



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Medidas de la función de transmisión policromática en sistemas fotográficos y su correlación con la calidad de imagen

Santiago Vallmitjana i Rico



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència [Reconeixement- Compartitqual 4.0. Espanya de Creative Commons](#).

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia [Reconocimiento - Compartitqual 4.0. España de Creative Commons](#).

This doctoral thesis is licensed under the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0. Spain License](#).

MEDIDAS DE LA FUNCION DE TRANSMISION POLICROMATICA
EN SISTEMAS FOTOGRAFICOS
Y SU CORRELACION CON LA CALIDAD DE IMAGEN

Tesis presentada por Santiago
Vallmitjana Rico, en la Facultad
de Física de la Universidad de
Barcelona, para aspirar al grado
de Doctor en Física.

Barcelona, Septiembre de 1980

AGRADECIMIENTOS :

Al Prof. Dr. José Ramón de Francisco Moneo que ha propuesto y dirigido este trabajo.

Al Dr. J.J. Barandalla por sus valiosas orientaciones.

Al Dr. D. Navajas, Dr. I. Juvells y D. Ros por su incondicional y desinteresada colaboración, así como a todos mis compañeros que de un modo u otro han contribuido a enriquecer esta memoria.

INDICE	Pag.
1.- INTRODUCCION	1
2.- PROPOSITO	12
3.- MEDIDAS DE LA FUNCION DE TRANSMISION OPTICA	15
3.1 La función de transmisión óptica	16
3.2 Métodos de medida	20
4.- SISTEMAS OPTICO FOTOGRAFICOS	33
4.1 La imagen fotográfica	34
4.2 La linealidad fotográfica	37
4.3 Medida del MFT de las películas fotográficas	40
5.- TRATAMIENTO POLICROMATICO	44
5.1 La función de transmisión policromática	45
5.2 Modos de medida	46
5.3 Aplicación de un criterio de calidad	49
6.- REGISTRO DE LA IMAGEN	51
6.1 Montaje experimental	52
6.2 El objeto	52
6.3 El sistema óptico	56
6.4 Material fotográfico	59
6.5 Realización	67

7.- ANALISIS DE LA IMAGEN	72
7.1 Descripción general	73
7.2 Sensitometría	73
7.3 Cálculo	78
7.4 Curvas del MFTP calculadas	79
8.- RESULTADOS	81
8.1 MFTP en modo M1	82
8.2 Comparación entre los cuatro modos	88
8.3 Criterio numérico de calidad A4	100
9.- CONCLUSIONES	105
10.- BIBLIOGRAFIA	110

1.- INTRODUCCION

1.- INTRODUCCION

A finales del siglo pasado Abbe y Rayleigh observaron que los fenómenos de difracción limitaban el poder resolutivo de los instrumentos ópticos.

La teoría clásica de aberraciones justificaba también el valor finito del poder separador, y durante mucho tiempo el único método para comparar instrumentos se reducía a la observación de ciertos objetos prefijados que actuaban como test de prueba.

Los astrónomos deducían el poder resolutivo de sus telescopios según la capacidad de separar ciertas estrellas dobles. Los biólogos comprobaban la eficacia de los objetivos de sus microscopios utilizando como test de resolución las escamas que constituyen el polvo finísimo que recubre las alas de las mariposas, o bien unas algas microscópicas (diatomeas) que poseen un esqueleto silíceo de complicada estructura geométrica. Además de estos tests naturales se empleaban también otros artificiales, formados por varias rayas grabadas sobre vidrios portaobjetos, entre los que destacan de un modo espectacular los construidos por Nobert (1) a mitad del pasado siglo.

Los tests de barras con distintos períodos espaciales se aplicaron a todo tipo de sistemas ópticos como herramienta útil para determinar el poder resolutivo. Sin embargo, este método

tan simple quedaba muy limitado puesto que las imágenes eran muy deficientes en las proximidades del límite y éste dependía de la iluminación y del receptor empleado. Por otra parte, no se podía predecir el comportamiento del sistema frente a otro tipo de objeto y era difícil comparar los resultados observados con los calculados teóricamente a partir de los datos del diseño de las lentes. En definitiva, tampoco aportaban ninguna información acerca del contraste y nitidez.

Los investigadores cada vez fueron aceptando con más convicción que para determinar la calidad de la imagen óptica era necesario adoptar criterios que tuvieran en cuenta las aberraciones ópticas del sistema, los efectos de difracción producidos a través de los diafragmas y que ofrecieran más datos acerca de la estructura de la imagen.

Con el empleo de los tests de barras se ganó más terreno en la información de la imagen óptica, pero fueron Frieser (2) en 1938 y más tarde Selwyn (3) quienes propusieron la utilización de tests sinusoidales, que pocos años después serían muy útiles para efectuar la medida de la función de transmisión.

Hoy existen gran cantidad de criterios de calidad como son la relación de Strehl, la imagen de una línea y de un punto, de un borde de playa, la energía encerrada en un círculo imagen de un punto, la acutancia, aparte de los tests de barras, radiales y sinusoidales, pero nadie duda y es de aceptación general que la función de transmisión óptica es el método más adecuado para describir el comportamiento físico global

de un sistema óptico.

La función de transmisión óptica (FTO) es una función compleja. Su módulo (MFT) define el cambio de contraste de la imagen con respecto al del objeto para cada frecuencia espacial. Su fase (PFT) define el desplazamiento de los máximos de intensidad de un objeto periódico, de modo que una variación de fase de 360° corresponde a un desplazamiento de un período espacial completo.

Pero no fue hasta la década de los 40 cuando surgió el concepto de FTO, a partir de los trabajos de Duffieux (4) en 1946, al estudiar la estructura de la imagen óptica teniendo en cuenta la difracción desde el punto de vista de la matemática de Fourier.

Schade (5) en 1948 ya utilizó sistemas opto-electrónicos para la medida de la FTO y a partir de este momento se comienzan a desarrollar de un modo notable estas medidas basadas en el barrido y análisis electrónico de la imagen. Con el avance tecnológico de las calculadoras y ordenadores crece paulatinamente la investigación en diseño de prototipos ópticos y corrección de aberraciones en ángulos de campo cada vez mayores. Los trabajos de H.H. Hopkins (6) merecen especial mención en las técnicas de diseño y evaluación de sistemas ópticos. Rosenhauer y Rosenbruch (7) también son muy importantes y en esta época contruyen aparatos de medida y desarrollan métodos de estudio del problema .

Sin embargo, ópticos e ingenieros dedican más esfuerzo a di-

seño y fabricación de sistemas de análisis que a comparar resultados durante la década de los 50, que Baker (8) denomina como década de la invención de la FTO.

Los resultados experimentales de las medidas no siempre eran comparables a los teóricos y a menudo presentaban discrepancias según el aparato con el cual habían sido obtenidos.

Todas estas circunstancias motivaron que en el Symposium celebrado en Londres en el año 1966 de la I Comisión del International Society for Photogrametry (ISP) (9) se impulsara la necesidad e importancia de formalizar normas para el cálculo de la FTO y comparación de resultados. Esta Comisión se fue reuniendo periódicamente, centrando su atención en perfeccionar los instrumentos de medida, estableciendo las condiciones necesarias para lograr una mayor precisión y repetitividad de los resultados y determinar relaciones entre FTO y criterios de calidad.

El Instituto SIRA en combinación con el ISP, en el año 1967 fabricó un conjunto de cinco sistemas ópticos de características distintas, con gran precisión en su construcción y conocimiento de parámetros y se fueron intercambiando a través de trece laboratorios para ser analizados.

Los resultados (10) fueron bastante aceptables en medidas en eje óptico o próximas a él, pero discrepaban en ángulos de campo mayores. Se discutió acerca de las fuentes de error, (11) y (12), que se resumen en las siguientes:

i) Limitaciones por la naturaleza del test objeto.

ii) Errores en los componentes básicos del analizador (rendijas, colimadores, imprecisiones en las medidas de frecuencias espaciales altas, falta de linealidad en el equipo fotoeléctrico).

iii) Errores mecánicos de las partes móviles del aparato.

Los estudios comparativos de una misma lente por distintos laboratorios se van sucediendo (13) para todo tipo de sistemas ópticos, destacando los fotográficos, desde gran angulares a teleobjetivos, (14), (15) y (16). En ellos se observan unos errores medios del 5% , errores máximos en las condiciones más desfavorables de 0.07 y nunca exceden de 0.1, (errores absolutos en el módulo normalizado a la unidad).

Con el desarrollo de la cartografía y fotografía aérea cobran especial importancia las medidas de calidad de estos objetivos que deben operar con campo grande. Brock et al.(17) señalan que las medidas fuera de eje no siempre muestran la concordancia apetecida.

En 1970 el programa del grupo ISP se concretaba en:

i) Diseño y construcción de lentes de referencia para evaluar los equipos.

ii) Especificación de todas las componentes del banco óptico así como su función de transmisión.

iii) Influencia de la rendija de barrido en las medidas.

iv) Relación entre FTO y calidad de imagen.

v) Comparación de la FTO medida y la obtenida por cálculo a partir de las características del sistema.

vi) Técnicas para la medida de la FTO del detector.

vii) Correlación de la FTO con otros métodos de análisis.

Al mismo tiempo que se va investigando en la medida de la FTO, ésta cada vez más asimilada como criterio de evaluación de la calidad de la imagen. Sin embargo este aumento de información hace que sea más difícil resumirla para comparar distintas ópticas entre sí. Consitt y Mandler (18) citan que a veces, el peso del papel empleado en el cálculo y en las gráficas excede al peso de la lente, proponiendo simplificaciones en las medidas de fuera de eje. Rosenbruch(19) señala la importancia de que un criterio de calidad, a ser posible debe ser simplificado a un sólo número, sugiriendo valores medios de la función de transmisión, indicando además que un buen criterio debe ser independiente del tipo de objeto, determinable experimentalmente y calculable a base de parámetros distintos que incluyan el tipo de radiación y la naturaleza del receptor.

En el año 1966 Hopkins (20) fue el primero en utilizar un número basado en la varianza de la aberración de onda. También la relación de Strehl ha sido utilizada como parámetro de evaluación. King(21) en 1969 da una función de mérito para diseño y corrección automática de lentes basado en el MFT. También emplean funciones de mérito como comparación (22), (23) y (24) en programas de corrección de sistemas ópticos.

Contribuyen en el estudio de hacer simplificaciones los trabajos de Luizov et al.(25), Dutton (26) y Leach (27). Algunos (28) y(29) sugieren la simplificación de tomar el valor de la función para ciertas frecuencias espaciales prefijadas.

Davydkin et al. (30) miden el valor de la función para dos frecuencias (12 y 48 mm^{-1}) y obtienen el valor para otras tres (24,36 y 60 mm^{-1}) por desarrollos matemáticos. Otros toman la frecuencia espacial para cierto valor de la función (31) y (32).

Para producciones industriales de lentes se hace imprescindible utilizar criterios simplificados para comparar los sistemas fabricados. El instituto SIRA recomendó tomar como plano imagen aquel en el cual el MFT tuviera mayor valor para la frecuencia de 5 mm^{-1} , y comparar entre distintos objetivos el valor para la frecuencia 15 mm^{-1} en eje, y tomar en campo el valor mínimo en cualquier azimut para dicha frecuencia. Kondo et al. (33) sugiere a las empresas que fabrican objetivos fotográficos efectuar un control de calidad en las condiciones siguientes: abertura a $f/5.6$, objeto en infinito, considerar plano de mejor imagen aquel en que el valor del MFT es máximo en la frecuencia 30 mm^{-1} y medir el valor a 15 y 30 mm^{-1} en eje y en un campo de 40° , tomando el valor mínimo entre la imagen sagital y tangencial, todo realizado con iluminante de cuarzo halógeno.

También se ha propuesto como criterios simplificados el tomar el área limitada entre la curva del MFT y cierto valor umbral por Moneo et al. (34) y Marchant (35) o el área bajo la curva hasta la frecuencia de corte del ojo por Heidinger et al. (36) o bien el área ponderada por cierta función de mérito dependiente de la frecuencia espacial, Nill (37).

Pero no hay que olvidar que el receptor final de la imagen

es el ojo humano, por lo que se hace evidente la necesidad de su estudio. Este es complicado debido a la intervención de fenómenos de naturaleza óptica y psicofísica, más difícil de valorar.

En el proceso de la visión interviene una primera parte puramente óptica, evaluable a partir de los parámetros anatómicos (38) o por análisis de un objeto puntual. En la segunda parte, la imagen es sensibilizada por medio de los conos y bastones de la retina y es transmitida a través de las fibras del nervio óptico al cerebro, en una complicada integración neuronal. Este proceso no es lineal, pero tiene sentido considerarlo como elemento de ponderación que afecta a la función de transmisión del ojo (39).

La función de transmisión del ojo humano y sus problemas en cuanto a apreciación de visibilidad, contraste y poder separador han estado estudiados por varios autores (40) a (46). Coinciden en las características esenciales de la curva, siendo justificables las diferencias por la complejidad del proceso. En este sentido Van der Wildt (47), afirma que la función de transmisión del ojo puede ser fuertemente influenciada si el observador puede predecir la señal de entrada.

D.Y. Gal'pern (48) en 1964 fue uno de los primeros en extender el concepto de la función de transmisión y las condiciones de isoplanatismo a un espectro amplio de longitudes de onda visible. Rosenhauer y Rosenbruch (49) calcularon una función de transmisión policromática a partir de cuatro longitudes de onda para objetos en eje.

En general, el módulo de la función de transmisión policromática (MFTP) se define (50) a partir de las MFT monocromáticas, teniendo en cuenta la composición espectral del emisor y del receptor. Levi (51) calcula el módulo de la función de transmisión para 12 receptores según la composición espectral de 6 fuentes diferentes, tabulada para incrementos de longitud de onda de 10 nm e incrementos de frecuencia de 50 mm^{-1} . También Slyusarev (52) calcula el MFTP a partir de cuatro longitudes de onda efectuando una corrección en el cálculo de la integral por el método de trapecios. Shmyga (53) utilizando el método anterior compara el cálculo en un sistema con las hipótesis de ausencia y presencia de aberraciones.

Kaskowskiy (54) en 1970 compara las funciones monocromática y policromática en objetivos acromáticos y apocromáticos y considera plano de mejor imagen entre aquél en que focaliza el color principal y el del espectro secundario, a un tercio del primero.

Hopkins e Yzuel (55) desarrollan un método de cálculo para evaluar la imagen difraccional de un punto en presencia de aberraciones para un sistema con pupila circular, ampliado posteriormente para luz policromática. También estudios difraccionales de la imagen policromática en presencia de aberraciones en eje y campo han sido elaborados por Yzuel et al. (56), (57), (58).

Por último, Barnden calcula el MFTP a partir de las monocromáticas, relacionándola con el cociente de contrastes imagen

y objeto, en eje (59) y para imágenes en campo (60).

Todos estos métodos son complicados porque suponen repetir las medidas para distintas longitudes de onda y exigen un cálculo mucho más complejo al tener que ser ponderadas por curvas espectrales de los emisores y receptores. Por otra parte, no está claro el número mínimo de luces monocromáticas a tener en cuenta en la medida, ni tampoco hay una definición unitaria de la FTO policromática.

El examen de todas estas consideraciones motiva el desarrollo de este trabajo, que consistirá en elaborar una técnica sencilla de la medida del módulo de la función de transmisión policromática (MFTP) que tendrá en cuenta que el receptor final del conjunto sistema fotográfico y película será el ojo humano, que en definitiva es quien juzgará la calidad de la imagen óptica.

Este trabajo de investigación complementará el estudio de la imagen óptica y la evaluación de su calidad llevados a cabo por otros trabajos (61), (62), (63) realizados en este Departamento.

2.- PROPOSITO

2.- PROPOSITO

Pretendemos poner a punto una técnica experimental que permita medir la función de transmisión policromática para un sistema fotográfico con película inversible en color y al mismo tiempo que describe su actuación óptica sea fiable como parámetro de calidad de la imagen.

