

Fundamentos de fotografía digital

Efraín García y Rubén Osuna ©

10. Consideraciones adicionales sobre las diferencias entre formatos.

Olympus ha propuesto un nuevo formato, llamado Cuatro Tercios (\geq), relativamente pequeño pero aprovechado al límite, basado en objetivos con unas excelentes prestaciones gracias a un diseño de gran calidad (de tipo *telecéntrico* en el plano de la imagen, que supone situar la pupila *de salida* en el infinito, $\geq \geq, \geq$). La telecentricidad depende de tres factores: un diseño óptico que favorece un tránsito paralelo de los haces de luz; la distancia de la última lente al plano focal (que varía en los objetivos de longitud focal variable); y el diámetro de esa última lente (limitado por el de la montura).

El concepto de Olympus hace posible proporcionar un nivel de resolución y contraste similar al de formatos mayores *en impresiones de tamaño moderado* (A4 o menores). Olympus tomó en 1999 (\geq) como punto de referencia la calidad de imagen potencial del formato APS-C –que en aquel momento casi todos consideraban el nuevo estándar– o de la película de 35mm. Probablemente tenían también en mente los equipos cinematográficos para formato 35mm como modelo, en el sentido de hacer del sistema óptico el eslabón fuerte de la cadena. El tamaño del sensor es de 13,5x18mm (de proporciones 2:2,7 = 1:1,35), que tiene 3,6 veces menos superficie que el sensor de formato 35mm sin recorte y una diagonal de 22,5mm.

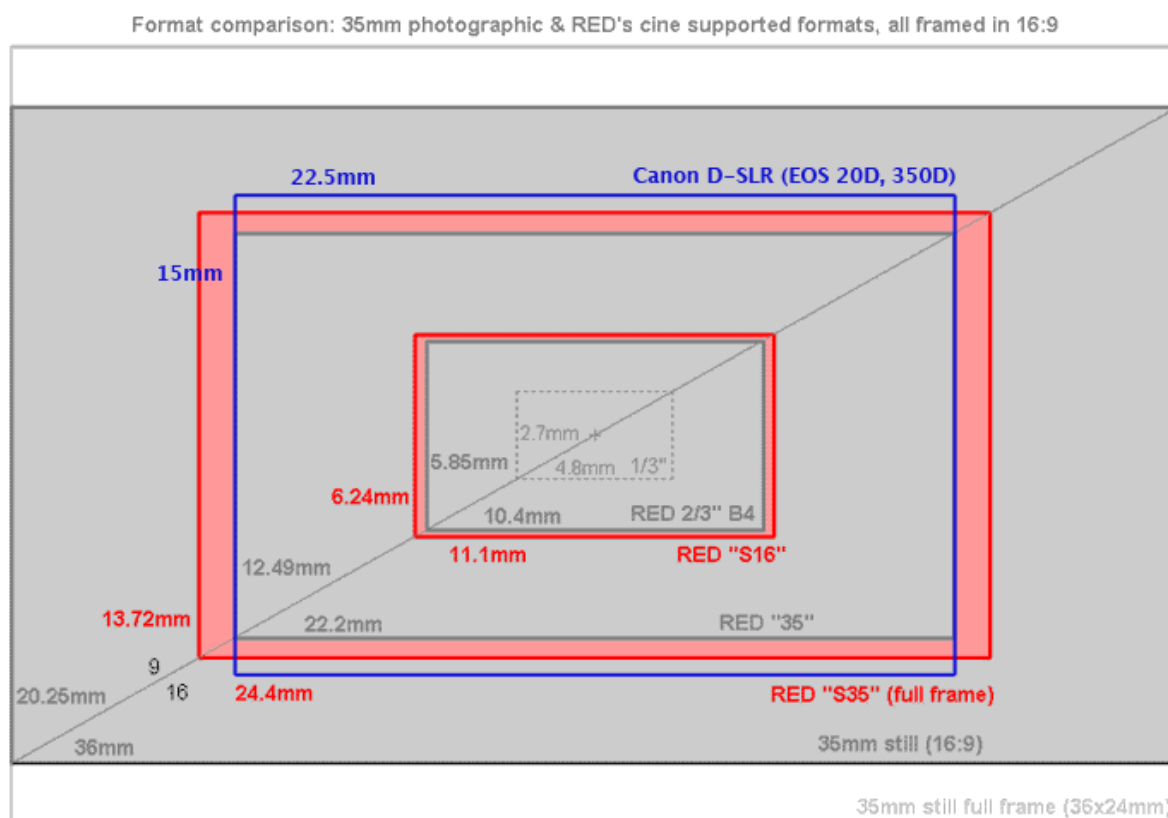
Aunque el soporte fílmico para el formato fotográfico de 35mm y para el formato cinematográfico de filmación es el mismo, el tamaño del negativo es distinto, ya que el recorrido de la película es horizontal en el primer caso y vertical en el segundo (salvo excepciones como el *VistaVision*, que se sigue usando hoy día para rodar escenas con efectos especiales). Los formatos cercanos al APS-C y al Cuatro Tercios, curiosamente, acercan el cine y la fotografía en este aspecto. Las distintas variantes cercanas al formato APS-C son en cierto sentido más *cinematográficas*, en el sentido de más cercanas en tamaño al *35mm Academy Aperture* (16x21,95mm, de proporciones 1:1,37 y diagonal 27,2mm), y los cineastas se sentirán cómodos con los parámetros asociados al mismo (por ejemplo, con la relación entre longitud focal y ángulo de visión de los objetivos). En cambio, el Cuatro Tercios tiene *proporciones* más parecidas al *35mm Academy*, pero el tamaño del formato de captura es algo menor.

El formato *35mm Academy Aperture* es de captura, y proviene de una especificación de Thomas Edison (24,89x18,67mm, proporciones 1:1,33 y diagonal de 31,1mm) empleada en el cine mudo, que después (en 1932) se corrigió para incluir una banda de sonido, reduciéndose el tamaño y alterándose ligeramente las proporciones. Otra cosa son las proporciones de salida (o de proyección), muy distintas, y variadas. Van desde el 3:4 (o 1:1,33) para televisión a los rectangulares para salas de cine, de proporciones 1:1,66 (usual en Europa), 1:1,78 (nuevo estándar para cine y televisión, también conocido como 16:9), 1:1,85 (más usual en Estados Unidos) o incluso 1:2,35 (CinemaScope) (\geq). Esas proporciones se pueden conseguir de dos formas: enmascarando el negativo en el momento de proyectar (\geq), o enmascarándolo en el momento de filmar. Lo primero ha sido más usual en Estados Unidos, y lo segundo en Europa. Para colmo, hay formatos que emplean procedimientos más complicados, como el *Super 35mm*, que recupera el formato de Edison para ganar superficie (un 32%) y lo recorta después para ganar rectangularidad (24,4 x 13,7mm), llegando incluso a unas proporciones 1:2,39 (con lo que queda un área de captura de sólo 10x24mm, diagonal de 26mm), lo que permite comprimir lateralmente la imagen en

el laboratorio y conseguir un resultado similar al que permiten los objetivos anamórficos, pero evitándolos (eso sí, a cambio de un área de captura menor). Este formato *Super 35mm* (S35mm) está muy extendido en las modernas cámaras cinematográficas digitales, como las [RED](#). Por tanto, ni las proporciones ni el tamaño del *35mm Academy* son el único punto de referencia a tener en cuenta.

	Proporciones	X	Y
Academy Aperture (captura)	1,37:1	22.0mm (0.827")	16.0mm (0.600")
Widescreen Academy (proyección)	1,85:1	21.0mm (0.825")	11.3mm (0.446")
Super 35 (captura)	1,33:1	24.92mm (0.981")	18.67mm (0.735")
Cinemascope (captura)	2,39:1	20.95mm (0.827")	17.53mm (0.689")

Visualmente:



Los sensores de 10 millones de fotocélulas de las cámaras Olympus tienen la frecuencia de muestreo más elevada conocida en cámaras réflex (unos 100 pares de píxeles por milímetro). El sistema está basado en la idea de una montura de gran diámetro y distancia respecto al sensor, en proporción a la diagonal de éste.

