ruido fotónico ('photon noise'). Cuanto mayor es la densidad, más pequeña es el área de captura, e inevitablemente la razón señal-ruido decrece. Se pueden reducir otras causas del ruido, o aplicar tratamientos a la imagen más sofisticados, pero obviamente hay límites a lo que podemos lograr por ese camino. No podemos escapar a las leyes de la Física.

Por otro lado, estos cálculos no suponen otra cosa que aplicar densidades ya existentes en sensores actuales a otros más grandes. El avance tecnológico no se detiene y podremos ir más allá. Otra cosa es que las posibilidades de los objetivos lo aconsejen (volveremos a esto más adelante).

El formato medio permite trabajar con sensores aún mayores. Los objetivos para las cámaras de formato 6x6 ó 645 están diseñados para dar un buen rendimiento a frecuencias espaciales menores que los objetivos de 35mm, dada la mayor superficie del fotograma y las menores ampliaciones requeridas para las impresiones (véase [esta](#) página de resoluciones de objetivos de formato medio).

Ronald W. Harris (en las referencias citamos su análisis en dos partes), estudiando el caso de la película, encuentra que 13 pares por milímetro es lo máximo que reproduce determinada clase de papel (*Oriental Seagull Glossy*), y 4 pares lo que se suele captar a simple vista normalmente. A partir de ahí hace sus cálculos, que le llevan a unos requerimientos de 30 pares para el negativo de 35mm y 15 pares para el negativo 6x6 (impresión de 8x10 pulgadas a 4 pares), y 95 pares/45 pares respectivamente (impresión a 13 pares). Cualquiera puede hacer sus propios cálculos en función de otros parámetros.

La situación es la misma en el medio digital. Hay que distinguir entre el tamaño de la foto, en número de píxeles, determinado conjuntamente por la frecuencia de muestreo y el tamaño del sensor (línea amarilla), y la resolución real alcanzada por el sistema, que depende de la frecuencia de muestreo, del objetivo, de las interpolaciones para obtener los colores finales y del exceso de señal, entre otras cosas (línea azul). El problema de conseguir una imagen de tamaño suficiente para una impresión (que la línea roja esté sobre la amarilla o a su derecha) es una cosa, y otra es aprovechar al máximo la capacidad de reproducir detalle del medio impreso (que la línea azul esté sobre la amarilla, o a su derecha), que es lo que Harris trata.

Sabemos que para una impresión A4 ($\approx 8 \times 12$ pulgadas) con detalle real de 300 píxeles por pulgada (casi 6 pares por milímetro), el sensor de 35mm tiene que resolver efectivamente unos 50 pares, y el sensor 37x49mm unos 35 pares (líneas azules). Eso implica frecuencias de muestreo (líneas rojas) aún mayores (puede que hasta un 50%, \geq), porque sabemos que la resolución real es siempre menor a la frecuencia de muestreo. Por tanto, de alguna forma, el tamaño de la foto en número de píxeles debe exceder a las necesidades reproductivas reales (para que la línea azul se acerque a la amarilla la roja tiene que estar más a la derecha). Es un resultado poco intuitivo, en principio, pero el hecho es que parte de la matriz de píxeles de una imagen digital *no contiene información relevante*. En el medio químico ocurre algo similar, pues la capacidad resolutoria máxima de la película excede siempre con mucho el detalle finalmente captado.

Si la impresión A4 debe alcanzar los 13 pares por milímetro de los que hablaba Harris, será necesario resolver efectivamente (redondeando) unos 110 pares por milímetro en un sensor 24x36mm ($\approx 13 \times 8$), mientras que un sensor de 37x49mm (algo inferior a los 42x56mm del formato 645) necesitaría resolver sólo 75 pares ($\approx 13 \times 8 / 1,4$). Sabemos que un A4 a 13 pares por milímetro nos lleva a una imagen de 5460x7722 píxeles, es decir, ¡de unos 42 millones de píxeles! Pero eso sería el mínimo teóricamente necesario, pues sabemos que una cámara digital sólo podría reproducir 13 pares en un A4 con una imagen todavía mayor.

Téngase en cuenta que nuestros números difieren ligeramente de los de Harris por el tamaño del papel que hemos supuesto (un A4 son exactamente 8,3x11,7 pulgadas, de proporciones más próximas a las del fotograma, que son 2:3) y por el recorte en el sensor de formato medio.

El respaldo digital P45 de Phase One (\geq), con un sensor de 37x49mm, tiene nada menos que 39 millones de 'píxeles' (de 6,8 micras de lado), lo que satisface las exigencias de casi

cualquier impresión. En efecto, la frecuencia de muestreo es de 73,5 pares de píxeles por milímetro (línea roja), más del doble de los 35 pares que se necesitan para un A4 a 6 pares (300 píxeles por pulgada) a partir de ese sensor (línea amarilla). En comparación, 22 millones de 'píxeles' en el mismo sensor suponen una frecuencia de muestreo de 55 pares por milímetro ('píxeles' de 9 micras) y 18 millones de 'píxeles' uno de 50 pares ('píxeles' de 10 micras de lado), lo que deja un margen amplio para que la resolución real (línea azul) alcance los 35 pares que es capaz de mostrar un A4 impreso a 6 pares por milímetro.

Veámoslo desde otro punto de vista. Siendo prácticos, tomando como referencia los criterios de Zeiss (véase Kämmerer, J. 1979. When is it advisable to improve the quality of camera lenses? Optics & Photography Symposium, Les Baux, 1979 (->)), que estableció los 40 lp/mm como valor clave para proporcionar una buena sensación de nitidez en el papel a partir del formato de 35mm, y los múltiplos del límite de Nyquist, que nos indica la necesidad de una frecuencia de muestreo *mínima* para obtener una reproducción exacta, podemos calcular qué resoluciones podemos esperar en los sensores de ese formato que, después de casi 80 años, sigue ejerciendo una poderosa influencia. Asumamos la norma de muestrear a la frecuencia Nyquist o ligeramente por encima de ella (2 ó 3 píxeles por ciclo). Es obvio que 80 lp/mm son 160 l/mm, lo que nos lleva a un sensor 24x36mm con 3.840x5.760 "píxeles", es decir, poco más de 22 millones de píxeles en total (x1 Nyquist). Hay que tener también en cuenta la interpolación Bayer, los filtros antialias y demás. Eso supone, para el formato de 35mm, "píxeles" con un espaciado algo mayor de 6 micras. Si concedemos un margen adicional y adoptamos 100 lp/mm, el formato de 35mm nos dará 34,5 millones de "píxeles".

La necesidad de captar más detalle ha venido hasta ahora de la mano de una necesidad de mayores tamaños de imagen (en número de píxeles) y mayores frecuencias de muestreo en los sensores. Pero, alcanzado ya un punto, existen formas mejores de incrementar la resolución real sin seguir aumentando el tamaño de las imágenes. Tenemos un ejemplo en los sensores Foveon, que consiguen reproducir el mismo detalle con menos píxeles (->), o más detalle con los mismos, sólo con evitar la interpolación a partir del mosaico Bayer.

[Efraín García](#) y [Rubén Osuna](#) ©