Puesto que la imagen será recogida en película inversible, el trabajo se centrará, en primer lugar, en la medida del conjunto sistema óptico y diapositiva. Esto nos conducirá a resolver el problema de la linealidad fotográfica. Tendremos que obtener un proceso que garantice la proporcionalidad entre la señal de entrada (imagen óptica) y la señal de salida (imagen fotográfica revelada), en una amplia zona de utilización.

Para la medida nos basaremos en la técnica de barrido, detección fotoeléctrica y cálculo de la transformada de Fourier de la imagen de una rendija obtenida fotográficamente a través del sistema en estudio.

Tendremos presente que la calidad de la imagen debe ser valorada por un observador, por lo que en el cálculo deberemos tener en cuenta que el receptor final va a ser el ojo humano. En consecuencia, utilizaremos un microdensitómetro diseñado y puesto a punto en otro trabajo paralelo del Departamento (63) cuya respuesta espectral está adaptada a la del ojo humano

en visión fotópica.

Mediremos también la función de transmisión policromática como la integral extendida a varias monocromáticas, barriendo las imágenes fotográficas de la rendija para distintas longitudes de onda del espectro visible con el fin de relacionar ambas.

Puesto que las películas inversibles en color poseen tres capas sensibles a tres zonas del espectro, será interesante medir la FTP como integral extendida a tres sectores, para lo cual efectuaremos los barridos a través de tres filtros adecuados.

Para poder comparar y discutir los resultados, fotografiaremos simultáneamente un objeto junto con una rendija para distintas condiciones de desenfoque, campo y abertura. Esto permitirá establecer una ordenación según la calidad subjetiva de la imagen, dada por la apreciación visual de distintos observadores. Para poder ordenar las funciones calculadas a partir de la imagen de la rendija, se les aplicará un criterio numérico de calidad (63) que tendrá en cuenta la función de transmisión del ojo humano.

De este modo podremos concluir el trabajo enfrentando ambas ordenaciones y discutiendo la eficacia y valoración de las medidas.

3.- MEDIDAS DE LA FUNCION
DE TRANSMISION OPTICA

3.- MEDIDAS DE LA FUNCION DE TRANSMISION

3.1 La función de transmisión óptica.

La mayoría de sistemas ópticos se comportan como sistemas lineales. Es decir, actúan como un operador \mathcal{L} que transforma una señal de entrada: objeto $o(x,y)$ en una salida: imagen $i(x,y)$

$$i(x,y) = \mathcal{L} [o(x,y)] \quad (1)$$

y que además cumple:

$$\mathcal{L} [\alpha_1 o_1(x,y) + \alpha_2 o_2(x,y)] = \alpha_1 \mathcal{L} [o_1(x,y)] + \alpha_2 \mathcal{L} [o_2(x,y)] \quad (2)$$

Puesto que el estudio se realiza con iluminación incoherente, las funciones objeto e imagen se refieren a distribución bidimensional de la intensidad.

Un objeto extenso puede considerarse descompuesto o muestreado por una serie de puntos luminosos representados por funciones delta y modulados por la distribución de intensidad del mismo

$$o(x,y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} o(u,v) \cdot \delta(x-u,y-v) du \cdot dv \quad (3)$$

si el sistema es lineal:

$$i(x,y) = \mathcal{L}[o(x,y)] = \iint_{-\infty}^{+\infty} o(u,v) \cdot \mathcal{L}[\delta(x-u,y-v)] du dv \quad (4)$$

Esta segunda función que da la respuesta de un sistema para un punto del objeto se la denomina función extensa de punto: $h(x,y)$.

Si además el sistema es isoplanático, esto es la forma de la imagen es invariante con la posición del objeto, podemos expresar la imagen como producto de convolución del objeto por la función extensa de punto:

$$i(x,y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} o(u,v) h(x-u,y-v) du dv = o(x,y) \otimes h(x,y) \quad (5)$$

La mayoría de sistemas ópticos cumplen la condición de isoplanatismo para la zona de trabajo en que han sido diseñados.

Si se aplica la transformada de Fourier a ambos miembros de la igualdad (5):

$$\mathcal{F}[i(x,y)] = \mathcal{F}[o(x,y) \otimes h(x,y)] \quad (6)$$

por el teorema de convolución:

$$I(\nu_x, \nu_y) = O(\nu_x, \nu_y) \cdot H(\nu_x, \nu_y) \quad (7)$$

siendo

$$I(\nu_x, \nu_y) = \mathcal{F}[i(x,y)] = \iint_{-\infty}^{+\infty} i(x,y) \cdot \exp[-j2\pi(\nu_x x, \nu_y y)] dx dy \quad (8)$$

$$O(\nu_x, \nu_y) = \mathcal{F}[o(x,y)] = \iint_{-\infty}^{+\infty} o(x,y) \cdot \exp[-j2\pi(\nu_x x, \nu_y y)] dx dy \quad (9)$$

$$H(\nu_x, \nu_y) = \mathcal{F}[h(x,y)] = \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x,y) \cdot \exp[-j2\pi(\nu_x x, \nu_y y)] dx dy \quad (10)$$

A esta función H , transformada de Fourier de la función extensa de punto se le llama función de transmisión del sistema.

La función $h(x,y)$ da información de cómo el sistema óptico transforma un punto objeto extendiéndolo en el espacio imagen, según la cantidad de aberración óptica del sistema y de la difracción. Su espectro, dado por la transformada de Fourier, es la función de transmisión óptica (FTO), cuyo módulo (MFT) indica cómo transfiere el sistema las variaciones de intensidad luminosa para cada frecuencia espacial. La fase de esta función compleja (PFT) se traduce en un desplazamiento de ciertas zonas de la imagen, según la frecuencia espacial.

Un hipotético sistema perfecto sin difracción ni aberraciones tendría un espectro plano para todas las frecuencias. Su transformada de Fourier inversa (función extensa de punto) sería una función delta, lo cual implicaría que la imagen de un punto sería exactamente otro punto.

Puesto que la mayoría de los instrumentos ópticos son isótropos podemos simplificar el cálculo estudiando el proceso en una sola dimensión.

La distribución de intensidad de la imagen a lo largo de una dirección x será:

$$i(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} o(x') h(x-x') dx' = o(x) \otimes h(x) \quad (11)$$

la convolución de la distribución de intensidad del objeto por la distribución de intensidad de la imagen de una línea, llamada función extensa de línea.

Su transformada de Fourier es la FTO, representable bajo distintas formas:

$$\begin{aligned} H(\nu) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \cdot \exp[-j2\pi\nu x] dx = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \cos(2\pi\nu x) dx - j \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \operatorname{sen}(2\pi\nu x) dx = \\ &= H_c(\nu) - j H_s(\nu) \quad (12) \quad (\text{parte real y parte imaginaria}) \end{aligned}$$

O bien descompuesta en su MFT y su PFT:

$$H(\nu) = M(\nu) \exp(j\theta(\nu))$$

$$M(\nu) = \sqrt{H_c^2(\nu) + H_s^2(\nu)} \quad (13) \quad \theta(\nu) = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{H_s(\nu)}{H_c(\nu)} \quad (14)$$

Generalmente se adopta la normalización siguiente :

$$M(0) = 1 \quad \theta(0) = 0 \quad H_s(0) = 0 \quad H_c(0) = 1$$

O lo que equivale a definir $H(\nu) = 1/k \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \exp(-j2\pi\nu x) dx$ (15)

siendo $k = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx$

Cuando intervienen varios sistemas ópticos acoplados o "en cascada" , el MFT total es igual al producto de los módulos de cada función de transmisión y la PFT total es igual a la suma de cada una de ellas.

3.2 Métodos de medida de la función de transmisión óptica.

Se pueden dividir en dos grandes grupos:

- i) Métodos de barrido o de descomposición de la imagen.
- ii) Métodos interferométricos.

Los primeros se basan en el análisis de la imagen de un test objeto al ser muestreado por el barrido de una fina rendija. Los segundos se fundamentan en la autocorrelación de la función pupila y en la función de correlación entre el objeto y la imagen.

3.2.1 Barrido de tests sinusoidales.

Un test sinusoidal está formado por zonas claras y oscuras en una misma dirección, de modo que la transmisión óptica según la perpendicular a la anterior varía según una ley si

sinusoidal. Dicho test es colocado en el foco objeto de un co limador y a continuación se alinea el sistema a medir. En el plano focal imagen del mismo se forma la imagen del test y allí se efectúa el barrido mediante una fina rendija. Un nuevo conjunto óptico traslada la imagen barrida a un foto- cátodo. En algunas ocasiones también se trabaja con objeto cercano (64), sin colimador.

La distribución de intensidad en iluminación incoherente de un test sinusoidal será:

$$o(x) = a + b \cos(2\pi\nu x) \quad (16)$$

Su contraste:
$$C_o = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{a + b - (a-b)}{a + b + (a-b)} = \frac{b}{a} \quad (17)$$

La imagen a través del sistema será la convolución de la fun ción extensa de línea por el objeto

$$\begin{aligned} i(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} h(x') o(x-x') \cdot dx' = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x') [a + b \cos 2\pi\nu(x-x')] dx' \\ &= a \int_{-\infty}^{+\infty} h(x') dx' + b [\cos 2\pi\nu x H_c(\nu) + \text{sen } 2\pi\nu x H_s(\nu)] = \\ &= a + b M(\nu) \cos[2\pi\nu x - \theta(\nu)] \end{aligned} \quad (18)$$

Hemos supuesto el aumento del sistema igual a la unidad y $h(x)$ normalizada: $\int_{-\infty}^{+\infty} h(x') dx' = 1$
Con lo cual la distribución de la intensidad en la imagen también tiene estructura sinusoidal, y cuyo contraste será:

$$C_i = \frac{b M(\nu)}{a} = C_o M(\nu) \quad (19)$$

Por tanto, para cada frecuencia espacial el MFT se calcula dividiendo la relación de contrastes entre imagen y objeto.

Hay que tener en cuenta que la rendija de barrido tiene dimensiones finitas, por lo que la imagen $i'(x)$ que detecta el fototubo es la convolución de la imagen $i(x)$ por la función de la rendija de barrido $r(x)$:

$$i'(x) = r(x) \otimes i(x) = r(x) \otimes h(x) \otimes o(x) = \quad (20)$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} r(x') i(x-x') dx'$$

Por un desarrollo análogo al anterior, y suponiendo normalizada $\int_{-\infty}^{+\infty} r(x') dx' = 1$ obtendremos:

$$i'(x) = a + b M(\nu) M_r(\nu) \cos [2\pi\nu x - (\theta(\nu) + \theta_r(\nu))] \quad (21)$$

siendo $M_r(\nu)$ y $\theta_r(\nu)$ el módulo y la fase de la transformada de Fourier de la función rendija.

El contraste de la imagen medida será:

$$C_{i'} = \frac{b M(\nu) M_r(\nu)}{a} = C_o M(\nu) M_r(\nu)$$

Y el MFT
$$M(\nu) = \frac{C_{i'}}{C_o M_r(\nu)} \quad (22)$$

Y la PFT medida será
$$\theta'(\nu) = \theta(\nu) + \theta_r(\nu) \quad (23)$$

Luego la corrección que introduce la rendija de barrido es dividir la relación de contrastes medida por el MFT de la

rendija y a la PFT medida hay que restar la fase de la función de transmisión de la rendija .

A veces se presenta la variante de ser el objeto test una rendija y su imagen es barrida por un test sinusoidal. Desde el punto de vista matemático es equivalente al caso anterior, pues la imagen $i(x)$ de la rendija objeto $r(x)$ será la convolución por la función extensa de línea:

$$i(x) = r(x) \otimes h(x) \quad (24)$$

Tras el barrido efectuado por el test sinusoidal de distribución: $a + b \cos(2\pi \nu x) = o(x)$ habrá otra convolución, siendo la imagen medida por el fototubo $i'(x)$:

$$i'(x) = i(x) \otimes o(x) = r(x) \otimes h(x) \otimes o(x) \quad (25)$$

expresión análoga a la (20).

Para cada valor de la función en cada frecuencia espacial se necesita un período distinto en el test. Como veremos en el apartado 3.2.6 estos tests son difíciles de obtener, siendo más fáciles de fabricar los tests sinusoidales de área.

3.2.2 Barrido de tests de barras.

En otros aparatos el test objeto está formado por una serie de barras claras y oscuras de modo que la intensidad transmitida a lo largo de la dirección perpendicular a las barras

sigue una función rectangular.

La imagen del test a través del sistema a calibrar es rastreada por una pequeña rendija paralela a las barras. A veces se invierte el orden, haciendo de objeto la rendija y su imagen es barrida por el test de barras.

Si por una parte tiene la ventaja de una fácil construcción, este tipo de test tiene el inconveniente que en el cálculo del MFT por relación de contrastes hay que efectuar una corrección por los armónicos que introduce la transformada de Fourier de una función rectangular.

Para obtener distintas frecuencias espaciales algunos tests tienen distintos grupos de barras con diferentes períodos. Otros modos de obtener una variación continua de frecuencias consisten en girar paulatinamente las barras con respecto a la rendija de barrido (65), o bien la utilización de tests de barras radiales (66) y (67), conocidos también como estrella de Siemens, en donde a medida que disminuye el radio aumenta la frecuencia espacial. Esta variación es realizable por desplazamiento lateral del centro de la estrella o por medio de prismas. Hay otros medios más sofisticados de variar la frecuencia como emplear dos tests de barras inclinados entre sí, de modo que forman figuras de Moiré, equivaliendo a la utilización de tests triangulares (68) con variación continua de frecuencia.

Los tests triangulares pueden considerarse como una variante de los de barras pero la corrección que implican sus armóni-

cos es distinta. También son descritos en el apartado 3.2.6.

3.2.3 Barrido de borde de playa.

Otro modo de medida consiste en disponer como test objeto dos zonas de densidad distinta limitadas por una línea recta. Su imagen es barrida también por una rendija.

La distribución de la imagen barrida (suponiendo corregida de la influencia de la rendija o de anchura despreciable):

$$i(x) = o(x) \otimes h(x)$$

Derivando:

$$\frac{\partial i(x)}{\partial x} = \frac{\partial o(x)}{\partial x} \otimes h(x)$$

Pero la distribución de intensidad del objeto, normalizado

$$\text{es: } o(x) = \begin{cases} = 0 & x < 0 \\ = 1 & x \geq 0 \end{cases}$$

Luego la función extensa de línea será: $h(x) = \frac{\partial i(x)}{\partial x}$

Efectuando la transformada de Fourier:

$$H(v) = \mathcal{F}\left[\frac{\partial i(x)}{\partial x}\right]$$

También aquí es necesario tener en cuenta el error mencionado de la rendija y el efecto de truncadura que supone el ma

nejo de señales finitas frente a los desarrollos teóricos que se extienden al infinito, (69) y (70). Un buen método de corrección se basa en descomponer la imagen barrida como suma de una función par y otra impar, Basuray et al.(71).

3.2.4 Barrido de rendija.

Tal como se mostró en la expresión (7)

$$H(\nu) = \frac{\mathcal{F}[i(x)]}{\mathcal{F}[o(x)]}$$

Si el objeto es una rendija (función rectángulo), su transformada es conocida (función sinc). Basta con efectuar un barrido de la imagen, calcular su transformada de Fourier y dividirla por la función sinc. También debe corregirse la rendija de barrido, dividiendo por la función de transmisión de ésta.

Como ejemplos de este método pueden citarse los trabajos (72) a (75).