La distancia entre la montura y el plano focal (*lens to flange distance*, LTF) es, en el estándar 4/3, de 38,7 milímetros, mientras que el diámetro del círculo de luz (diagonal del sensor) es de 22,6 milímetros, siendo la proporción igual a 1,71 ($= 38,7/22,6$). El diámetro de la montura es *el doble* del diámetro del círculo de luz, y no ligeramente mayor, como en los

sistemas convencionales, con lo que se relaja una restricción que afecta al diámetro de la última lente de los objetivos. La montura 4/3 es mecánicamente una copia de la montura OM, con una distancia montura-plano focal más corta. Por ello el adaptador 4/3-OM es un simple tubo de extensión (->).

Como sabemos, en el formato de 35mm el diámetro del círculo de luz es de 43 milímetros, mientras que la distancia de la montura al plano focal depende de cada fabricante, siendo de 47 milímetros en el sistema R de Leica (proporción igual a 1,09), de 28 milímetros en el sistema M de Leica (cámaras telemétricas, sin espejo, proporción igual a 0,65), de 44 milímetros en el sistema EOS de Canon (proporción igual a 1,02) y de 46,5 en el sistema réflex de Nikon con montura F (proporción de 1,08) (->).

Los parámetros del estándar 4/3 garantizan una escasa inclinación de los haces de luz, que inciden perpendicularmente sobre la superficie del sensor. Es exactamente la misma idea que lleva a Nikon a defender un formato reducido (llamado DX, una variante de APS de dimensiones 23,6x15,8mm) para sus réflex digitales, conservando la montura (el diámetro del círculo de cobertura pasa a ser de 28,4mm, y la proporción 1,64). Los recortes en el tamaño de los sensores incrementan esa proporción, que puede considerarse un *factor de telecentricidad* potencial del sistema. Sin embargo, esa mayor distancia relativa de la montura respecto al plano focal obliga a adoptar diseños *retrofoco* (como sabemos, un teleobjetivo vuelto del revés, por explicarlo de forma simple y gráfica) para todos los objetivos gran angulares. Dichos diseños son complejos, requieren más lentes e implican objetivos de más tamaño y peso, resultando más difícil conseguir luminosidades altas (números *f* bajos), aunque facilitan la telecentricidad. Como vemos, la valoración de la conveniencia de ésta depende de cada fabricante. Con su formato de 35mm sin recorte Canon considera suficiente una proporción igual a 1 y Leica ha encontrado la forma de cumplir con sus criterios de calidad en la M8 (factor de recorte $q = 1,33$) con una proporción de 0,86 (= 0,65*1,33). En cambio, en su día Nikon y Olympus la elevaron por encima de 1,5, sacrificando las dimensiones de sus formatos (factores de recorte de 1,5 y 2 respectivamente), aunque Kodak ha fabricado cámaras réflex con la montura F de Nikon y sensores de formato 35mm sin recorte. La siguiente tabla resume estos datos:

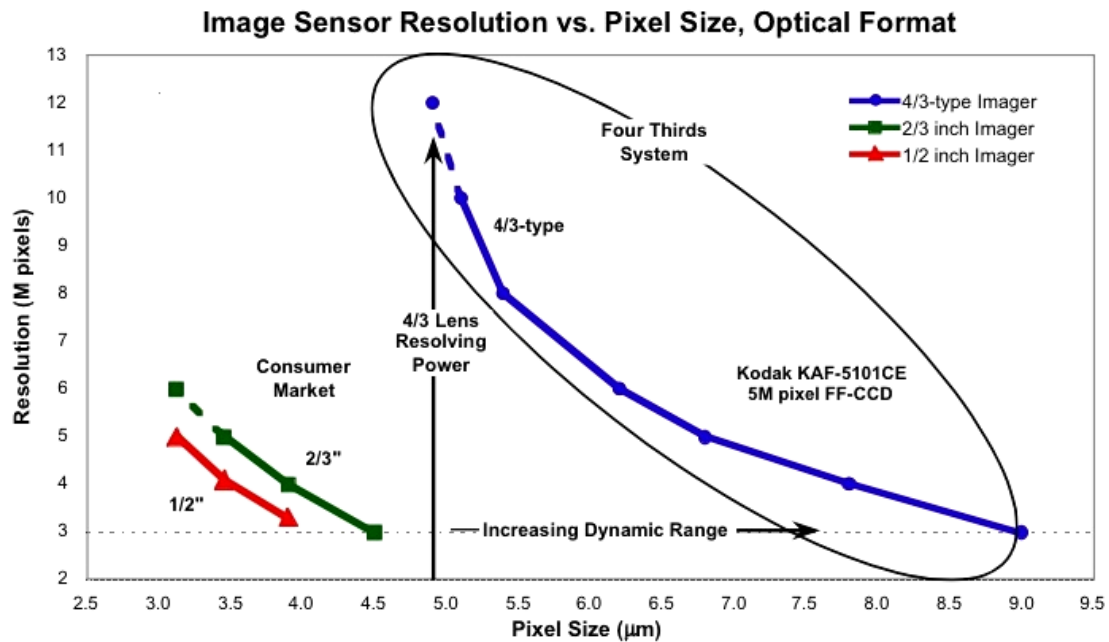
Montura y formato	Distancia montura-sensor (mm)	Diagonal del sensor (mm)	Coefficiente de telecentricidad
	A	B	C = A/B
Nikon F/35mm	46,50	43,3	1,07
Nikon F/DX	46,50	28,4	1,64
Canon EOS/35mm	44,00	43,3	1,02
Canon EOS/APS-C	44,00	27,0	1,63
Contax N/35mm	48,00	43,3	1,11
Pentax K/35mm	45,46	43,3	1,05
Pentax K/APS-C	45,46	28,3	1,61
Minolta AF/35mm	44,50	43,3	1,03
Minolta AF/APS	44,50	28,4	1,57
Olympus OM/35mm	46,00	43,3	1,06
Olympus 4/3	38,67	22,5	1,72
Leica R/35mm	47,00	43,3	1,09
Leica R/1.37 crop	47,00	31,7	1,48
Leica M/35mm	27,95	43,3	0,65
Leica M/1.33 crop	27,95	32,4	0,86

El volumen de un objetivo relativo al diámetro de su círculo de luz es una restricción muy poderosa con la que el diseñador óptico tiene que trabajar. Los Zuiko de Olympus son pequeños comparados con objetivos equivalentes diseñados para el formato de 35mm, pero muy voluminosos comparados con la diagonal del sensor que cubren. A continuación puede verse un Canon 28-70mm f/2,8 L comparado con un Zuiko 14-54mm (equiv. 28-100mm) f/2,8-3,5. Como puede apreciarse, la diferencia de tamaños es notable, pero en proporción al sensor que cubre con su círculo de luz, el Zuiko de Olympus es un objetivo enorme. No podía ser de otra forma, si tenemos en cuenta que, para ser competitivo, el formato 4/3 tiene que resolver el mismo detalle que formatos más grandes en menos espacio (mayor capacidad resolutive), y ello con un rango de aberturas más limitado (no es aconsejable cerrar más allá de f/11), lo que obliga a alcanzar un alto grado de corrección de las aberraciones. Esta es otra de las causas por las que resulta complicado desarrollar objetivos muy luminosos de focal corta para este formato.



Canon 28-70mm f/2,8 L vs. Zuiko 14-54mm (equiv. 28-108mm) f/2,8-3,5 ([Valentín Sama©](#))

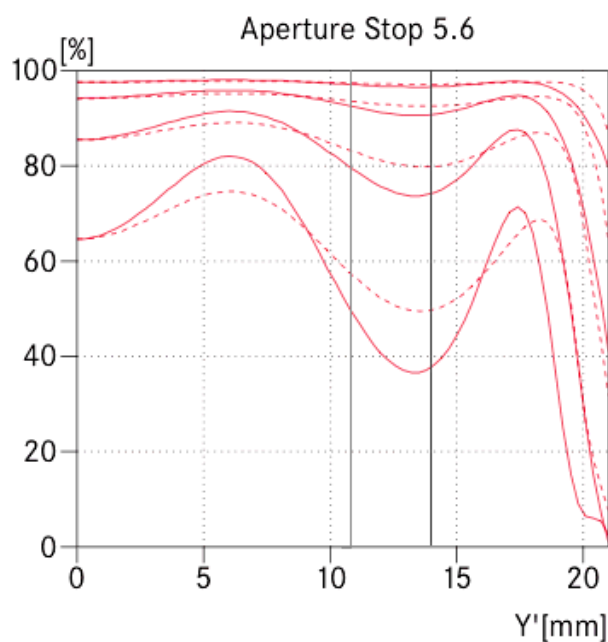
Las restricciones en cuanto a número de ‘píxeles’ admisibles por los sensores y el rendimiento a altas sensibilidades (valores ISO) son las mayores limitaciones del formato. Lo mismo podría decirse de otras cámaras con sensores más pequeños que el fotograma de 35mm equipadas con objetivos diseñados específicamente para ellos. Por tanto, es posible compensar un menor tamaño de sensor con una buena óptica, pero sólo hasta cierto punto, dependiendo de la diferencia de tamaño entre sensores y del tamaño de la impresión. Recomendamos una interesante reflexión de Lars Kjellberg sobre comparación de formatos ([->](#)), y un análisis de Erwin Puts sobre la importancia relativa de los objetivos en el medio digital ([->](#)).



Los límites previstos del sistema Cuatro Tercios de Olympus ([Kodak©](#)).

Por otro lado, supeditar el diseño de un sistema al objetivo de conseguir una escasa inclinación de los haces de luz que inciden en el sensor podría tener sentido al principio de la revolución digital, pero la tecnología ha avanzado y las microlentes permiten incluso el desarrollo de cámaras telemétricas digitales, por no hablar de cámaras con sensores de 24x36mm que ofrecen un rendimiento igual o mejor que la película química en lo que a viñeteo se refiere. Véase [esta](#) prueba de una Canon 1Ds con un 16-35mm f/2,8L a 16mm, o [esta](#) que compara los resultados de la Canon 5D y la Canon 20D con un zoom EF 24-70mm f/2,8L y EF 50mm f/1,4.

Nos detendremos un poco más en este tema de la diferencia entre formatos para tratar de profundizar un poco más en él. Observemos el siguiente gráfico, que representa unas curvas MTF clásicas, radiales y tangenciales para cuatro resoluciones básicas (5, 10, 20 y 40 pares por milímetro), con el nivel de contraste en el eje de ordenadas (vertical) y la distancia respecto al centro del círculo de imagen en el eje de abscisas (horizontal). El objetivo es un Noctilux-M 50mm f/1 de Leica, que cubre con su círculo de luz un fotograma de paso universal, cuyo radio es de 21,6 milímetros. Puede observarse cómo, incluso para una abertura moderada de f/5,6, el nivel de contraste se deteriora sensiblemente hacia las esquinas. Si empleáramos una película o sensor de tamaño menor ese deterioro se evitaría (->). Hemos trazado dos líneas verticales, una situada aproximadamente a los 11,3 milímetros, que es el radio del círculo de luz de un objetivo de formato 4/3, y otra a 14,4 milímetros, el radio de un círculo de luz adaptado a un sensor de formato APS (16x24 mm). Puede observarse cómo el nivel de contraste transmitido por el objetivo en las esquinas de esos sensores es muy superior al nivel de contraste en las esquinas del sensor sin recorte. Con algunas aberraciones ocurre exactamente lo mismo.

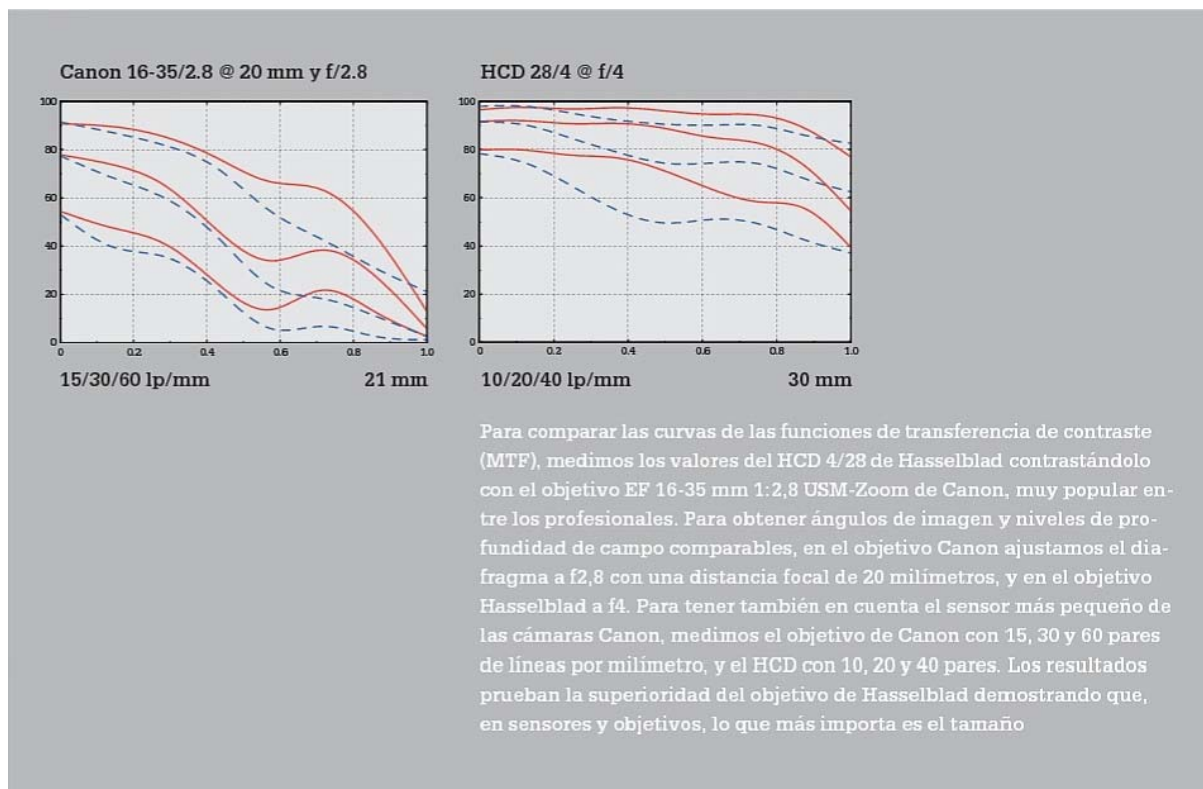


Curvas MTF de una Leica Noctilux 50mm f/1 a una abertura de f/5,6 ([Leica Camera AG](#)©).

El argumento es válido, pero incompleto, pues la otra forma de representación de las MTF, con la resolución en el eje horizontal en vez de la distancia al centro del fotograma, nos cuenta la otra mitad de la historia: un formato mayor necesita resolver *menos* detalle en el sensor (o la película) para alcanzar un determinado nivel de detalle en la impresión, como hemos explicado ya. Dicho de otro modo, para poder comparar con un formato más pequeño habría que trazar para éstas curvas de transferencia de contraste *equivalentes* que tengan en cuenta la mayor ampliación a que se somete la imagen de un formato menor para una impresión dada (\rightarrow). Lo usual es encontrarse con curvas de transferencia de contraste para 5, 10, 20, 30 y 40 pares por milímetro o cualquier selección de esos números en el caso de objetivos para el formato 35mm. Obsérvese que 40 dividido por 8 (factor de ampliación) nos da 5 pares por milímetro en una impresión 8x12, que es más de lo que el ojo humano puede resolver a simple vista.

Para poder comparar esas curvas con las de un objetivo APS hay que tener en cuenta el factor de recorte ($q = 1,5$) de manera que las correspondencias serían 7,5, 15, 30, 45 y 60 pares por milímetro. Los objetivos de formato 4/3 ($q = 2$) pueden ver comparadas sus curvas MTF con las del formato de 35mm si se trazan para 10, 20, 40, 60 y 80 pares por milímetro. Sin embargo, Nikon sólo presenta curvas para 10 y 30 pares en su documentación de los objetivos DX (\rightarrow), que corresponderían a curvas para 7 y 20 pares en formato 35mm. Por su parte, Olympus sólo las ofrece a 20 y 60 pares por milímetro (\rightarrow) para sus objetivos Zuiko, que serían comparables sólo con curvas trazadas para 10 y 30 pares en formato 35mm.