3.2.5 Medidas de la fase de la función de transmisión.

i) Método directo

Una vez medida por barrido la distribución de la intensidad de la imagen de un test objeto periódico, se puede comparar con la señal de entrada (teniendo en cuenta el aumento). Para cada frecuencia espacial, se puede medir el desplazamiento, d , correspondiente a un período y $\theta(\nu) = 2\pi\nu d$. Un modo práctico de operar consiste en colocar al principio y al final de cada frecuencia espacial del test unas señales de referencia.

ii) Método indirecto

En el cálculo numérico, la FTO siempre se puede descomponer en su parte real e imaginaria

$$H(\nu) = H_c(\nu) - j H_s(\nu)$$

y obtener la fase por el arco tangente, según la expresión (14).

3.2.6 Precisión y características de los tests.

Además de los tests sinusoidales descritos en 3.2.1 (llamados de transmisión o densidad) existen los tests sinusoidales de área, formados por zonas claras sobre fondo oscuro, cuyo perfil es sinusoidal. Al efectuar un barrido mediante una rendija estrecha, se obtiene una variación de intensidad de luz, que es sinusoidal.

La principal desventaja de los tests sinusoidales está en su

fabricación. Aunque en el laboratorio es relativamente fácil obtener variaciones de luz sinusoidales (por métodos interferométricos, polarizadores cruzados, osciladores electrónicos acoplados a sistemas emisores de luz, etc), es difícil grabarlas en una placa fotográfica por problemas de falta de linealidad que destruyen la estructura sinusoidal. También se pueden obtener partiendo de tests de área (más sencillos de construir) y fotografiarlos mediante una lente cilíndrica, siempre que se cumplan las condiciones de linealidad fotográfica. Todos estos métodos son difíciles y delicados, pero en contrapartida, una vez conseguidos los tests simplifican notablemente el proceso de medida y de cálculo (76).

Los tests triangulares están formados por zonas claras sobre fondo oscuro, con perfil triangular y son utilizados con menos frecuencia (77) y (78). Al igual que los de barras o rectangulares son muy sencillos de obtener, pero presentan el inconveniente de introducir armónicos en el cálculo, que deben ser corregidos. Una corrección frecuente es la fórmula de Coltman.

Nijhawan et al. (79) comparan medidas con tests sinusoidales, triangulares y cuadrangulares, y Artishevskiy y Gradoboev (80) realizan un estudio detallado de todo tipo de tests, tanto para medir MTF como para evaluar la calidad de imagen y llegan a la conclusión de que no hay ninguno idóneo para todo.

Otro factor a tener en cuenta en las medidas es el hecho de que los tests tienen un número finito de períodos, con lo que aparecen los efectos de cola o truncadura (81) a (85).

Estos efectos presentan valores a tener en cuenta para frecuencias altas (86).

3.2.7 Métodos interferométricos

i) Ya en 1955 Hopkins (6) fue el primero en desarrollar que la función de transmisión óptica de un sistema puede calcularse a partir de la autocorrelación de la función pupila.

La manera experimental de realizar la integración de esta autocorrelación se efectúa mediante interferómetros de división en los que el sistema óptico introduce un desplazamiento entre el haz de referencia y el haz que lo atraviesa. Estos interferómetros se clasifican en dos grupos: de prisma polarizador y los de brazo.

Estos métodos han sido abordados por Macdonald (87), Brich (88) y Grimes (89) y posteriormente por Grumet (90) y Matsui et al. (91), que comparan la medida por transformada de Fourier como aproximación de la integral de Kirchoff en la teoría escalar. Wyant (92) compara autocorrelación y técnicas de barrido y Kintner et al. (93) lo calculan teóricamente a partir de la función pupila desarrollada con polinomios de Zernike.

ii) El MTF también se puede calcular por la función correlación entre objeto e imagen (94), siempre que sea posible di-

cho cálculo. La función de correlación entre imagen y objeto $C_{io}(x)$:

$$C_{io}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} i(x') o(x'-x) dx' \quad (28)$$

sustituyendo $i(x') = h(x') \otimes o(x')$ y desarrollando:

$$C_{io}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x') C_{oo}(x-x') dx' = h(x) \otimes C_{oo}(x) \quad (29)$$

siendo $C_{oo}(x)$ la función de autocorrelación del objeto. Sus transformadas de Fourier:

$$\mathcal{F}[C_{io}(x)] = H(\nu) \cdot \mathcal{F}[C_{oo}(x)] \quad (30)$$

En 1957, Kubota y Ohzu (95) utilizaron como objeto un "test de ruido aleatorio" consistente en una placa revelada de holografía. En el plano imagen situaron otra móvil como pantalla de barrido. La luz transmitida daba la función de correlación entre objeto e imagen $C_{io}(x)$. Puesto que la transformada de Fourier de un ruido aleatorio es constante, les bastó con calcular la transformada de Fourier de $C_{io}(x)$. Este es un método simple, pero con la desventaja de que no permite medir la fase de la función de transmisión y el rango de la frecuencia espacial queda limitado por el grano del film holográfico en frecuencias altas.

Ambos métodos no son utilizados con tanta profusión como los de barrido.

3.2.8 Comparación de analizadores

Son muchos los estudios y trabajos realizados que comparan las medidas obtenidas en distintos aparatos sobre las mismas lentes. Destacaremos los que nos han parecido más interesantes:

Matsui y Murata (13) comparan 10 analizadores: los diseñados por las firmas Joera, Minolta, Nikon, Canon y el esquema del C-4 adaptado por Ashai, Nippon, Fuji, Olympus, así como un modelo diseñado por Murata. Los resultados dan diferencias máximas del 5% en aparatos del mismo diseño y diferencias algo mayores entre aparatos de distinto principio.

También los japoneses Kondo et al. (33) comparan más de 100 objetivos fotográficos bajo condiciones simplificadas, describiendo el funcionamiento del equipo JCII de Nikon.

En Europa, Jones (96) evalúa cuatro aparatos, Barton (97), describe el equipo Sira-Beck en cálculo de aparatos visuales empleados en el ejército.

El equipo Akofam de Matra es descrito por Pouleau (98) y Khlebnikov (99) mide con el analizador Odette de De Oude Delft.

Shul'man et al. (100) diseñan un medidor YuS-105 cuyo error absoluto máximo no excede en 0.05 al comparar diversos objetivos.

No siempre son necesarios grandes equipos y muchos investigadores han diseñado métodos más simples aplicables en ciertas condiciones como por ejemplo Zanegin y Zemlyakov (101) miden el módulo de la función de transmisión del conjunto lente más placa fotográfica de teodolitos y telescopios a base de tomar como objeto puntual una estrella del tipo espectral G. La imagen fotográfica es la función extensa de punto , y una vez barrida por un microdensitómetro, calculan su transformada de Fourier.

4.- SISTEMAS OPTICO FOTOGRAFICOS

4.- SISTEMAS OPTICO FOTOGRAFICOS

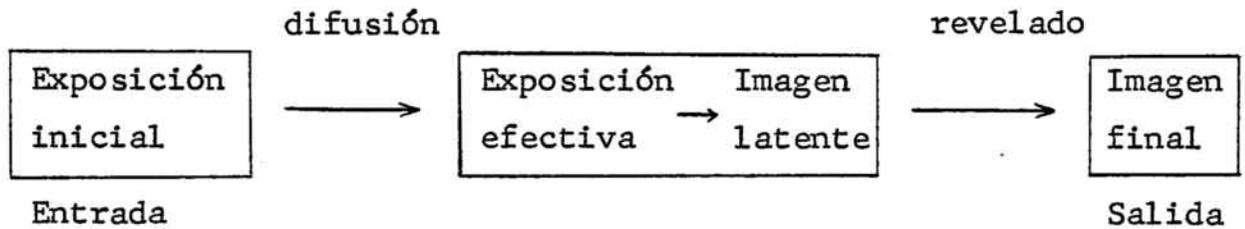
4.1 La imagen fotográfica

Durante muchos años la fotografía ha sido el único medio de conservar grabada la imagen óptica

La teoría clásica de la formación de la imagen fotográfica es debida a Gurney y Mott en el año 1938 (102). El material sensible está formado a base de haluros de plata, con un enlace químico del tipo iónico. Al ser expuestos a una radiación a la que son sensibles, cada fotón suministra una energía $h\nu$. Esta energía es capaz de hacer que un electrón de un ión halógeno salte a la banda de conducción, con lo que se puede mover a través del cristal, hasta ser atraído por un ión de plata. De este modo queda constituida la imagen latente. La misión del revelador es reducir lo más rápido posible los cristales irradiados sin modificar los no irradiados. Puede decirse que el electrón captado por el ión plata hace de catalizador en la reacción con el revelador. Este reduce la plata al mismo tiempo que se oxida. El revelado descrito es el revelado químico. El revelado físico se basa en la precipitación de plata a partir de iones plata en solución. Este segundo tipo de revelado se emplea en raras ocasiones.

Se admite comunmente la descomposición del proceso fotográfico global en dos pasos: un fenómeno de difusión a través

de la gelatina y uno de revelado.



La difusión hace que la exposición sobre la superficie externa de la emulsión no sea la misma que la que alcanza a los iones de plata. En este paso hay un complejo proceso cuántico (103) y (104) y no todos los fotones que entran van a ser absorbidos por los haluros de plata. Las posibilidades de cada fotón quedan reflejadas en la figura 1.

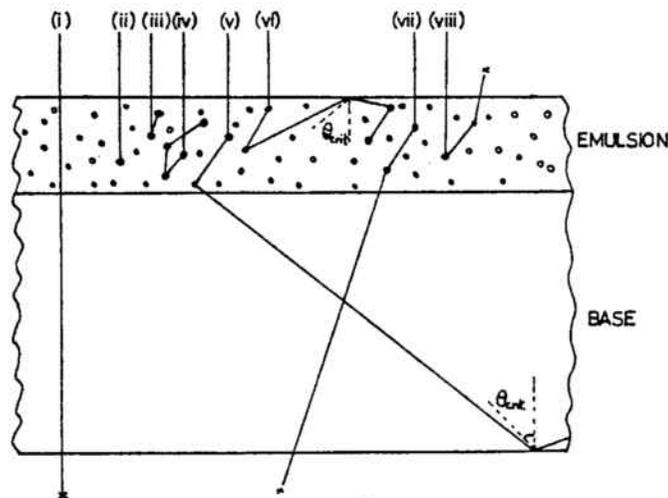


Fig. 1 .- Posibles recorridos de los fotones.

Juega un papel importante en este proceso el espesor de la capa sensible y la naturaleza de la emulsión.

Los cristales irradiados constituyen una imagen latente, que una vez revelada presenta una cierta densidad óptica debido a la plata metálica, que forma la estructura de la imagen. La densidad puede ser difusa o especular, según mida la transmitancia emergente en una semiesfera o en un ángulo sólido menor. El logaritmo de la inversa de la transmitancia nos dará la densidad. El grado de densidad difusa o factor Q, también llamado factor Callier viene dado por el cociente entre densidad especular y densidad difusa.

Un examen microscópico de la imagen revela una granulación de tamaño y forma distinta distribuida al azar. La granularidad constituye la evaluación cuantitativa de la falta de homogeneidad de los elementos que constituyen la imagen(105). Kodak, por poner un ejemplo, la evalúa por la medida de la densidad difusa a través de un área circular de 0.048 mm de diámetro sobre la película muestra con densidad media unidad, aumento de 12X y apertura de f/2. Las unidades son rms = valor de la desviación típica de fluctuaciones de densidad multiplicado por 1000.

Un problema importante que afecta en la linealidad es el derivado de los microefectos de revelado. El análisis microdensitométrico de la foto de un borde de playa no da un escalón de densidad, sino que se aprecia una subida en densidad en la zona oscura y una bajada en la parte clara en un entorno reducido junto a la recta de separación. Esto es debido

al efecto de adyacencia o efecto de migración de las especies activas e inhibidoras del revelador. El revelador que actúa sobre la parte blanca no se gasta y el que actúa sobre la parte negra se gasta (oxida) más rápidamente. Como consecuencia de la mezcla de ambos hay revelador gastado que emigra a la zona clara y revelador no gastado hacia la zona oscura que ataca con más energía la zona negra, dando un contraste superior al normal. La figura 3 muestra un esquema de este proceso.

Estos microefectos pueden corregirse de diversas maneras más o menos complicadas (107), (103), (109) y (110). Nosotros comprobamos que con una agitación adecuada conseguimos superar satisfactoriamente esta dificultad.

4.2 La linealidad fotográfica.

Una de las maneras más comúnmente empleadas para describir la relación entrada-salida en el proceso fotográfico es la llamada curva característica o diagrama HD (Hurter-Driffield). Representa en el eje de abscisas el logaritmo de la exposición y en el de ordenadas la densidad óptica del film, tras el revelado. Figura 2.

En general hay una densidad mínima (velo) debida a la acción del revelador sobre los cristales no irradiados. Suele haber un pie de curva, un hombro y en medio una zona más o menos

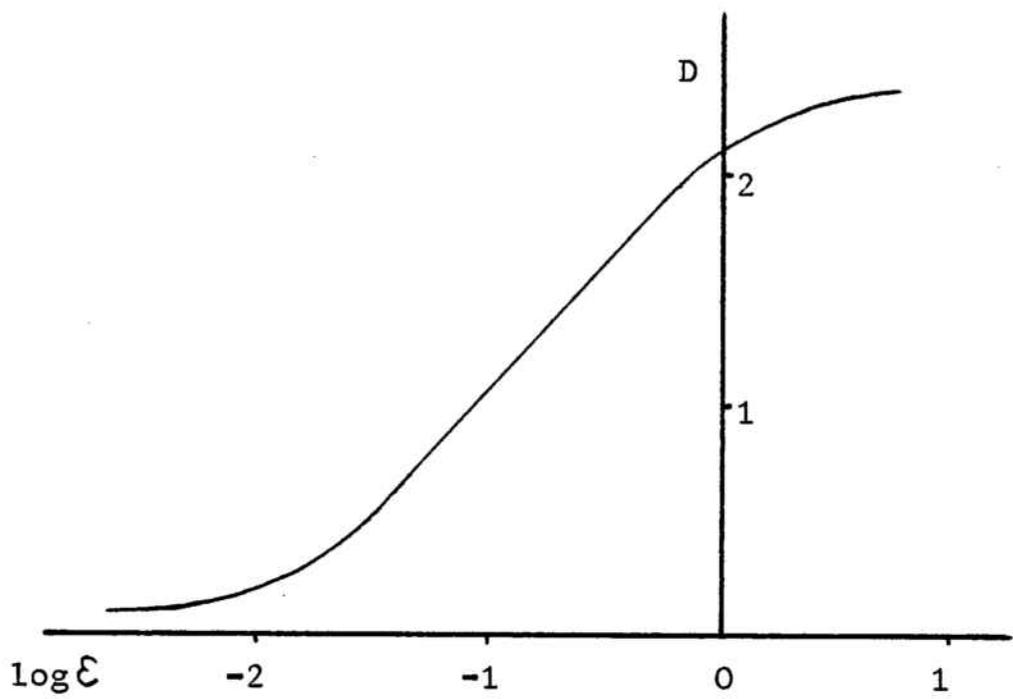


Fig. 2 .- Ejemplo de curva característica.

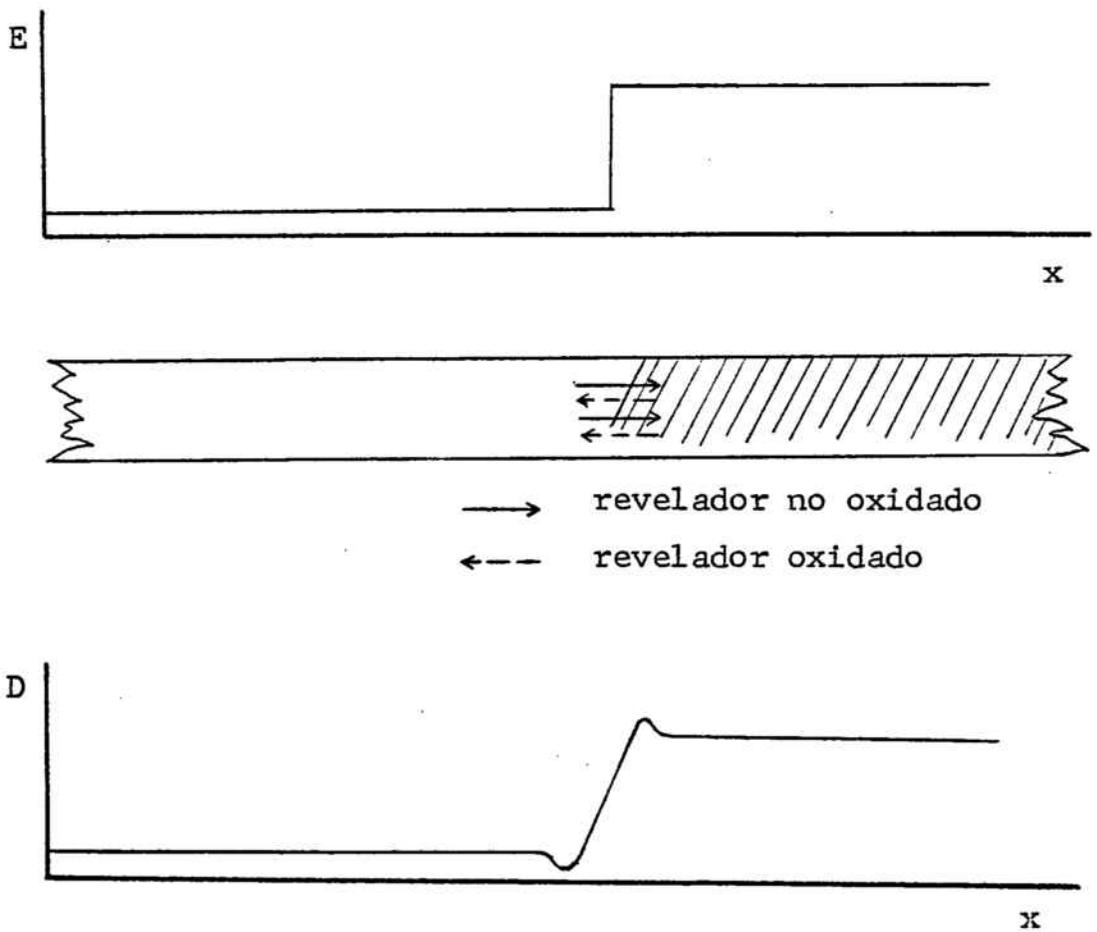


Fig. 3 .- Esquema del efecto de adyacencia.

recta. La pendiente de esta recta es el coeficiente gamma: γ . Esta gráfica es distinta para cada tipo de película, para cada revelador y para las condiciones de revelado (tiempo, temperatura y agitación). La zona recta tiene por ecuación:

$$D = \gamma \log E + C \quad (31)$$

En general, para un film y revelador dados, γ aumenta con el tiempo, la temperatura y la agitación del revelado. Esto permite hacer pequeñas modificaciones sobre el proceso.

Es frecuente expresar esta relación mediante otros parámetros derivados (111), (112), (113), (114) como exposición y transmisión.

Como $D = \log \frac{1}{T}$,

la expresión (31) queda: $\frac{1}{T} = K' E^\gamma$ (32)

luego $T = K E^{-\gamma}$ (33)

con lo que queda evidente que solamente el proceso fotográfico será lineal si $\gamma = -1$. Esta condición se puede conseguir o bien por medio de una pareja negativo-positivo cuyo producto de factores gamma sea la unidad o bien con una película inversible con $\gamma = -1$. En ambos casos la relación quedará acotada para aquellos valores de la exposición máxima y mínima en el límite de la recta (latitud de exposición).

Siendo la exposición igual al producto de la iluminación por el tiempo, en principio para obtener una cierta densidad óptica

ca, serían posibles infinitas combinaciones de iluminación - tiempo que dieran la misma exposición teórica. Sin embargo esto deja de ser cierto a partir de cierto rango. Este fenómeno, que presenta una nueva restricción en el problema de la linealidad, se conoce como efecto de reciprocidad. La exposición efectiva puede calcularse a partir de la incidente mediante correcciones (115).

Siendo importante la linealidad para el cálculo del MFT, ha sido abordada por diversos investigadores entre los que citamos los trabajos de (116) a (120)

4.3 Medida del MFT de las películas fotográficas

Para poder aplicar las técnicas del análisis de Fourier son necesarias las condiciones de superposición (linealidad) y estacionariedad (isoplanatismo). Las películas fotográficas cumplen la condición de isoplanatismo, puesto que la distribución de los elementos fotosensibles es estadísticamente isotrópica (126). La fase de revelado, con adecuada agitación que reduzca al mínimo los efectos de adyacencia también lo es. Pero no cumple la condición de linealidad.

Sin embargo tiene sentido hablar de la función de transmisión del film como una relación de modulación del contraste de la imagen revelada con respecto de la imagen incidente para cada frecuencia espacial, para unas ciertas condiciones

de iluminación, tests objeto y revelado patrones.

Otra manera de enfocar el estudio, Ooue (121), consiste en examinar las dos fases, difusión y revelado. La fase de difusión se considera lineal y puede ser estudiada conociendo el espesor y la granularidad. La fase de revelado no lo es, pero se la trata como un sistema que transforma una señal de entrada (exposición efectiva), en una señal de salida (transmitancia del film revelado). Esta fase se puede evaluar por el diagrama HD.

Los métodos de medida pueden simplificarse en cuatro grupos:

i) Por onda sinusoidal. Se efectúa la medida del contraste de una imagen sinusoidal por barrido microdensitométrico. A continuación en el plano en el que se ha barrido se efectúa la exposición sobre el film, y una vez revelado se mide el contraste (122). Del cociente de contrastes para cada frecuencia, se obtiene el MFT. Se puede incluir aquí una onda cuadrangular o triangular (123). El proceso es el mismo, pero exige la corrección de armónicos como por ejemplo la fórmula de Coltman.

ii) Por transformada de Fourier de la función extensa de línea. De un modo análogo se puede medir la distribución de intensidad de la imagen aérea antes y después de ser impresa en el film. El cociente de sus transformadas da el módulo. Hay variantes en este apartado como el de impresionar un borde de playa y efectuar barrido (124), diferenciación y transformada.

iii) Por métodos de iluminación coherente, consistentes en comparar las intensidades relativas de los máximos de distintos órdenes de difracción de una rendija o red de difracción antes y después de ser impresas en el film fotográfico. Como ejemplo puede citarse el trabajo de Carroll et al. (125).

iv) Por cálculo de medidas de la difusión en el film junto con la evaluación del diagrama HD.

Comparaciones de medidas según distintos métodos muestran a veces resultados apreciablemente distintos. Ello es debido a que cada fabricante utiliza un patrón particular y hay que hacer hincapié que diversos investigadores (126) señalan que los resultados dependen de la manera en que se miden.

Dada la importancia y difusión que han tenido las cámaras fotográficas en usos industriales, científicos y medios de comunicación, no solamente se mide el MFT de la película, sino de todos los elementos que intervienen en el proceso fotográfico. Así, Barteneva (127) examina el conjunto objetivo más film y detalla las modificaciones y cálculos de corrección que implican la atmósfera, el disparador, la luz difusa y difractada, el desplazamiento lineal de la imagen y el desenfoque. También es interesante el trabajo de Petukov (128) de medir el MFT del conjunto de un sistema fotográfico de varios elementos más película a base del MFT de cada una de las lentes integrantes y de la curva característica. Los resultados no sobrepasan el 20% del valor experimental, y mejoran si además se tiene en cuenta el umbral de contraste del ojo y la granularidad de la imagen.

Estudios de la influencia en el MFT que producen el tipo de obturador y pantalla de enfoque y vidrios deslustrados también han sido realizados en diversos trabajos (129), (130), (131) y (143) así como la variación que implica el movimiento del objeto (144) y Yasuda (145) efectúa un completo estudio del MTF basado en medidas de borde de playa en papeles fotográficos, impresión tipográfica, procesos de offset y huecograbados.

5.- TRATAMIENTO POLICROMATICO

5.- TRATAMIENTO POLICROMATICO

5.1 La función de transmisión policromática.

En los trabajos y estudios que hemos revisado todos concuerdan en que teóricamente la función de transmisión policromática se desarrolla como:

$$H_p(\nu) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) H_\lambda(\nu) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \quad (34)$$

donde:

$H_\lambda(\nu)$ es la función de transmisión monocromática para la longitud de onda λ

$E(\lambda)$ es la composición espectral del iluminante

$S(\lambda)$ es la sensibilidad espectral del receptor

Pero la medida y cálculo en la práctica se complica notablemente.

A priori sería razonable que a mayor número de medidas a distintos colores monocromáticos, más precisión se obtendría en el resultado. Como se ha visto anteriormente en los trabajos estudiados parece que el número mínimo son cuatro longitudes de onda, siendo aconsejable la extensión a un número mayor. Esto lleva un trabajo considerable y nuestra intención es efectuar

tuar simplificaciones que faciliten su medida. La comprobación de los resultados justificará la validez de nuestro método.

5.2 Modos de medida.

5.2.1 Modo M1.

Puesto que el ojo humano es el receptor final que juzga la calidad de la imagen, pensamos que medir el MFT mediante barrido con un aparato cuya respuesta espectral sea análoga a la del ojo solucionaría el problema de la complejidad de medida y cálculo. Dicho aparato ha sido diseñado y construido en el Departamento (63).

Podemos partir de la hipótesis de que el barrido realizado en estas condiciones ya efectúa una descomposición análoga a cómo la vería un observador.

Si el objeto fuera una rendija infinitamente estrecha, su imagen sería la función extensa de línea. Si ésta es analizada en las condiciones espectrales mencionadas, la medida ya incluye la influencia del iluminante y receptor final (ojo humano). Su transformada de Fourier nos definirá la FTP. Como no es factible operar con tal rendija, tomaremos como objeto una rendija conocida y dividiremos por la transformada de Fourier de este objeto, reducido al plano imagen.

Definimos el módulo de la función de transmisión policromática en modo M1 del conjunto sistema óptico y película como cociente de la transformada de Fourier de la imagen impresa en la película y medida en las condiciones citadas dividido por la transformada de Fourier del objeto.

Vistos los trabajos de Barnden (59) y (60), deberemos tener presente que esta definición no será válida para sistemas ópticos con aberración cromática transversal grande, puesto que modificaría el aumento lateral según el color.

5.2.2 Modo M4.

Para comprobar la validez de la definición anterior pensamos que convendría extender las medidas a varias longitudes de onda para su posterior comparación. Decidimos medir el MFT para 11 longitudes de onda, desde 425 a 675 nm con incrementos de 25 nm, mediante un monocromador.

Utilizamos la expresión (34) tomando como fuente el iluminante de 3200°K (tal como se realizó la fotografía de la rendija) y como receptor la sensibilidad espectral del ojo.

5.2.3 Modo M2.

Las películas inversibles poseen tres capas sensibles a tres zonas del espectro. Estas tres capas pueden ser separables por medio de tres filtros adecuados (vease 7.2.4). De esta manera podemos obtener los MFT para cada zona: $M_r(\nu)$, $M_g(\nu)$, $M_b(\nu)$.

Definimos como medida en M2 del MFTP del sistema-película como $\frac{1}{K} (M_r(\nu) R + M_g(\nu) G + M_b(\nu) B)$ siendo $K = R + G + B$, valores de la sensibilidad espectral del ojo correspondientes a la longitud de onda dominante de los filtros bajo el iluminante empleado de 3200°K.

5.2.4 Modo M3.

Con el afán de simplificar más el cálculo y medida, y vista la poca eficiencia del ojo en la zona roja y azul del espectro, decidimos comparar las medidas anteriores con $M_g(\nu)$.

Definimos como medida en modo M3 del MFTP del conjunto sistema óptico y película como cociente entre la transformada de Fourier de la distribución de la intensidad de la imagen fotográfica de una rendija barrida a través de un filtro similar al Kodak Wratten nº 93, bajo iluminante de 3200°K, y la transformada de Fourier del objeto.

Caso de resultar las medidas parecidas obtendremos así un método aproximado de gran sencillez, puesto que sólo necesitará un barrido y no necesitará ajustar la respuesta de un densitómetro como en el modo M1 .

5.3 Aplicación de un criterio de calidad.

Además de comparar si las medidas de los cuatro modos mencionados son parecidas, tenemos que aplicar un patrón absoluto que sirva de referencia.

Habrá que establecer una ordenación de las curvas mediante un criterio.

En un trabajo paralelo (63) desarrollado en nuestro laboratorio se determinó un criterio de calidad (A4) que ordenaba los MFTP, medidos por contrastes de tests sinusoidales y a través del microdensitómetro adaptado a la respuesta del ojo, con una gran concordancia con la ordenación visual de varios observadores.

Este criterio numérico multiplica el MFTP por el MFT del ojo y pondera las frecuencias altas hasta la de corte:

$$A_4 = 20 \left[\frac{\int_0^{\nu_c} H(\nu) O(\nu) \nu \, d\nu}{\int_0^{\nu_c} O(\nu) \nu \, d\nu} - 1 \right] \quad (35)$$

y es en realidad el primer momento de la función de transmisión siendo ν_c la frecuencia de corte del ojo en las condiciones de observación.

$H(\nu)$ = MFTP

$O(\nu)$ = MFT del ojo humano

ν = frecuencia espacial

6.- REGISTRO DE LA IMAGEN

6.- REGISTRO DE LA IMAGEN

6.1 Montaje experimental.

Se juntaron dos bancos ópticos en escuadra. En el banco transversal de 3m de longitud, se colocó una plataforma deslizante con el conjunto del sistema de iluminación y soporte del objeto, con el fin de poderlo situar en eje y en ángulo de campo. En el soporte de 10x10 cm se podía situar el objeto, una rendija y unos tests sinusoidales.

Sobre el banco longitudinal de 5m de longitud, se centró el sistema óptico con la ayuda de una fuente laser. La distancia del plano objeto en eje a la primera superficie del sistema óptico se evaluó en $2460 \text{ mm} \pm 0.5$ (a 12 mm de la última superficie estaba el diafragma de apertura). Detrás del sistema óptico había un soporte con movimiento lateral, con el cuerpo de una cámara reflex, tal como se ve en la figura 4.