Hasselblad lo explica así al comparar su objetivo 28mm f/4 con un Canon 16-35mm f/2,8 (a 20mm) en la revista Víctor (1/2008):



En principio, las curvas *equivalentes* de los formatos más pequeños estarán situadas *por debajo* de las correspondientes al formato más grande, pues se miden o calculan para resoluciones superiores. Un ejemplo extremo serían los objetivos de las cámaras compactas, que deben alcanzar altísimas resoluciones, y ello con aberturas relativamente grandes, pues no es posible dotarlos de números *f* muy altos (aberturas muy cerradas), por lo que el grado de corrección de aberraciones debe ser también muy elevado.

Si hablamos de un objetivo diseñado para un formato mayor y empleado en un formato menor, *dos* son los efectos del recorte a tener en cuenta. Primero, los bordes del círculo de luz se descartan, con lo que nos quedamos con un círculo de luz más pequeño, donde el rendimiento del objetivo es mayor. Segundo, por otro lado, las curvas relevantes para resolver determinado nivel de detalle son otras, trazadas para resoluciones superiores y situada bajo las curvas originales, como hemos visto. El efecto conjunto, que es el rendimiento del objetivo sobre el formato recortado, es *muy diferente* del rendimiento sobre el formato original, como explica detalladamente Erwin Puts (->).

Podemos volver a una fórmula, presentada ya en la primera sección, según la cual la resolución del sensor, vendrá dada por la resolución que queremos en el papel multiplicada por la razón de las diagonales de la impresión y el formato de captura, sólo que esta vez fijamos un formato de referencia e introducimos un factor de recorte

$$R_s = r_f * (D/d_1) * q$$

donde R_s es la resolución que debe alcanzar el sistema (objetivo y sensor) en pares por milímetro, r_f es la resolución final en el papel en pares por milímetro, D es la diagonal de la fotografía impresa, d_1 la diagonal del fotograma o sensor de referencia (que puede ser 43mm) y $q (= d_1/d_2)$ el factor de recorte del formato en que estemos interesados respecto del

formato de referencia. Es obvio que cuanto mayor sea q mayor tendrá que ser también R_s dados unos valores cualesquiera para las otras dos variables. Ese menor esfuerzo resolutivo de los formatos más grandes se traduce generalmente en mayores niveles de contraste para una resolución cualquiera en el papel impreso, o en resoluciones superiores para un nivel de contraste dado.

No obstante, se dice que los formatos pequeños pueden presumir de una ventaja interesante en teleobjetivos respecto de los formatos mayores, aunque, como todo, es una verdad a medias que hay que matizar.

En efecto, dado que la abertura regula no sólo la cantidad de luz que puede acceder al sensor por unidad de tiempo, sino también la profundidad de campo, la proclamada ventaja sería esta: para conseguir un mismo ángulo de visión y una misma profundidad de campo, el formato menor requiere una focal menor y una mayor abertura que el formato mayor, y por tanto consigue la profundidad de campo deseada con un tiempo de exposición menor (o con una sensibilidad equivalente ISO menor).

En general, podemos decir que hay que *dividir la abertura por el factor de recorte* para hallar la 'abertura equivalente' (en términos de 'profundidad de campo'), de la misma forma que se hace con la 'longitud focal equivalente' (en términos de 'ángulo de visión').

Las fórmulas para la profundidad de campo introducidas en la sección 6 muestran esto con toda claridad. Allí vimos que la profundidad de campo dependía de la distancia a la que enfocamos (s) y de la distancia hiperfocal (H), que venía dada por $H = L^2 / (f * CoC)$. Imaginemos dos formatos cualesquiera para los que $CoC_2 = CoC_1 / q$, donde $q (=d_1/d_2 > 1)$ es el factor de recorte. Es obvio que las distancias hiperfocales se igualarán si dividimos la longitud focal y la abertura por q para el formato menor, de manera que $H = L^2 / (f * CoC_1) = (L/q)^2 / [(f/q) * CoC_2]$. Por consiguiente, igualando el ángulo de visión y tomando una abertura proporcional al factor de recorte, *las dos cosas*, dada una distancia de enfoque, igualamos las profundidades de campo.

Tenemos pues que una abertura $f/2$ en un objetivo para el formato 4/3 de Olympus ($q = 2$) *equivale en términos de profundidad de campo* a una abertura $f/4$ en un objetivo de 35mm sobre un sensor de ese formato sin recorte, dado un mismo *ángulo de visión*. Para conseguir el control sobre la profundidad de campo que da una abertura $f/2$ en el formato de 35mm, un objetivo 4/3 con ángulo de visión equivalente necesitaría una abertura $f/1$. Por ejemplo, un 28mm $f/2$ en formato de 35mm equivaldría, en cuanto a ángulo de visión y profundidad de campo, a un 14mm $f/1$ en formato 4/3; pero también un 200mm $f/2,8$ en paso universal equivaldría a 100mm $f/1,4$ en 4/3.

Por tanto, la única ventaja de los formatos menores, en cuanto a profundidad de campo, es que si necesitas más, el formato menor te la puede brindar con una abertura mayor, lo que posibilita reducir el tiempo de exposición o utilizar una sensibilidad equivalente ISO menor en el sensor. Esta parte de la historia, por tanto, es cierta. Sin embargo, si bien los formatos más pequeños ofrecen menores ángulos de visión con mayor luminosidad, también es verdad que no pueden igualar esa oferta para los grandes angulares, como muestra la siguiente tabla de objetivos *actualmente en producción*:

	Canon	Nikon DX	Olympus 4/3
Formato:	24 x 36mm	15,8 x 23,6mm	13,5 x 18mm
Recorte respecto al formato de 35mm	$q = 1$	$q = 1,5$	$q = 2$
Longitud focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos rectilíneos	12mm (Sigma 12-24/4,5-5,6) (->) 14mm (Canon 14/2,8L) (->)	18mm (Sigma 12-24/4,5-5,6) (->) 18mm (Nikon 12-24/4,0) (->)	14mm (Zuiko ED 7-14/4,0) (->)
Longitud focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos f/1,4	24mm (Canon 24/1,4L) (->) 35mm (Canon 35/1,4L) (->)	42mm (Nikon 28/1.4) (->)	50mm (Leica D 25/1,4) (->) 60mm (Sigma 30/1,4) (->)
Longitud focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos f/2	28mm (Canon 28/1,8) (->) 35mm (Canon 35/2,0) (->)	52,5mm (Nikon 35/2) (->)	70mm (Zuiko 35-100/2,0) (->) 48mm (Sigma 24/1,8) (->)
Longitud focal más corta en términos del formato de 35mm para objetivos descentrables	24mm (Canon 24/3,5L Tilt and Shift) (->)	157,5mm (Nikon 105/2 DC) (->)	-
Longitud focal más larga en términos del formato de 35mm	1.200mm (Canon f/5,6L) (->)	900mm (Nikon 600/4,0) (->)	600mm (Zuiko 300/2,8) (->) 1.600 mm (Sigma 300-800/5,6) (->)
Longitud focal más larga en términos del formato de 35mm para objetivos f/2	135mm (Canon 135/2,0L) (->)	300mm (Nikon 200/2,0) (->)	300mm (Zuiko 150/2,0) (->)
Longitud focal más larga en términos del formato de 35mm para objetivos f/2,8	400mm (Canon 400/2,8L) (->)	600mm (Nikon 400/2,8) (->)	600mm (Zuiko 300/2,8) (->)

Además, no hay que precipitarse y suponer que una mayor luminosidad del objetivo implica necesariamente una mayor razón señal-ruido (->). Recordemos que los valores para una exposición correcta son los mismos independientemente del formato. Por tanto, si el exposímetro nos da un par de valores (abertura-tiempo de exposición), éstos serán válidos para cualquier cámara.