6.2 El objeto.

Además de los tests de medida de la función de transmisión, debía colocarse un objeto para que distintos observadores pudieran apreciar la calidad subjetiva de la imagen en dis

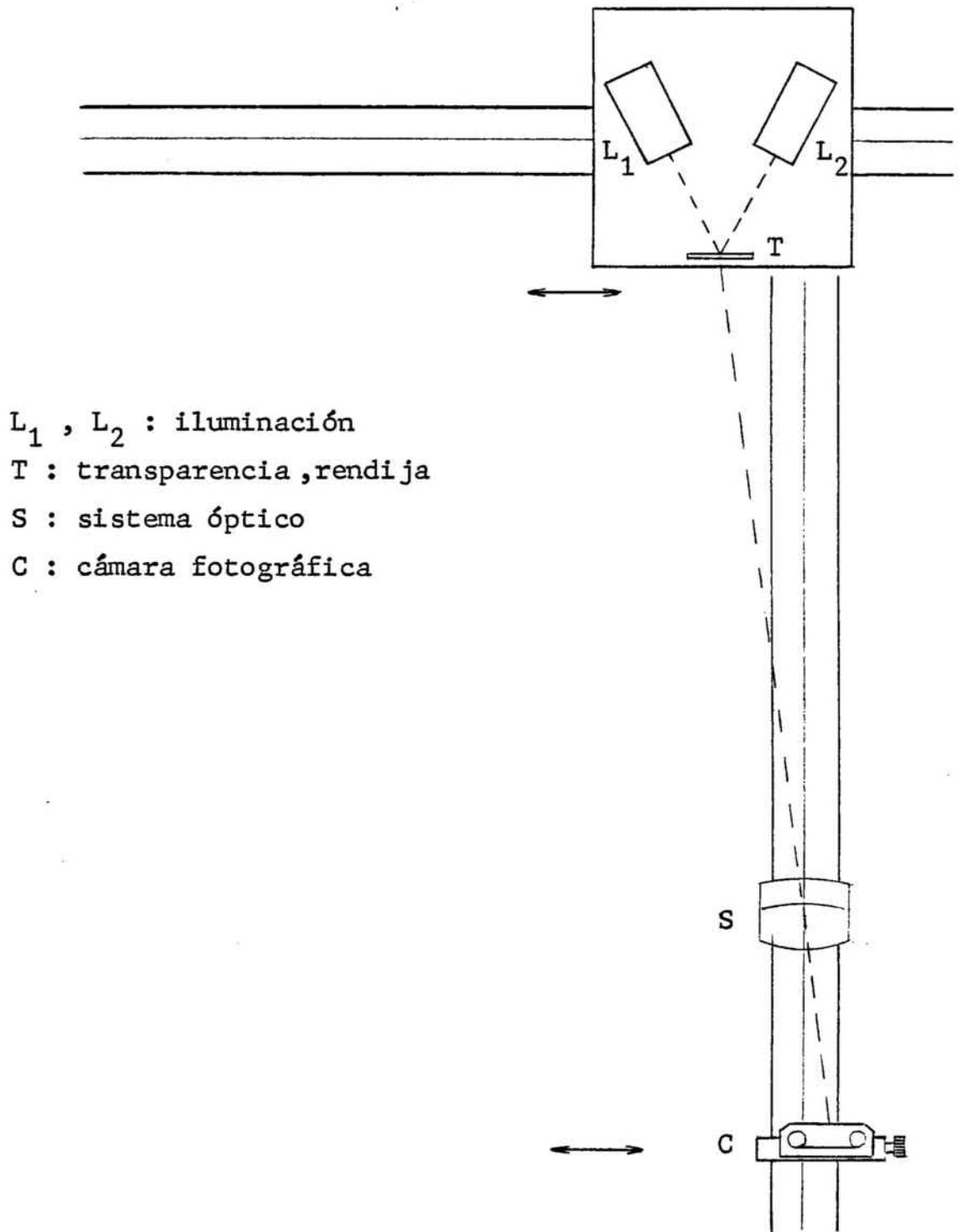


Fig. 4 .- Esquema del montaje experimental

tintos planos.

6.2.1. Características.

El objeto debía tener las siguientes características:

i) Gran variedad de contenido en frecuencias espaciales en distintas direcciones.

ii) Diversidad de colores en cuanto a tono y saturación.

iii) Ausencia de un primer plano con personas u otros elementos que centrasen la atención.

iv) Presencia de objetos usuales y fácilmente reconocibles.

Decidimos un plano panorámico de una zona del Parque de Atracciones de Montjuich que gozaba de las características citadas.

La fotografía original se efectuó sobre película inversible Kodak Ektachrome 200 Professional, revelada en proceso E-6. Como el formato resultaba demasiado pequeño se amplió posteriormente a una hoja de 9x12 cm de película Kodak Duplicating Film 6121. Para lograr el equilibrio de color se utilizaron los filtros Wratten 2B, CC5Y y CC10G, y fue revelada en proceso E-6.

6.2.2 Iluminación.

En la plataforma móvil del banco transversal colocamos como fuente de iluminación dos proyectores de diapositivas sin su objetivo. En cada uno de ellos situamos un difusor tipo opal plastificado en la montura de las diapositivas. En el plano del objeto había un vidrio difusor.

Para asegurar la uniformidad de iluminación se fue variando el ángulo del eje de los proyectores con la perpendicular al objeto, hasta que una fotocélula de reducidas dimensiones no detectó variaciones en los distintos puntos del plano objeto.

Efectuamos una posterior comprobación de la uniformidad de iluminación a base de realizar fotografías a distinta exposición del vidrio difusor en el plano objeto y ser examinadas en el microdensitómetro.

Tras varias pruebas de tanteo colocamos entre los difusores de los proyectores y el plano objeto los filtros Wratten nº 2B y CC20C para lograr la corrección de color final y una temperatura de color de 3200°K , adecuada a la película a utilizar.

6.3 El sistema óptico.

6.3.1 Características.

Con el fin de acentuar las aberraciones ópticas y asegurar la dependencia de la calidad de la imagen al sistema y no al material fotográfico se colocó un doblete de 175 mm de focal con el vidrio flint encarado al objeto, cuyas características vienen indicadas en la figura 5 .

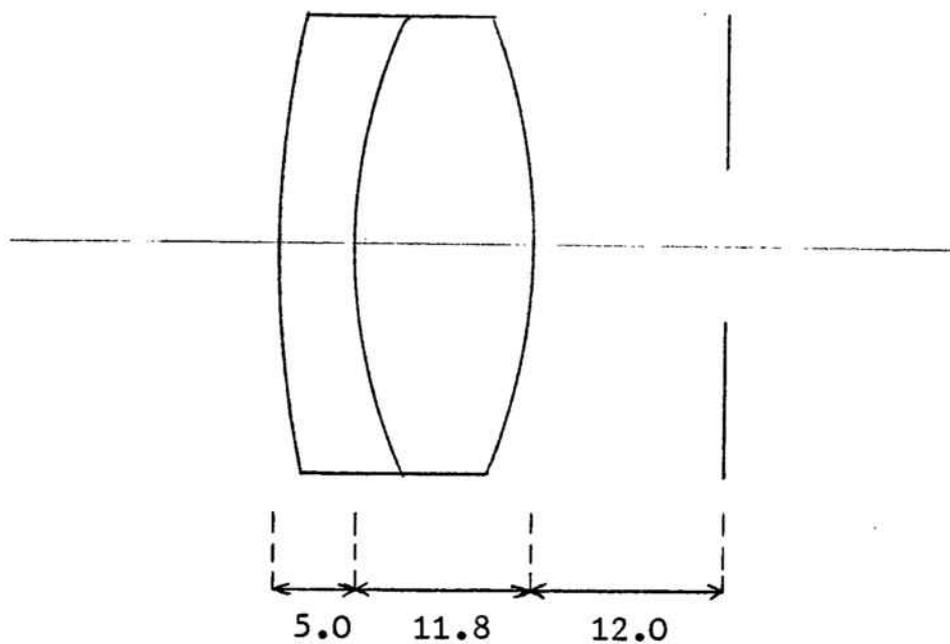
6.3.2 Determinación de parámetros.

Imagen paraxial, que determinamos por los siguientes métodos:

i) Colocando en eje un punto luminoso de 1 mm de diámetro y fotografiando en distintos planos su imagen. Esto permitió construir la curva de la aberración esférica y las cáusticas.

ii) Utilizando como objeto un test de barras (USAF IX 1951 Gurley Troy. N.Y.), fotografiando su imagen en distintos planos y observando dónde el contraste y la resolución eran mejores.

iii) Mediante un programa de marcha exacta de rayos a partir de los datos del sistema, efectuado en ordenador.



$$\begin{aligned}
 n_d &= 1.614 \pm .001 \\
 n_c &= 1.160914 \\
 n_f &= 1.62566 \\
 \nu &= 37.2 \pm .8 \% \\
 r_1 &= 501.19 \\
 r_2 &= 70.795 \\
 r_3 &= -89.195 \\
 n_d &= 1.51925 \pm .0001 \\
 n_c &= 1.51659 \\
 n_f &= 1.52527 \\
 \nu &= 59.8 \pm .8 \%
 \end{aligned}$$

Fig. 5 .- Características del sistema óptico utilizado.

Los tres métodos nos aseguraron la imagen paraxial y la mejor imagen entre los 188 y 189 mm medidos desde la última superficie, que se traducen en las posiciones de referencia 34 y 35.

Los posteriores resultados de la calidad percibida por los observadores y de la apreciada por el criterio A4 situaron también la mejor imagen en este intervalo.

Las posiciones de referencia se obtienen sumando a las distancias medidas desde la última superficie el valor 1446mm y eliminando los dos primeros dígitos.

Imágenes sagital, tangencial y media , que fueron calculadas por los métodos siguientes:

i) Por imagen de un punto luminoso para distintos ángulos de campo, localizando las focales de Sturm y el círculo intermedio, con lo que obtuvimos las curvas sagital, tangencial y media. Se realizó con abertura pequeña ($N= 33$) para que el coma no enmascarase el astigmatismo.

ii) Colocando en campo el citado test de barras , fotografiando distintos planos y apreciando dónde se perfilaban mejor las barras verticales y horizontales.

iii) Mediante programa por ordenador, de marcha exacta de rayos con los datos del sistema.

Para el ángulo de campo de $7^{\circ}58'$ los tres métodos nos situaron el plano tangencial sobre los 179 mm, el plano medio en 182 y el sagital a 185 mm medidos desde la última superficie de la lente, que corresponden a las posiciones de referencia 25, 28 y 31 respectivamente.

También los posteriores resultados de la apreciación visual y del criterio de calidad confirmaron estas posiciones.

Calculamos mediante ordenador la aberración cromática, que fue suficientemente pequeña como para que no afectase al aumento lateral, condición indispensable en nuestra definición.

6.4 Material fotográfico.

6.4.1 Elección. Curvas nominales.

Desde el primer momento se descartó la idea de utilizar una pareja negativo-positivo por las razones siguientes:

i) Doble número de parámetros y variables a controlar, con la consiguiente duplicación del tiempo de laboratorio en todo el proceso de ajuste de pendientes y zona de trabajo.

ii) Zona lineal más estrecha (poca latitud de exposición lineal)

iii) Mayor complejidad del proceso global.

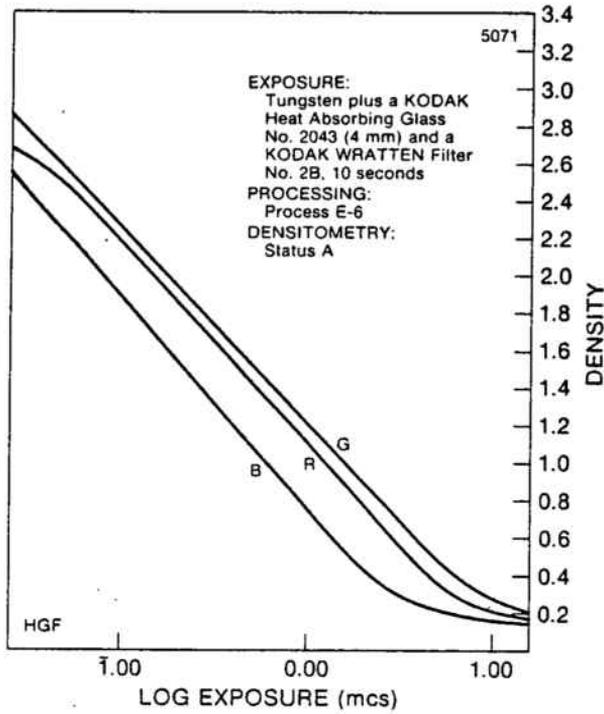
Interesaba una película inversible en color, de paso universal, con pendiente próxima a la unidad en una zona lo más amplia posible, con elevado poder de resolución, con adecuada reproducción de color y que fuera posible procesarla en nuestro laboratorio.

Las películas inversibles corrientes en el mercado tienen un factor γ comprendido entre -1.5 y -2. Rebajar hasta -1 por variaciones en el proceso de revelado puede introducir graves descompensaciones en el color. Tras varias tentativas elegimos la película Kodak Ektachrome 5071, empleada en el duplicado de diapositivas, cuyas características son las siguientes (139) y (146):

- Temperatura de color de la fuente de luz 3200°K (tungsteno)
- Formato en rollo de 35 mm x 100 pies
- Revelado Proceso E-6 Kodak
- Granularidad difusa RMS:9
- Poder de resolución para contraste 1:6:1 50 l/mm
para contraste 1000:1 125 l/mm

Las curvas características, MFT de la película, sensibilidad espectral de cada capa y densidad de los colorantes se encuentran en las figuras 6 y 7.

CHARACTERISTIC CURVES



MODULATION-TRANSFER CURVE

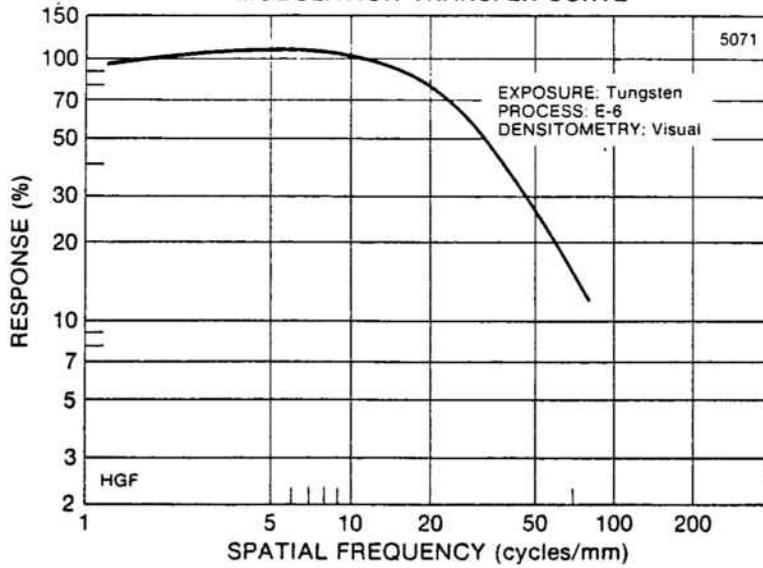


Fig. 6 .- Datos sensitométricos nominales de la película empleada.

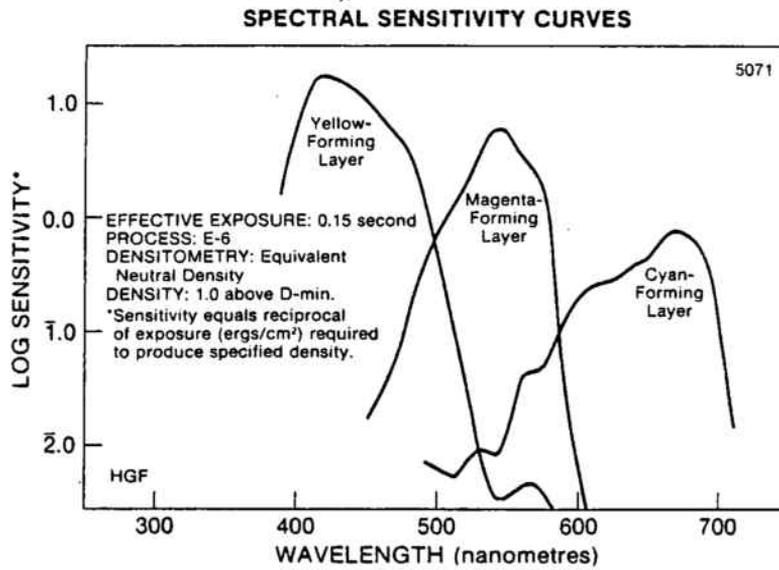
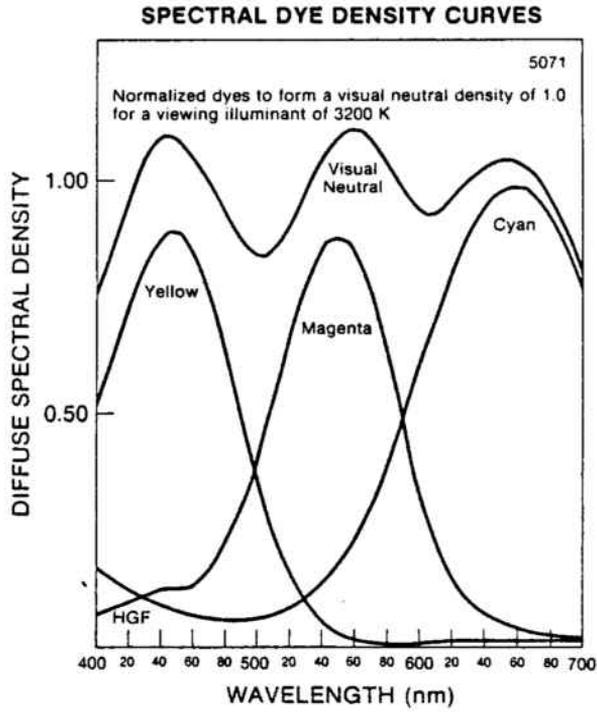


Fig. 7 .- Datos sensitométricos nominales de la película empleada.

El poder resolutivo no es muy alto, pero fue suficiente, puesto que la resolución del objetivo fotográfico en las mejores condiciones la evalúan entre 35 y 40 l/mm y el poder resolutivo nominal del film era de 100 l/mm. Esto nos aseguraba que la calidad de la imagen fuera perturbada por el objetivo y no por la película. Se puede utilizar la expresión aproximada (147):

$$\frac{1}{r_s^2} = \frac{1}{r_f^2} + \frac{1}{r_l^2} \quad (36)$$

donde r_f = poder resolutivo del film
 r_l = poder resolutivo de la lente
 r_s = poder resolutivo del sistema global

Para $r_f = 100 \text{ mm}^{-1}$ y $r_l = 40 \text{ mm}^{-1}$ se obtiene $r_s = 37 \text{ mm}^{-1}$.

Calculamos en todas las medidas el MFT hasta la frecuencia espacial 33. Efectivamente comprobamos que en el mejor de los casos $M(33) \simeq 0.1$

6.4.2 Determinación de las curvas características.

Para calcular y ajustar las curvas características elaboramos una escala con 12 gradaciones de grises en una transparencia con las mismas dimensiones que el objeto (9x12 mm).

Las condiciones de trabajo quedarían ajustadas en el momento que la exposición y el revelado dieran sobre la película de trabajo las mismas densidades que en la escala original. Dicha escala fue impresa sobre el mismo tipo de película que el objeto con el fin de que el grado de densidad difusa fuera el mismo, para lograr una mayor precisión en las medidas densitométricas.

Aunque el fabricante recomendaba tiempos del orden de 1 seg. siendo una película relativamente lenta (3 ASA), comprobamos que tiempos de medio minuto no afectaban al equilibrio de color.

La corrección de color exigió los filtros Wratten 2B + 20C, que colocamos en el sistema de iluminación para no introducir nuevas variables en el proceso de la formación de la imagen.

Las curvas obtenidas, bajo las condiciones de revelado (ver 6.5.3) fueron las correspondientes a las figuras 8 y 9.

6.4.3 Zona de trabajo.

Observando las curvas características obtenidas para distintos tiempos dedujimos que el tiempo óptimo para la exposición debía ser de 35 seg., de este modo las transmitancias

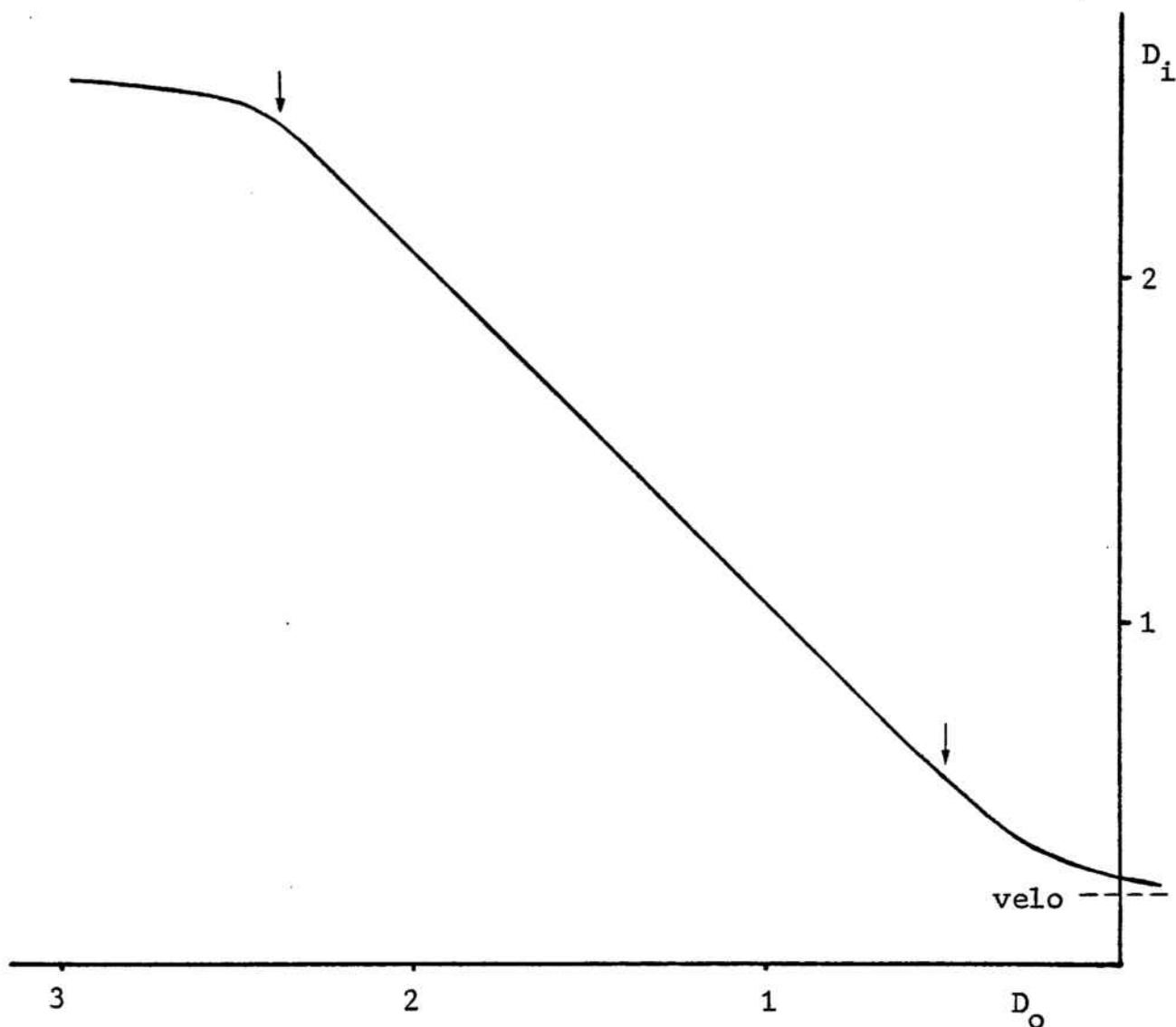


Fig. 8.- Curva característica de la película empleada en el sistema, indicando la zona lineal de trabajo. El eje de abscisas se ha transformado en densidades del objeto

$$D_i = \gamma \log E_i t + C = \gamma \log k T_o t + C$$

ya que la iluminación en el plano imagen es proporcional a la transmitancia del objeto: $E_i = k T_o$

Para $\gamma \approx -1$ y t fijo

$$D_i = -\log T_o + D_a \quad ; \quad D_i = D_o + D_a$$

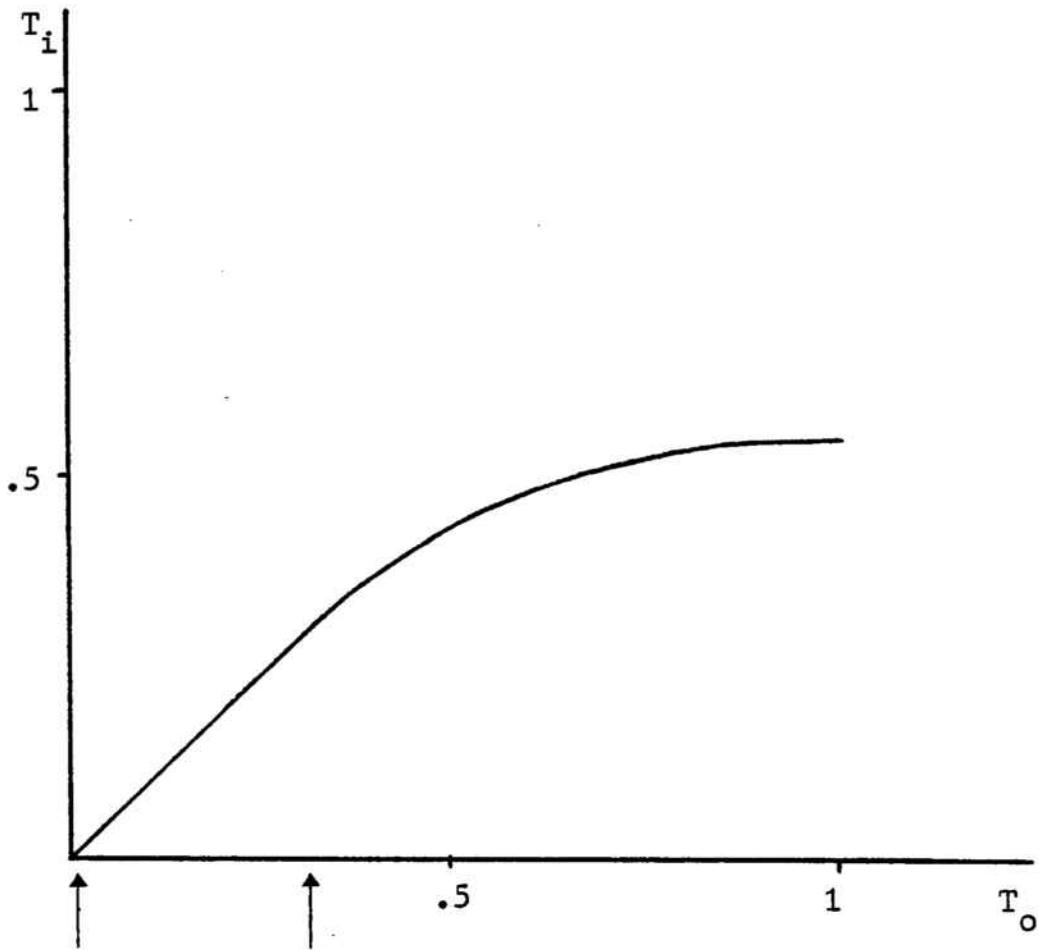


Fig. 9 .- Curva: Transmisión en el plano objeto - transmisión imagen revelada, indicando la zona lineal de trabajo.

Variante del diagrama HD en nuestras condiciones.

$$\text{Si } D_i = D_o + D_a$$

$$\log \frac{1}{T_i} = \log \frac{1}{T_o} + \log \frac{1}{T_a} \quad \Rightarrow \quad T_i = T_o T_a$$

$$\text{Si } D_a \approx 0 \quad \Rightarrow \quad T_a \approx 1$$

del objeto se traducían en valores idénticos en las transmi tancias de la imagen dentro de la zona lineal. El factor γ resultó ser de -1.01 y el equilibrio de color era bueno. Las densidades especulares siempre fueron medidas en el mismo microdensitómetro.

La zona lineal se extiende desde densidades objeto de 0.5 a 2.4, lo que se traduce en transmitancias del 31% a 0.39%. Para transmitancias altas es mucho más útil y precisa la curva de transmisiones, mientras que para las bajas es mejor la curva HD.

Para que la rendija estuviera en zona lineal colocamos de trás de la misma un filtro neutro de modo que la transmisión máxima era del 30%. Los tests sinusoidales también estaban comprendidos, sus transmisiones máxima y mínima, en el rango lineal.

Las fotografías realizadas en diafragma grande exigían corrección del tiempo para lograr una misma exposición. Nosotros preferimos no alterar el tiempo y disminuir la iluminación, a base de interponer entre plano objeto y fuentes de iluminación filtros neutros, que evaluamos en 1.5 ND.

6.5 Realización.

6.5.1 Número óptimo de series y posiciones.

Interesaba que entre dos fotografías consecutivas la variación fuese la mínima posible, pero suficiente como para poder discernir visualmente una calidad distinta de imagen. Por otra parte, había que encontrar los límites en que la imagen era deficiente en exceso.

Tras varias pruebas, decidimos las siguientes posiciones agrupadas en cuatro series:

- i) Serie en eje, con número de diafragma $N=33,14$ posiciones: 28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41.
- ii) Serie en eje, con número de diafragma $N=5.4,7$ posiciones: 32,32.5,33,33.5,34,34.5,35.
- iii) Serie en campo de $7^{\circ} 58'$, con número de diafragma $N=33$ 12 posiciones: 23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33 y 34. Para la rendija fueron doce en posición sagital y doce en posición tangencial.
- iv) Serie en campo de $7^{\circ} 58'$, con número de diafragma $N=5.4,7$ posiciones: 32,32.5,33,33.5,34,34.5 y 35. Para la rendija fueron siete en posición sagital y siete en posición tangencial.

Conviene recordar que estas posiciones corresponden al índice del soporte de la cámara sobre el banco óptico eliminando

los dos primeros dígitos, tal como se advirtió en 6.3.2 .

6.5.2 Condiciones fotográficas.

Para trabajar con seguridad con el tiempo de 35 seg. fabricamos un obturador electromecánico a base de un temporizador con reloj de cuarzo y un electroimán que accionaba el cable disparador.

Para cada posición en eje se fotografió el objeto, la rendija y unos tests sinusoidales.

Para cada posición en campo se fotografió el objeto, la rendija y los tests en posición vertical y horizontal para tener cuenta la variación astigmática de los planos sagital y tangencial.

Cada vez que se utilizaba el diafragma grande $N=5.4$ se interponían filtros neutros en la iluminación. Las tomas fotográficas se realizaron en carretes de 20 fotogramas, y en cada uno de los cuales se hacía una exposición del objeto y de la escala de grises como fotos de control. De este modo podíamos controlar, por la calidad subjetiva del color del objeto y por la medida de las transmisiones de la escala, si el revelado del carrete había sido defectuoso.

Las fotografías se efectuaron siempre 6 horas después de retirar el carrete de una cámara frigorífica y fue revelado siempre en un intervalo comprendido entre las 6 y las 12 horas.

Las últimas medidas densitométricas de las películas nunca superaron los tres meses desde la fecha de revelado. No creemos que en este tiempo el envejecimiento de los films tuviera efecto apreciable sobre el equilibrio de color, tras examinar el trabajo (132).

6.5.3 Condiciones de revelado.

Por cada dos carretes se preparaban reveladores nuevos para evitar posibles variaciones producidas por líquidos agotados. Los tanques de revelado eran de medio litro y para esta capacidad el fabricante aconsejaba un revelado máximo de seis carretes.

Las condiciones de revelado fueron las siguientes, según el proceso E-6:

- Primer revelador: 6 minutos , a 38°C con agitación continua
- Primer lavado: 2 minutos, a 20-25°C, a renovación constante
- Baño reversible: 2 minutos, a 33-39°C sin agitación
- Revelador de color: 6 minutos, a 38°C con agitación continua
- Acondicionador: 2 minutos, a 33-39°C sin agitación
- Blanqueador: 6 minutos, a 33-39°C con agitación continua
- Fijador: 4 minutos, a 33-39°C con agitación continua

- Lavado final: 6 minutos, a 20-25°C a renovación constante
- Estabilizador: $\frac{1}{2}$ minuto, a 20-25°C sin agitación

Los tiempos de revelado nunca tuvieron error mayor que 5 seg. Las fluctuaciones de temperatura en los revelados nunca fueron mayores de ± 0.3 °C.

La agitación incluía movimiento rotatorio con vaivén vertical. Nunca se observaron fenómenos de adyacencia.

El secado fue realizado a temperatura ambiente, sin corriente de aire para evitar inclusiones de partículas de polvo.