A igual apertura, bajo el supuesto de una *transmisión lumínica* igual (ver 1.1), la cantidad relativa de luz que alcanza el sensor en formatos diferentes por unidad de tiempo viene determinada por el factor de recorte q , es decir, en un segundo y a una apertura de f/2 un sensor de formato 4/3 recogerá $1/q^2 = 4$ veces menos luz que un sensor de formato 35mm sin recorte, donde q es la razón entre las diagonales de los sensores en este caso ($q = 2$). Así pues, si el número de píxeles es el mismo, los formatos más pequeños construyen una imagen final *de igual tamaño* a partir de mucha menos información. Ningún avance en electrónica puede cambiar esto. La fórmula sería

$$SNR_2 = SNR_1 / q^2 = SNR_1 / (d_1/d_2)^2$$

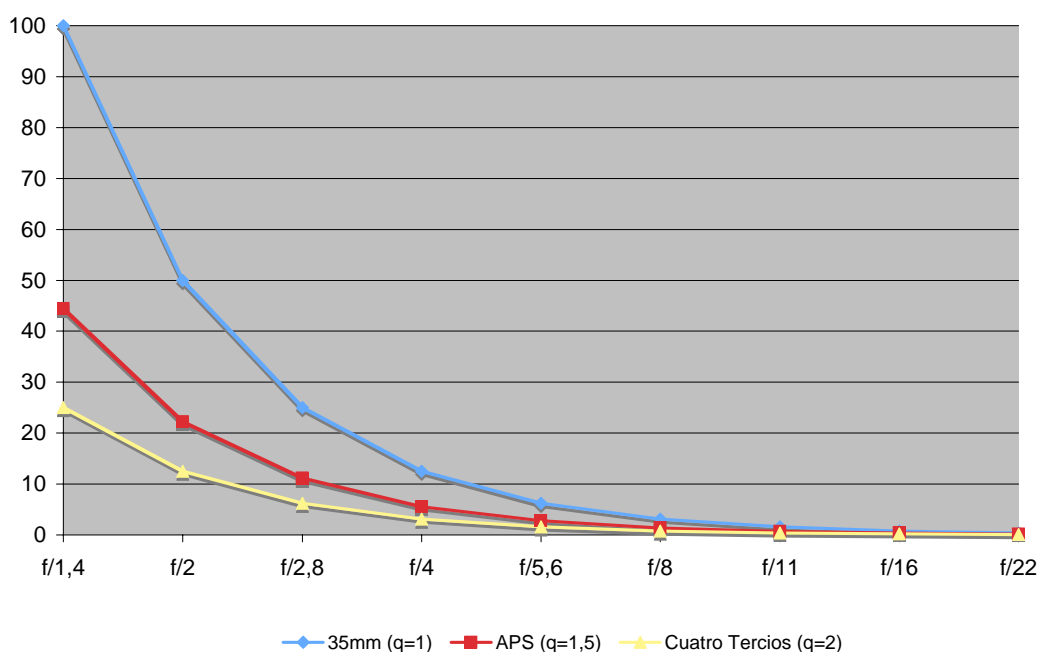
donde SNR es la razón señal-ruido, q es el factor de recorte, igual a la razón de las diagonales de los formatos (d_1 y d_2 , donde $d_1 > d_2$), suponiendo que el número de píxeles es el mismo y que todos los factores que afectan a la razón señal-ruido distintos del ruido fotónico (*photon noise*) no cambian con el formato. Es obvio que el deterioro de la razón

señal-ruido por píxel se agrava aún más cuando se emplean mayores sensibilidades (valores ISO superiores, [->](#)) en los formatos más pequeños.

Por consiguiente, la única forma de igualar, para cada abertura, la cantidad de luz que llega a cada 'píxel' sería reducir el número de estos en los formatos menores por un factor de $1/q^2$. Por ejemplo, un sensor de tipo 4/3 debería tener *cuatro veces menos 'píxeles'* —es decir, ¡la misma frecuencia de muestreo!— que un sensor de formato 35mm sin recorte, para de esa forma garantizar la misma cantidad de señal *en cada celdilla*.

Volviendo a un ejemplo previo, una cámara con un sensor de formato 4/3 y un objetivo 100mm f/1,4 sería equivalente a otra con un sensor de formato 35mm y un objetivo de 200mm f/2,8 en términos de ángulo de visión, profundidad de campo y razón señal-ruido sólo si *además* el número de 'píxeles' de la primera es cuatro veces menor al de la segunda, aunque en ese caso la resolución no sería ya la misma. *Una equivalencia completa entre formatos es imposible*.

Hay que señalar algo más: conforme se cierra el diafragma la cantidad de luz recogida se reduce rápidamente en todos los formatos y las diferencias relativas entre formatos *tienden* a desaparecer, es decir, con aberturas de f/16 en adelante las diferencias entre los formatos se hacen muy pequeñas, en lo relativo a profundidad de campo y *señal recibida en cada píxel*. El siguiente gráfico muestra cómo la cantidad total de luz transmitida al sensor por unidad de tiempo cae al cerrar el diafragma, pero también, lógicamente, con el tamaño del sensor (suponemos la misma *transmisión lumínica* para cada objetivo, concepto que vimos en 1.1). Hemos comparado tres formatos.



Índices del total de luz transmitida (100 es la cantidad correspondiente al formato de 35mm a f/1,4) ([Leica Fotografie International©, LFI, 3/2006](#)).

La siguiente tabla muestra los cálculos, para los que hemos aplicado la sencilla regla de multiplicar los valores para el formato de 35mm por $1/q^2$ para pasar a un formato menor, donde q es el factor de recorte o razón entre las diagonales de los formatos. Hemos supuesto una misma longitud focal equivalente (la que sea). Los valores de la columna dedicada al formato de 35mm están normalizados, pues se le ha asignado un valor 100 a la primera casilla, dividiendo cada valor por 2 para obtener el siguiente (cada paso de diafragma reduce la cantidad de luz por unidad de tiempo y superficie en la mitad, como vimos en su momento). Obsérvese que la diferencia en términos absolutos entre formatos se reduce conforme cerramos el diafragma y que el valor absoluto para los formatos más pequeños tiende a cero rápidamente (y esta es *otra* de las causas, además del tamaño del círculo de confusión, por las que éstos no alcanzan números f muy altos).

	(1)	(2)	(3)	
Abertura	35mm (q=1)	APS (q=1,5)	Cuatro Tercios (q=2)	Diferencia (1) - (3)
f/1,4	100	44,4	25	75,0
f/2	50,0	22,2	12,5	37,5
f/2,8	25,0	11,1	6,3	18,8
f/4	12,5	5,6	3,1	9,4
f/5,6	6,3	2,8	1,6	4,7
f/8	3,1	1,4	0,8	2,3
f/11	1,6	0,7	0,4	1,2
f/16	0,8	0,3	0,2	0,6
f/22	0,4	0,2	0,1	0,3

Alteración del índice de cantidad de luz transmitida (formato 35mm, f/1,4) en función de los distintos formatos y las aberturas.

La profundidad de campo está estrechamente relacionada con estos valores de transmisión efectiva de luz. Obsérvese que un sensor de formato Cuatro Tercios recibe por unidad de tiempo a $f/2$ la misma cantidad de luz que un sensor 24x36mm a $f/4$. Las profundidades de campo se igualan para los pares de formato y abertura en los que esos índices de transmisión lumínica son también iguales.

Para más detalles puede consultarse el excelente artículo de Peter Karbe, citado al final, o una referencia indispensable de R. N. Clark ([->](#)).

Para resumir, diremos que hay cuatro parámetros básicos en la comparación de dos formatos: *ángulo de visión*, determinado por la focal real relativa a la diagonal del sensor; *luminosidad*, determinada por la abertura máxima; *profundidad de campo*, que depende de abertura, distancia al motivo, focal, formato y tamaño de impresión; y *razón señal-ruido*, que depende (simplificando) del número de fotones capturado en cada 'píxel'. Estos dos últimos factores están íntimamente ligados a la variable 'transmisión de luz', que es la cantidad de luz que el objetivo transmite al conjunto del sensor por unidad de tiempo. Una equivalencia *total* entre formatos es imposible.

Volvamos a tomar ahora, y para cerrar, el tema de la resolución. Se ha considerado, a partir de estudios empíricos de Zeiss, que 40 lp/mm de detalle real era un valor clave para la percepción de calidad en una imagen fotográfica, para el formato de 35mm e incluso el formato medio ([->](#)). Podríamos emplear el argumento del círculo de confusión para fundamentar los cálculos, como se suele hacer normalmente ([->](#)), y como vimos ya en la primera sección. El teorema de Nyquist obliga a sobremuestrear, pero no sabemos cuánto. Depende del motivo, de la interpolación Bayer, y de muchos factores más. R. N. Clark habla en su ejercicio de triplicar la frecuencia Nyquist (x3) al escanear un patrón de pares de líneas, nada menos (el teorema de Nyquist *no* se aplica tal cual a estos casos). Normalmente, en motivos típicos fotográficos, es suficiente con aplicar un factor x1,5. Nosotros hemos elaborado una tabla comparativa de formatos con distintos casos, bajo el supuesto de un sensor monocromático: la resolución necesaria para resolver esos 40 lp/mm (o equivalentes) bajo el supuesto de que la frecuencia Nyquist es suficiente (2 píxeles para un par de líneas), con 1,5 veces la frecuencia Nyquist (3 píxeles para un par de líneas) y con el doble de la frecuencia Nyquist (4 píxeles para un par de líneas) como caso extremo; y también hemos considerado que una buena razón señal-ruido sea la prioridad; o que lo sea un determinado número de píxeles para una impresión directa con determinado tamaño y resolución. Cada formato multiplica o divide el requerimiento de resolución con su factor de recorte respecto al formato de 35mm. La siguiente tabla presenta los resultados de la comparativa.

		Cuatro Tercios (13,5x18)			APS-C (16x24)			35mm (24x36)			MF (36x48)		
Prioridad	Objetivo	p/mm	μ	MP	p/mm	μ	MP	p/mm	μ	MP	p/mm	μ	MP
40 lp/mm de detalle real	x1 Nyquist ratio	160	6,3	6,2	120	8,3	5,5	80	12,5	5,5	60	16,7	6,2
	x1.5 Nyquist ratio	240	4,2	14	180	5,6	12,4	120	8,3	12,4	90	11,1	14
	x2 Nyquist ratio	320	3,1	25	240	4,2	22	160	6,3	22	120	8,3	25
Buena razón señal / ruido	6 μ de espaciado	166,6	6	6,75	166,6	6	10	166,6	6	22	166,6	6	48
	5 μ de espaciado	200	5	9,7	200	5	15,4	200	5	34,6	200	5	69
Tamaño de foto	Suficiente para un A4 a 300ppp	190	5,3	8,7	150,8	6,6	8,7	100,6	9,9	8,7	71,4	14	8,7
	Suficiente para un A3 a 300ppp	267,4	3,7	17,4	212,8	4,7	17,4	142	7,1	17,4	100	10	17,4

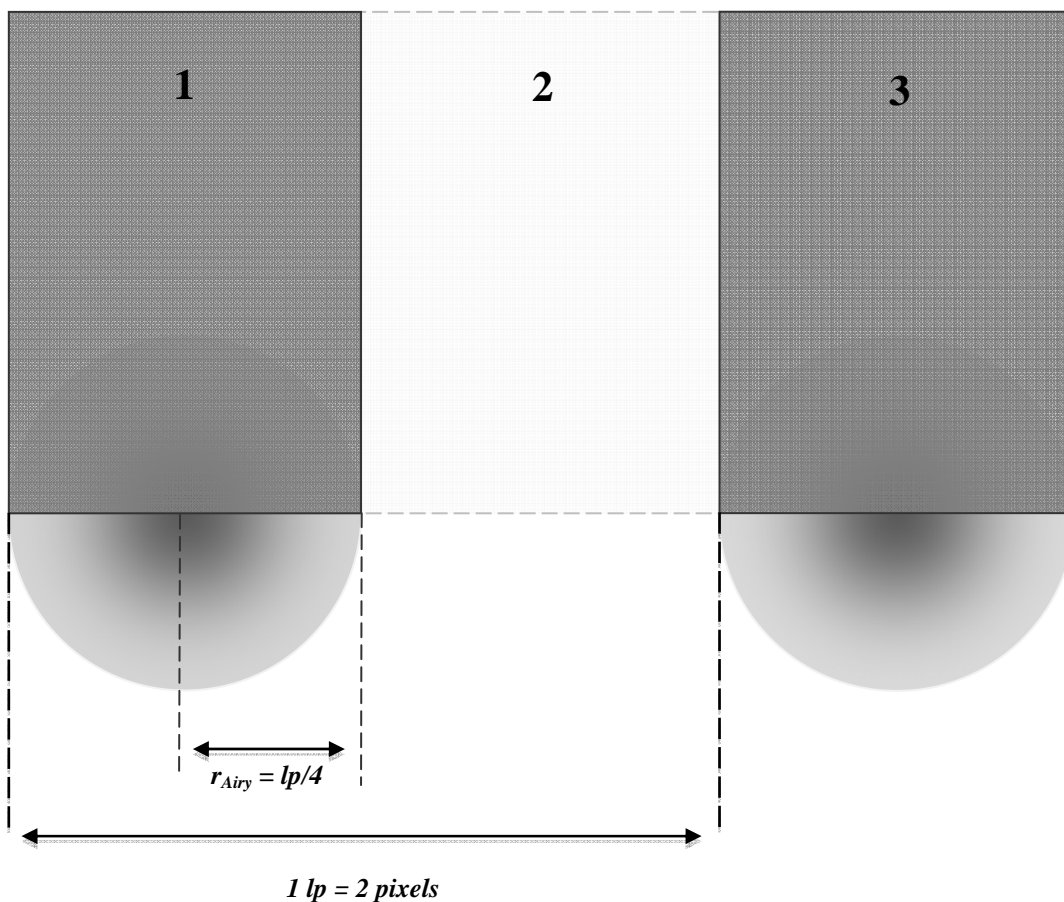
Se argumenta que el valor empírico de los 40 pares por milímetro, o el cálculo basado en el círculo de confusión de cada formato, no es una aproximación razonable cuando se trata de tener en cuenta *la capacidad límite de un sistema*. Además, como explicamos en su momento, los valores aceptados para el círculo de confusión son muy discutibles, como lo son los valores de agudeza visual que los soportan, por no hablar del cambio de costumbres en lo que toca al tamaño de impresión usual (que ha aumentado, generalizándose el A3 o la inspección en pantalla). Por todo ello hay que ir más allá, y tratar de estimar el límite resolutorio de un sistema fotográfico digital, considerando los distintos formatos. Podemos considerar, si se quiere, que el círculo de confusión es el píxel.

Para ello asumiremos un sistema óptico perfecto, es decir, un objetivo sólo limitado por la difracción, sin aberraciones. Calcularemos entonces la máxima resolución ofrecida por un objetivo de ese tipo y la frecuencia de muestreo necesaria para reproducirla. El espectro visible va de los 0,00038 a los 0,0007 milímetros, pero tomaremos el ya conocido valor de 0,000555 (verde-amarillo para el que el ojo es más sensible), 0,0004 (azul) y 0,0007 (rojo). La resolución máxima y el diámetro del círculo de Airy depende de la longitud de onda de la luz.