7.- ANALISIS DE LA IMAGEN

7.- ANALISIS DE LA IMAGEN

7.1 Descripción general.

Las diapositivas obtenidas de la imagen de la rendija objeto, una vez reveladas fueron procesadas por un microdensitómetro construido en este laboratorio (63).

Las señales eléctricas obtenidas en el fotomultiplicador pasaban a la memoria de un multicanal Hewlett Packard 5485 A. De allí se podía obtener la traza sensitométrica de la imagen a través de un registrador gráfico Kipp & Zonen BD5. A continuación estas señales eran transferidas como datos a un ordenador Varian 71 para calcular su transformada de Fourier y el MFT. Para entrar adecuadamente estos datos al ordenador hubo que adaptar un voltímetro digital que actuaba como interface.

7.2 Sensitometría.

7.2.1 El microdensitómetro.

Básicamente consta de un sistema de iluminación, una rendija de barrido de dimensiones variables y un condensador que forma la imagen de la misma sobre el plano de la muestra. La muestra o test va sobre una platina móvil accionada por un motor síncrono, que a su vez es guiado por un programador secuencial que permite prefijar el número, la duración y la velocidad de los barridos. A continuación un objetivo envía la imagen de la muestra barrida a un fotomultiplicador RCA tipo S11. A la salida del objetivo hay unos filtros de corrección de color que hacen que la respuesta espectral del microdensitómetro sea análoga a la del ojo humano en visión fotópica.

7.2.2 Tamaño de la rendija de barrido.

Interesaba que fuera lo más reducida posible pero que diera intensidad suficiente. Era recomendable que fuera $1/10$ de la anchura de la muestra a barrer, según recomiendan Pruss y Studenova (123). La anchura de la rendija objeto reducida al plano imagen era de unas 20 micras, lo que implicaría una rendija de barrido de 2 micras, y para este valor resultaba poco luminosa. Tras algunas pruebas la fijamos en 5 micras y decidimos tener en cuenta la corrección necesaria en los cálculos de los MFT. Por otra parte las mejores rendijas imagen quedaban más ensanchadas debido a las aberraciones y difracción del sistema óptico, con una anchura media de 45 micras.

7.2.3 Digitalización.

Este fue un problema de optimización entre dos variables , el período de digitalización en la transformada y la anchura de la rendija objeto.

Por un lado la anchura reducida L de la rendija objeto debía ser tal que el primer mínimo de su transformada (función $\text{sinc}(\pi L\nu)$) estuviera en una frecuencia espacial alta. La razón de esta condición está en que en las proximidades del mínimo, al calcular el MFT estaríamos dividiendo por valores próximos a cero, pudiendo introducir grandes errores. Como el MFT del sistema se conocía por otros trabajos (34) y (61), y tenía valores de 0.1 por la frecuencia espacial de 30 mm^{-1} , la frecuencia del primer cero debía ser del orden de 40 mm^{-1} . Este razonamiento condujo a una rendija test objeto de una anchura medida media de 0.272 mm, que reducida al plano imagen era de 20.7 micras (aumento lateral medio estimado en -13.21). Así el primer cero de su transformada estaba en la frecuencia espacial de 48.2 mm^{-1} .

Para la digitalización se debía tener en cuenta que en un caso ideal en que la imagen fuera una función rectángulo de anchura L , $L = nT$, siendo T el período de digitalización y n el número de puntos muestreados dentro de este rectángulo. La frecuencia espacial del primer cero es tal que : $\nu_0 L = 1$

Pero el intervalo de digitalización en la transformada:

Δv venia dado por $\Delta v = \frac{1}{128T}$ (puesto que el programa operaba con 128 puntos). Si T se hacía muy pequeño se ganaba información en frecuencias altas, pero se perdía en las bajas al distanciarse los valores de la transformada en Δv . Si T se hacía grande, se obtenían más valores en las bajas frecuencias, pero eran menos fiables, aparte de que se podía presentar el problema del "aliasing!"

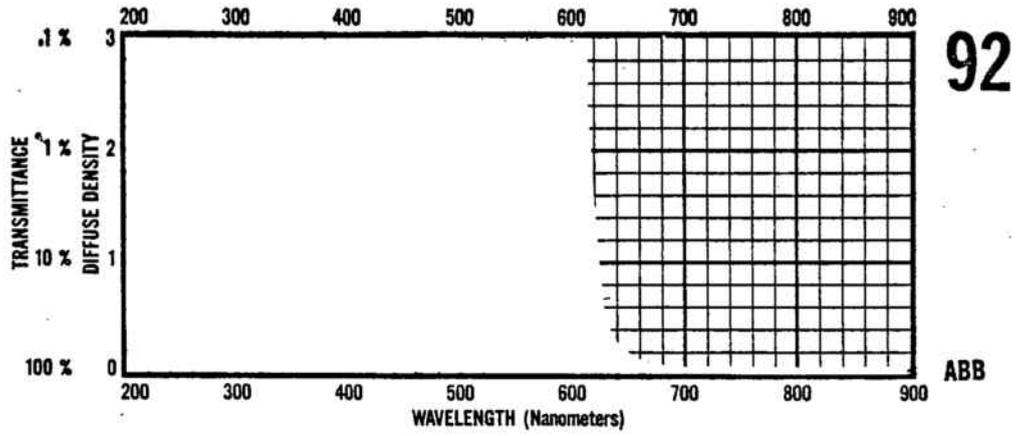
Tras varias pruebas de tanteo se estableció definitivamente el periodo de digitalización en $7.8125 \cdot 10^{-3}$ mm (que corresponde a una velocidad de traslación de barrido de .0976 mm/s, y muestreo de 25 puntos cada 2 segundos), con lo cual se obtenia un Δv de 1 mm^{-1} en la transformada.

7.2.4 Modos de operación.

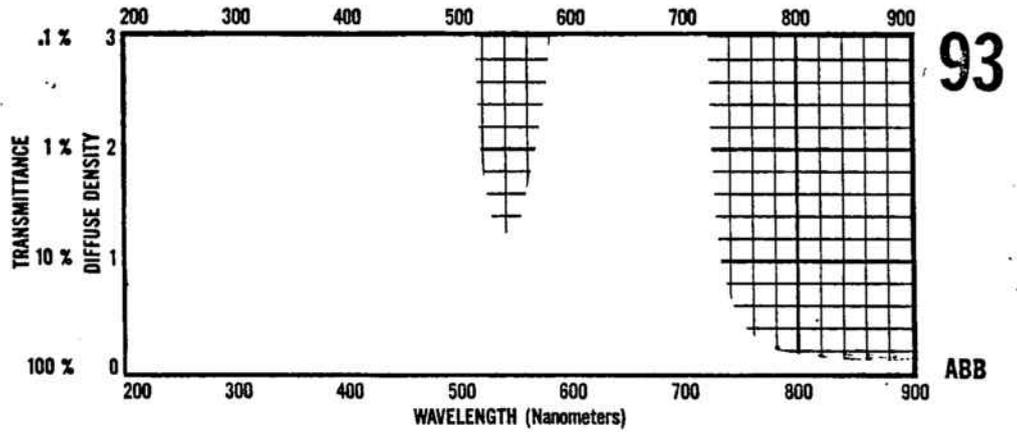
El modo M1 se refiere al método descrito con el microdensitómetro ajustado a la respuesta del ojo humano.

El modo M2 consistió en sustituir los filtros anteriores por cada uno de los filtros Kodak Wratten 92, 93, 94 (137) cuya transmisión nominal se indica en la figura 10 , obteniendo para cada posición tres barridos correspondientes a zona roja, verde y azul del espectro.

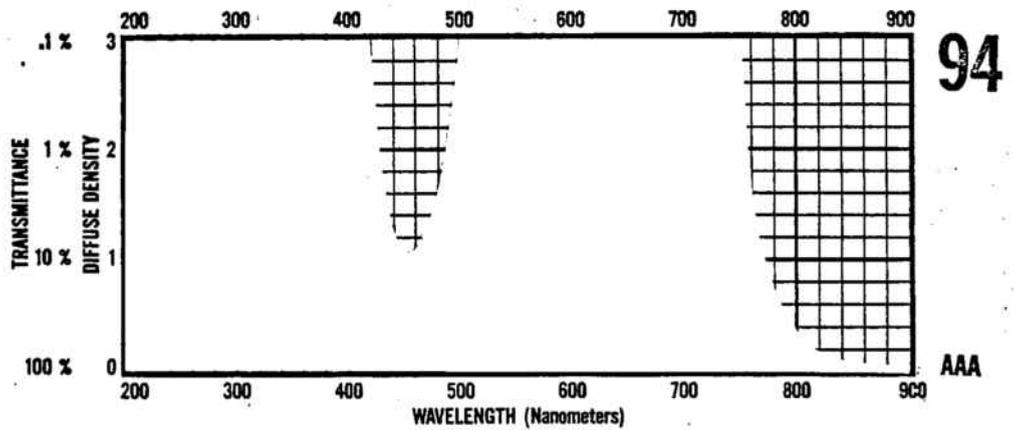
El modo M3 se refiere a considerar los barridos a través del filtro verde Kodak Wratten nº 93.



Red. Used with No. 93 and 94 for densitometric measurement of color films and papers.



Green. Used with No. 92 and 94 for densitometric measurement of color films and papers.



Blue. Used with No. 92 and 93 for densitometric measurement of color films and papers.

Fig. 10.- Distribución espectral de los filtros Wratten Kodak empleados en el modo M2.

Para el modo M4 eliminamos los filtros de microdensitómetro y sustituimos el sistema de iluminación por un monocromador Spekol de CarlZeiss-Jena. Para cada posición se realizaron 11 barridos correspondientes a las longitudes de onda 425, 450, 475, 500, 525, 550, 575, 600, 625, 650 y 675 nm.

7.3 Cálculo.

Las medidas sensitométricas eran transferidas al ordenador.

El programa utilizado para el cálculo de la transformada de Fourier es una adaptación de la transformada rápida "Fast Fourier" (133), (134) y (135) que utilizaba un muestreo con potencias de 2 (136).

El programa tomaba primero 256 puntos de cada barrido y seleccionaba 128, centrando el valor de pico. Calculaba la transformada de Fourier para valores de la frecuencia desde 0 a 33, con $\Delta \nu = 1$, y normalizaba para frecuencia cero, y dividía los valores por la transformada de Fourier del objeto reducido: $\text{sinc}(\pi \nu 0.0207)$, para cada ν . Además corregía la medida, dividiendo por el MFT de la rendija de barrido: $\text{sinc}(\pi \nu 0.005)$, tal como hemos indicado en el apartado 3.2.1.

En el modo M3 se realizaba el mismo cálculo para cada una de las posiciones barridas con el filtro verde.

En el modo M2 el ordenador calculaba cada uno de los tres MFT correspondientes a los barridos rojo, verde y azul y para cada frecuencia efectuaba la ponderación descrita en el apartado 5.2.3, dando así el MFTP en cada posición.

En el modo M4 se registraba cada uno de los 11 MTF monocromáticos calculados y se realizaba la ponderación citada en 5.2.2, según valores de la sensibilidad espectral de un observador estandar CIE - 64 (138). Esto se repetía para cada posición.

7.4 Curvas del MFTP calculadas.

En el modo M1 se midieron los MFTP correspondientes al total de las 59 posiciones descritas en 6.5.1.

En el modo M2 y el M3 se simplificaron las posiciones de cada serie en :

Serie eje, $N = 33$, 5 posiciones, 29, 32, 35, 39 y 40

Serie eje, $N = 5.4$, 3 posiciones, 32.5, 33.5 y 34.5

Serie $7^{\circ}58'$, $N = 33$, 5 posiciones, 23, 25, 28, 31 y 33. Tanto para la sagital como para la tangencial.

Serie $7^{\circ}58'$, $N = 5.4$, 3 posiciones, 32.5, 33.5 y 34.5. Tanto para la sagital como para la tangencial.

En total medimos los MFTP de 24 posiciones en cada uno de estos modos M2 y M3, suponiendo un total de 96 medidas de módulo.

En el modo M4 tuvimos que efectuar una simplificación mayor, dada la cuantía de la labor experimental y de cálculo precisa, que fue la siguiente:

Serie eje, N = 33, 3 posiciones, 32, 33 y 35

Serie eje, N = 5.4, 2 posiciones, 32.5 y 34.5

Serie $7^{\circ}58'$, N = 33, 3 posiciones 25, 28 y 31, sagital y tangencial.

Serie $7^{\circ}58'$, N = 5.4, 1 posición, 33.5, sagital y tangencial, sumando 13 medidas del MFTP (pero comprendiendo 143 MFT monocromáticas).

Finalmente calculamos mediante ordenador el criterio A4, aplicado en cada modo y series. Tal como hemos visto en el apartado 5.3, dicho criterio multiplica el MFT del ojo por el MFTP del conjunto objetivo-película y por la frecuencia espacial, además al número final hay que restarle 1 y multiplicar por 20 para efectuar una escala apropiada. Los datos del MFT del ojo se tomaron de los trabajos de Overington y Gullick (45) traduciendo la escala de frecuencias de líneas/grado a líneas/mm en las condiciones de visualización (distancia observador a pantalla).

8.- RESULTADOS

8.- RESULTADOS

8.1 MFTP en modo M1

Con objeto de clarificar la presentación de los resultados hemos omitido algunas de las curvas medidas.

i) Serie en eje y N=33

La figura 11 presenta 8 de las 14 posiciones. Las curvas presentan una morfología similar siendo fácil su ordenación por el área que encierran con el eje de frecuencias, expresadas en líneas/mm. Dicha ordenación coincide con la de los observadores, por lo que esta serie constituye una buena referencia.

ii) Serie en eje y N=5.4

Presentamos 4 de las 7 medidas en la figura 12. Las curvas cambian de forma y se nota la fuerte aberración esférica del sistema óptico. Los observadores acusaban una mejor resolución pero peor calidad en las posiciones más alejadas (34, 35) y peor resolución y mejoramiento del contraste y color en posiciones más cercanas al sistema (32, 33). Esto se refleja perfectamente en las curvas correspondientes a estas posiciones, en que las primeras caen bruscamente pero mantienen apreciablemente en frecuencias altas. Las segundas des -

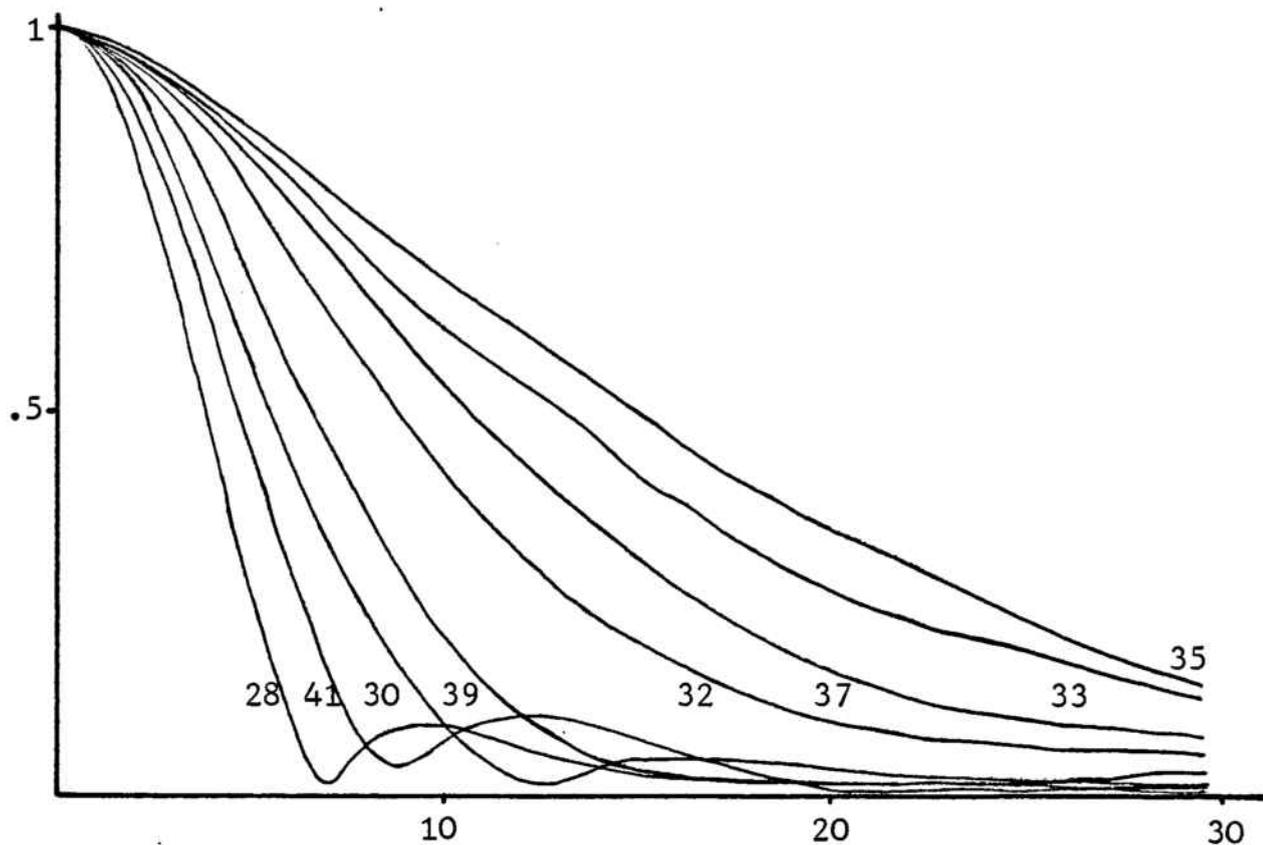


Fig. 11 .- MFTP. Serie en eje y N=33.