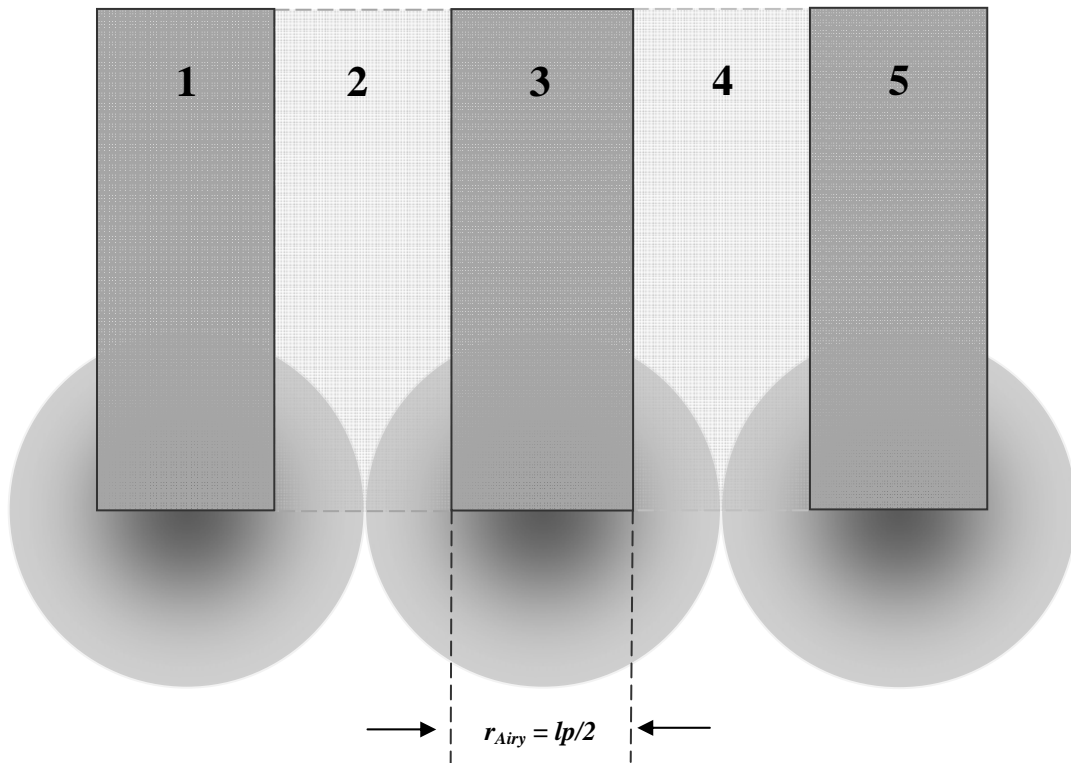
Aquí hay que introducir ahora un tema delicado. El *criterio de Rayleigh*, que permite estimar una resolución asociada a unos discos de Airy con determinada separación entre ellos, no es un criterio adecuado para los sensores digitales. El *criterio de Rayleigh* es adecuado para la percepción visual en telescopios, con motivos brillantes sobre fondo oscuro (estrellas, planetas). Para los sensores digitales hay que adoptar un criterio mucho más exigente (->). Los píxeles no son como los conos de la fovea, que reaccionan de forma distinta a los puntos y las líneas.

El diámetro de los discos de Airy sólo depende de la abertura y la longitud de onda de la luz. La resolución para un objetivo sólo limitado por la difracción depende de la separación y el diámetro de los discos de Airy. El criterio de Rayleigh es sólo un criterio sobre la mínima separación aceptable entre discos de Airy (los centros de los discos deben estar separados por el radio del disco). El criterio se aplica independientemente del diámetro, que depende de la longitud de onda de la luz y la abertura del objetivo. Se resolvían 2 líneas con cada radio al 9% de contraste tomando estas separaciones.

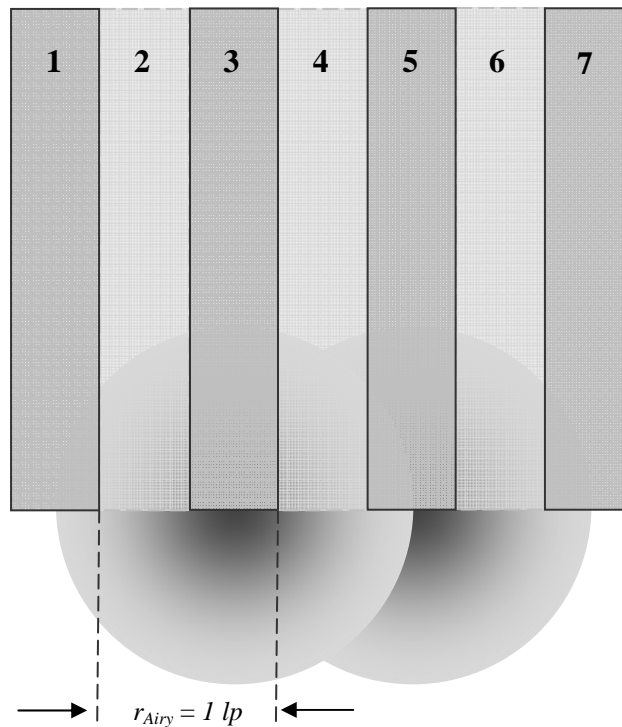
Otros criterios de resolución, es decir, de separación, ofrecían valores distintos de contraste, resultando resoluciones superiores (en el caso del criterio de Dawes, con 0% de contraste) e inferiores (cuando exigíamos valores de contraste superiores, como 10%, 50%, 80%). Si elevamos la exigencia de contraste estaremos exigiendo también más separación entre discos. Ésta se puede estimar a partir de las resoluciones presentadas en aquella tabla de la sección primera de este trabajo. En el caso del criterio de Dawes los discos están más juntos aún, y cada diámetro separaría 5 líneas. Con un contraste del 80% cada disco completo resuelve una línea, por lo que debe haber una separación entre discos de al menos un diámetro. Como es obvio, los “píxeles” deben estar lo suficientemente separados para poder captar una diferencia relevante en la intensidad de la señal. Es (aproximadamente) el caso del gráfico:



Con un contraste del 50% cada disco completo resuelve dos líneas, con una separación nula, pero sin superposición. Resolver ese detalle exige “píxeles” más pequeños. Es el caso del siguiente gráfico:



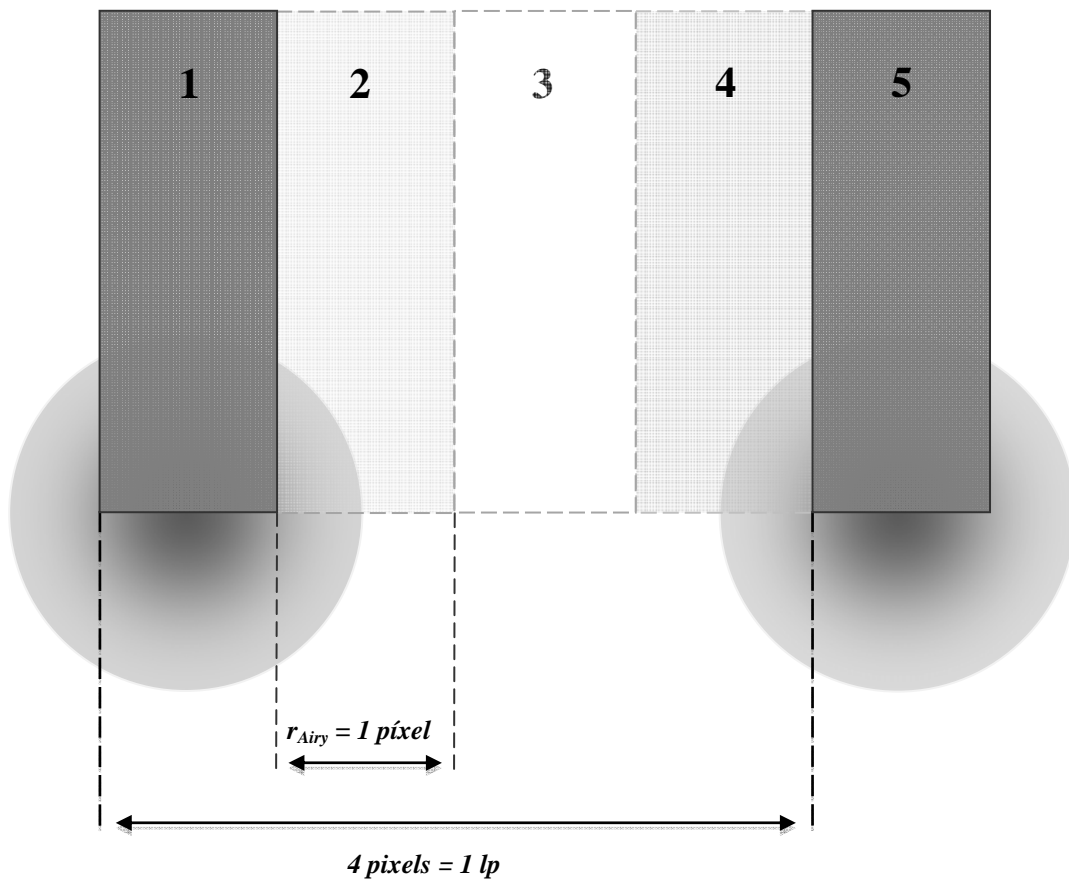
En el siguiente gráfico volvemos a presentar el caso de Rayleigh. En teoría se podría resolver hasta 1 par por radio, lo que requeriría “píxeles” mucho más pequeños aún. No obstante, el nivel de contraste es tal que esa frecuencia de muestreo adicional apenas resuelve nada.



Cuanto más próximos están los discos de Airy, mayor es la resolución espacial del objetivo y menor el contraste. Si los “píxeles” son demasiado grandes, esa resolución extra por proximidad entre discos se perdería, y el sistema estaría limitado por la frecuencia de muestreo, o por el tamaño de los “píxeles”. Pero si el “píxel” es menor que el diámetro del disco de Airy, las posibles ganancias de resolución se pierden rápidamente debido a las pérdidas de contraste asociadas a la menor separación entre discos (->, ->).

¿Dónde está el tamaño óptimo de “píxel” a efectos de resolución? Dependerá de la longitud de onda de la luz y la abertura, además de las propiedades del objetivo (control de las aberraciones). Sólo objetivos muy luminosos con un alto grado de corrección de las aberraciones se podrán beneficiar de “píxeles” más pequeños. En principio el “píxel” debe ser aproximadamente igual al tamaño al disco de Airy o algo menor (los primeros casos que hemos visto).

Como señalan Catrysse y Wandell (2005, página 6), un sensor monocromo necesitaría, para evitar el *aliasing*, dos muestreos por cada diámetro del disco de Airy, es decir, el espaciado de los “píxeles” debe ser como mucho igual al radio del disco de Airy (la mitad de lo que indicaría el criterio de Rayleigh).



Esto debe cumplirse al menos para la longitud de onda más exigente, por lo que los dos pares por disco de Airy deben adaptarse a la luz azul, que tiene los discos de menor diámetro. Esto determina un tamaño de píxel. Catrysse y Wandell (2005, página 7) calculan que para un objetivo sólo limitado por la difracción a una apertura de $f/2.8$, evitar el *aliasing* en todas las longitudes de onda requiere píxeles de 1,36 micras de espaciado, o menores, dados los discos de Airy de 2,7 micras de diámetro (véase *la tabla*); mientras que para una apertura $f/8$, para la que es más verosímil encontrar un objetivo limitado por la difracción, se requerirían píxeles de 3,9 micras (discos de 7,8 micras para esa longitud de onda).

Catrysse y Wandell (2005, página 7) o Rhodes et al. (2004, página 9), explican que en los sensores con mosaico Bayer los píxeles se agrupan en matrices de 2×2 de tipo RGBG que forman una unidad en el siguiente sentido: se usa la información de los cuatro píxeles para calcular el color definitivo en cada uno de ellos, lo que implica asumir implícitamente que esa pequeña matriz mide un punto de la escena. Por tanto, la frecuencia de muestreo efectiva es la que tiene a esa matriz Bayer como unidad de muestreo. En resumen, para evitar el moiré cromático hay que multiplicar la frecuencia de muestreo por dos (dos píxeles donde en el caso monocromo había uno). Lo que nos llevaría a multiplicar por dos los requerimientos de resolución espacial.

F/#	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Luz azul de 0,0004 milímetros de longitud de onda					Luz verde-amarillo de 0,000555 milímetros de longitud de onda					Luz roja de 0,0007 milímetros de longitud de onda				
f/1	2049	4098	1,0	2049	4098	1490	2981	1,3	1490	2981	1171	2342	1,7	1171	2342
f/1,4	1464	2927	1,4	1464	2927	1065	2129	1,9	1065	2129	836	1673	2,4	836	1673
f/2	1025	2049	2,0	1025	2049	745	1490	2,7	745	1490	585	1171	3,4	585	1171
f/2,8	732	1464	2,7	732	1464	532	1065	3,8	532	1065	418	836	4,8	418	836
f/4	512	1025	3,9	512	1025	373	745	5,4	373	745	293	585	6,8	293	585
f/5,6	366	732	5,5	366	732	266	532	7,5	266	532	209	418	9,6	209	418
f/8	256	512	7,8	256	512	186	373	10,7	186	373	146	293	13,7	146	293
f/11	186	373	10,7	186	373	135	271	14,8	135	271	106	213	18,8	106	213
f/16	128	256	15,6	128	256	93	186	21,5	93	186	73	146	27,3	73	146
f/22	93	186	21,5	93	186	68	135	29,5	68	135	53	106	37,6	53	106

(1) Máxima resolución teórica según el criterio de Rayleigh (lp/mm) MTF 9%, 4 lp/mm por disco de Airy

(2) Frecuencia de muestreo asociada a la máxima resolución según Rayleigh, a 2 píxeles por ciclo, 4 por disco, en píxeles por milímetro

(3) Diámetro del disco de Airy en micras

(4) Frecuencia de muestreo a 2 píxeles por disco de Airy en píxeles por milímetro. Ideal para sensores monocromáticos.

(5) Frecuencia de muestreo a 4 píxeles por disco de Airy en píxeles por milímetro. Necesario para sensores Bayer.

Ahora nos queda tan sólo calcular el número de “píxeles” para un sistema limitado por la difracción, considerando una frecuencia de muestreo suficiente para no tener problemas de moiré siempre que haya un filtro de paso bajo. De no haberlo sería necesario aumentar más aún la frecuencia de muestreo. El filtro de paso bajo tiene un efecto similar al incremento de la frecuencia de muestreo en lo que toca al aliasing. Tiene sentido usarlos porque a altas frecuencias el aliasing se evita, pero sin apenas ganancias de resolución adicional. El cálculo se hace a partir del diámetro del disco de Airy para cada longitud de onda, y aplicando 2 píxeles por diámetro.

Millones de “píxeles”	Cuatro Tercios (13,5x18)			APS-C (16x24)			35mm (24x36)			MF (36x48)		
	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ	w = 0,4 μ	w = 0,55 μ	w = 0,7 μ
f/1	1020	530	333	1612	838	527	3628	1885	1185	7256	3769	2369
f/1,4	521	270	170	823	427	269	1851	962	604	3702	1923	1209
f/2	255	133	83	403	209	132	907	471	296	1814	942	592
f/2,8	130	68	42	206	107	67	463	240	151	926	481	302
f/4	64	33	21	101	52	33	227	118	74	454	236	148
f/5,6	33	17	11	51	27	17	116	60	38	231	120	76
f/8	16	8	5	25	13	8	57	29	19	113	59	37
f/11	8	4	3	13	7	4	30	16	10	60	31	20
f/16	4	2	1	6	3	2	14	7	5	28	15	9
f/22	2	1	1	3	2	1	7	4	2	15	8	5

Algunos números son extremadamente altos, pero no son muy relevantes. Es difícil encontrar en fotografía objetivos limitados por la difracción. Lo es por el ejemplo el Leica APO-Telyt-R 280mm f/4 a todas las aberturas (->), o el APO-Summicron-R 180mm f/2 (->), pero sólo a partir de f/5,6. Hemos sombreado en la tabla la zona con implicaciones prácticas, y eso sólo sería válido para objetivos muy especiales. Otro factor que debe tenerse en cuenta es la longitud de onda de la luz. Tomando la luz verde-amarilla como representativa de la luz-día tenemos unos valores intermedios, pero a veces tenemos escenas con luz azulada o rojiza, y eso nos lleva a valores distintos.

Aquí la difracción afecta negativamente más al formato más pequeño. Si teníamos que con unos 22-25 millones de "píxeles" conseguíamos un factor x2 de frecuencia Nyquist en todos los formatos, la difracción limita la resolución de los más pequeños a mucho menos. Esto es así cuando cerramos el diafragma, pero también cuando lo abrimos, pues son las aberraciones las que se encargan entonces de limitar.

Podemos asumir que la difracción limita la resolución efectiva de los formatos de manera que en ningún caso resultarían rentables más de 60 millones de píxeles en un sistema de 36x48mm, 30 millones en un 24x36mm, 13 millones en un formato APS-C y 8 millones en un formato 4/3. Visto de otra forma, si quieres más resolución, no queda otra posibilidad que saltar a un formato mayor, o bien optar por un formato menor ópticamente más perfeccionado (->), vía alternativa ésta que tiene sus límites en el medio digital (por la razón señal-ruido).

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