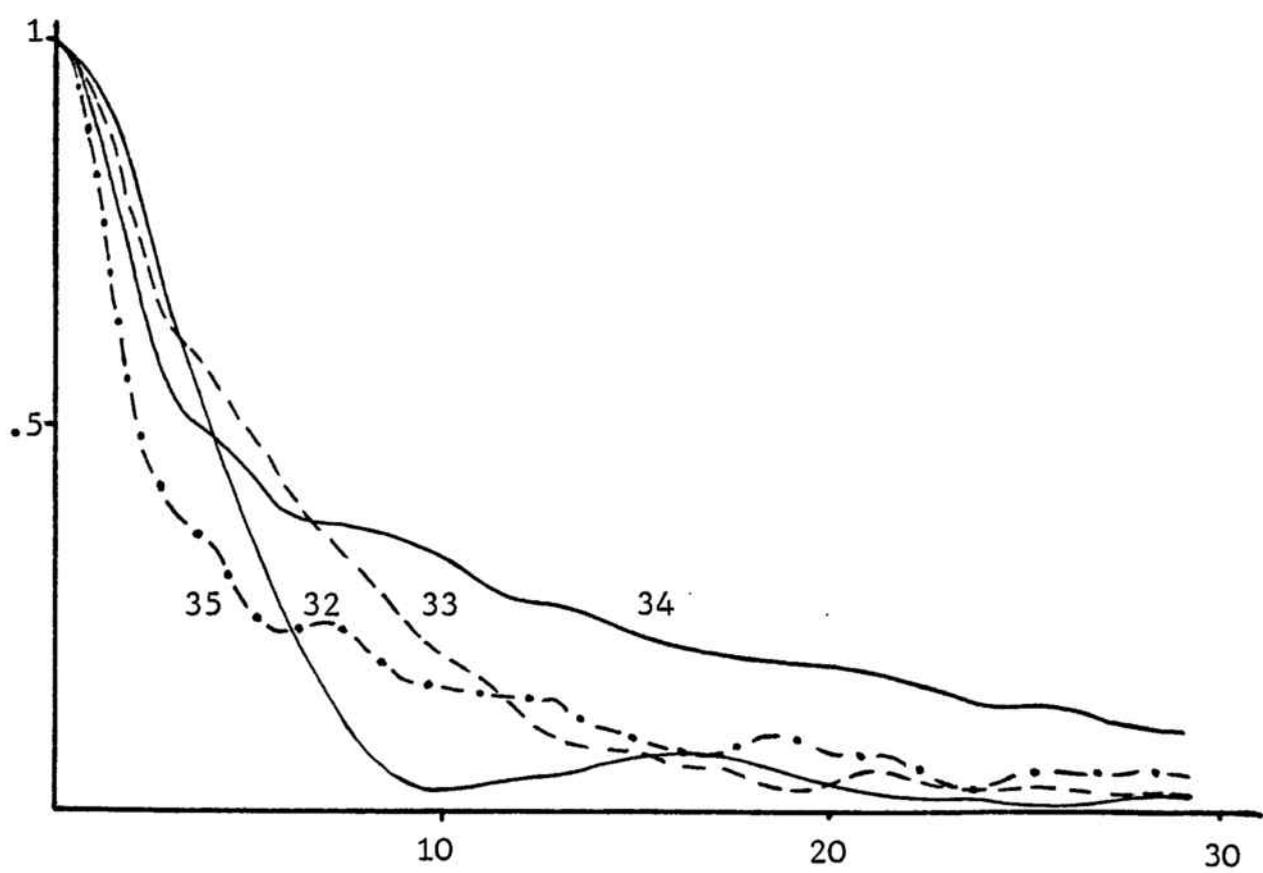


Fig. 12 .- MFTP. Serie en eje y N=5.4.

cienden primero lentamente, pero se aproximan al eje horizontal con mayor rapidez. También se muestra este efecto en los registros sensitométricos de la rendija, en la figura 13.

iii) Serie en campo y $N=33$

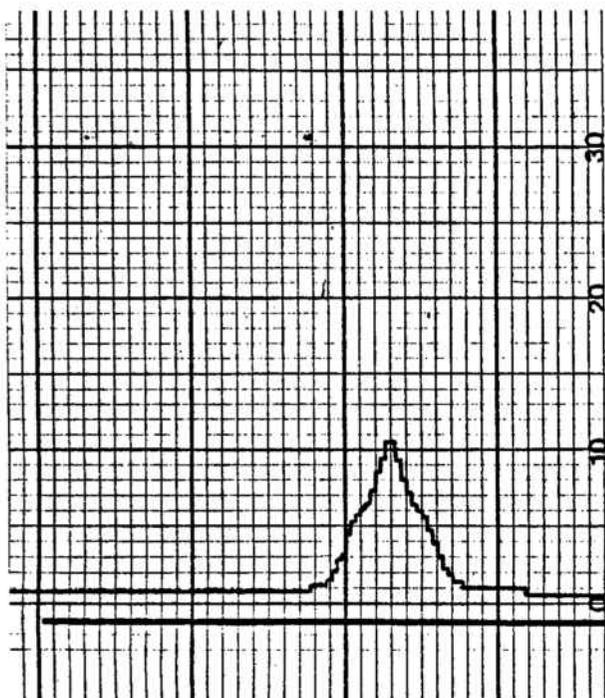
Las figuras 14 y 15 contienen 5 de las 12 posiciones, en orientación tangencial y sagital. Se aprecian los efectos del astigmatismo.

Los observadores notan en la posición 25 una buena definición en objetos verticales, y efectivamente, la curva sagital más alta corresponde a dicha posición. Análogamente en la posición 31, acusaban nítidas las líneas horizontales y poco las verticales, y es la curva tangencial en esta posición la que se mantiene por encima de las demás.

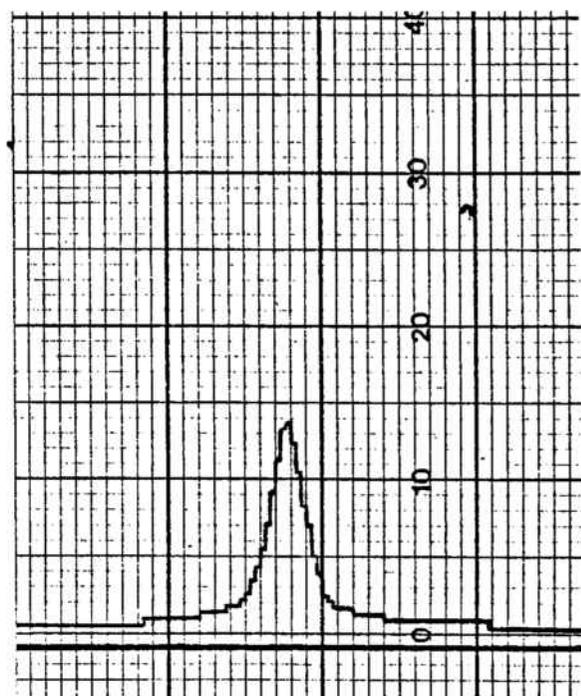
Es interesante destacar que en esta serie los observadores señalaron como mejor imagen la que corresponde a la posición 28, y según las curvas, prácticamente coinciden la sagital y tangencial en esta posición. La mejor imagen se encuentra a mitad entre la tangencial y la sagital tal como afirmaron en 1966 Casas, Moneo e Yzuel (140).

iv) Serie en campo y $N=5.4$

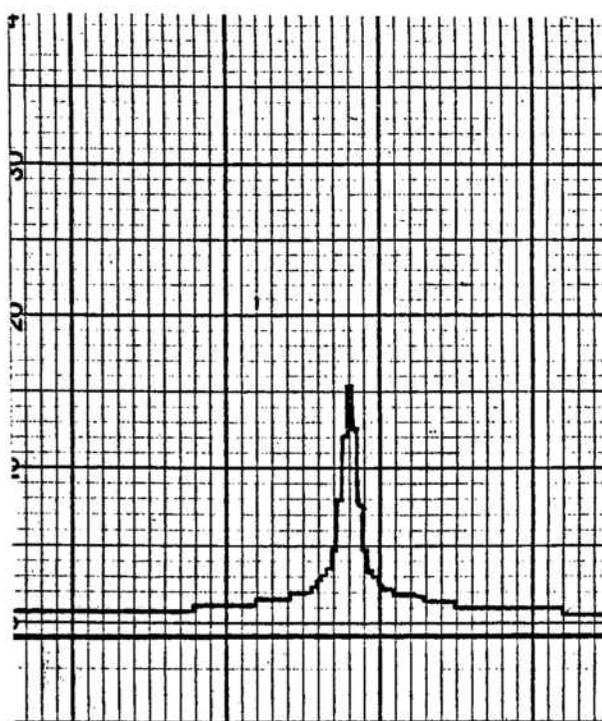
Las figuras 16 y 17 muestran 3 de las 7 posiciones en orientación sagital y tangencial. Las imágenes son bastante deficientes debido al fuerte coma que llega a enmascarar el astigmatismo. Las mejores imágenes se aprecian entre las posi-



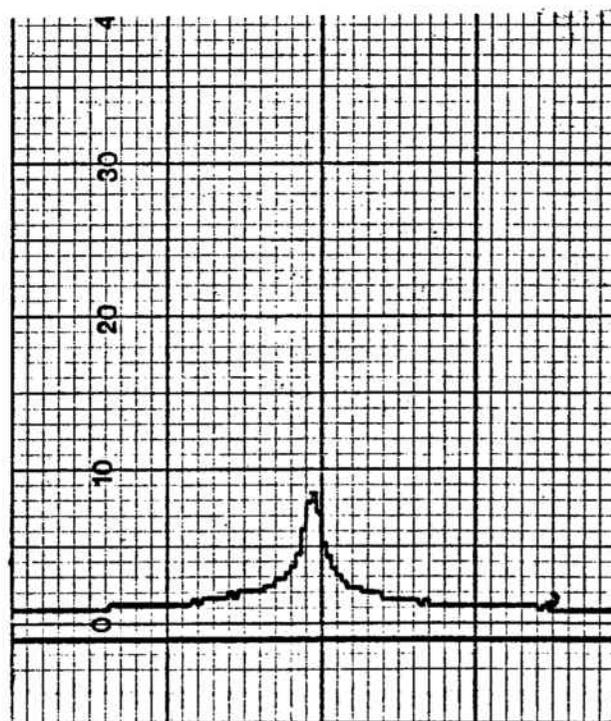
Posición 32



Posición 33



Posición 34



Posición 35

Fig. 13.- Intensidad de la imagen de la rendija de la serie en eje y $N = 5.4$.

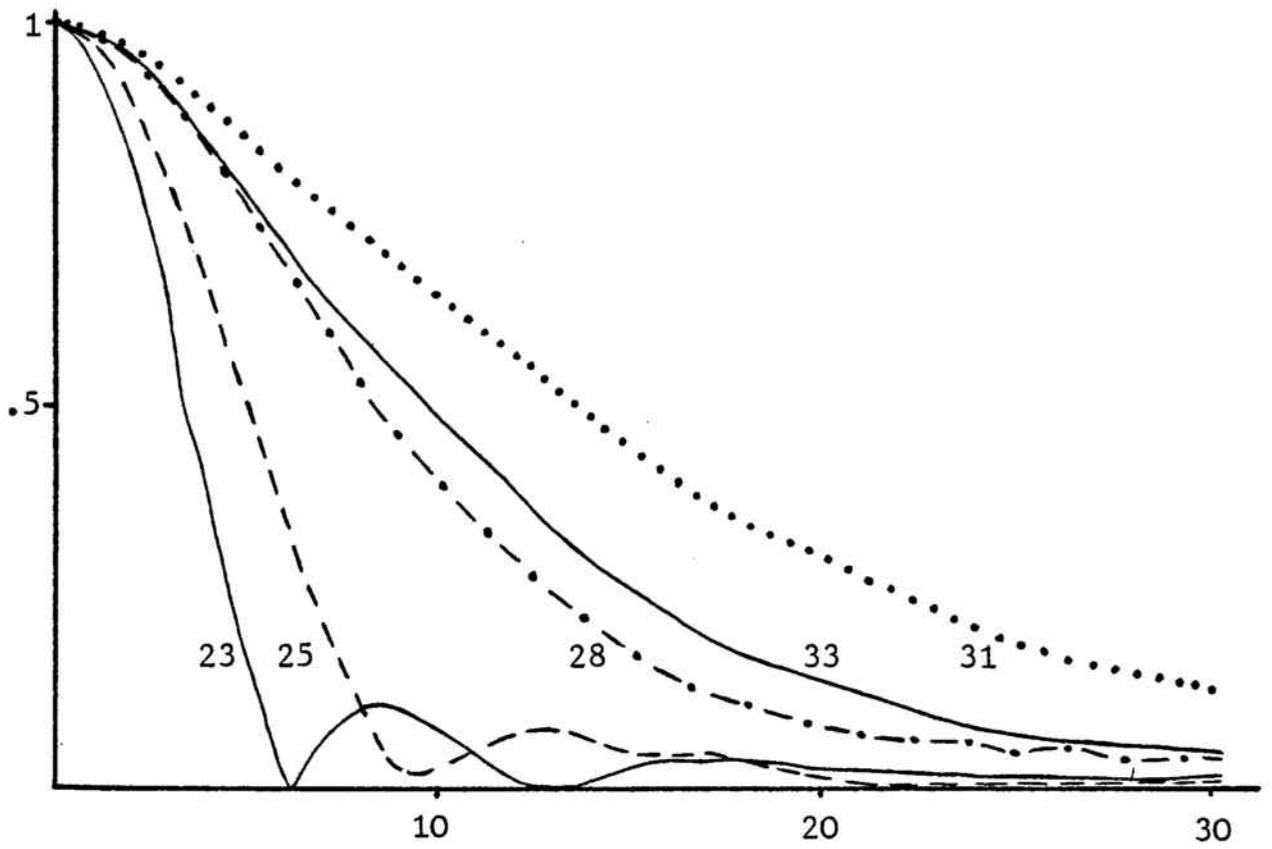


Fig. 14.- MFTP. Serie $7^{\circ}58'$, $N=33$. Tangencial.

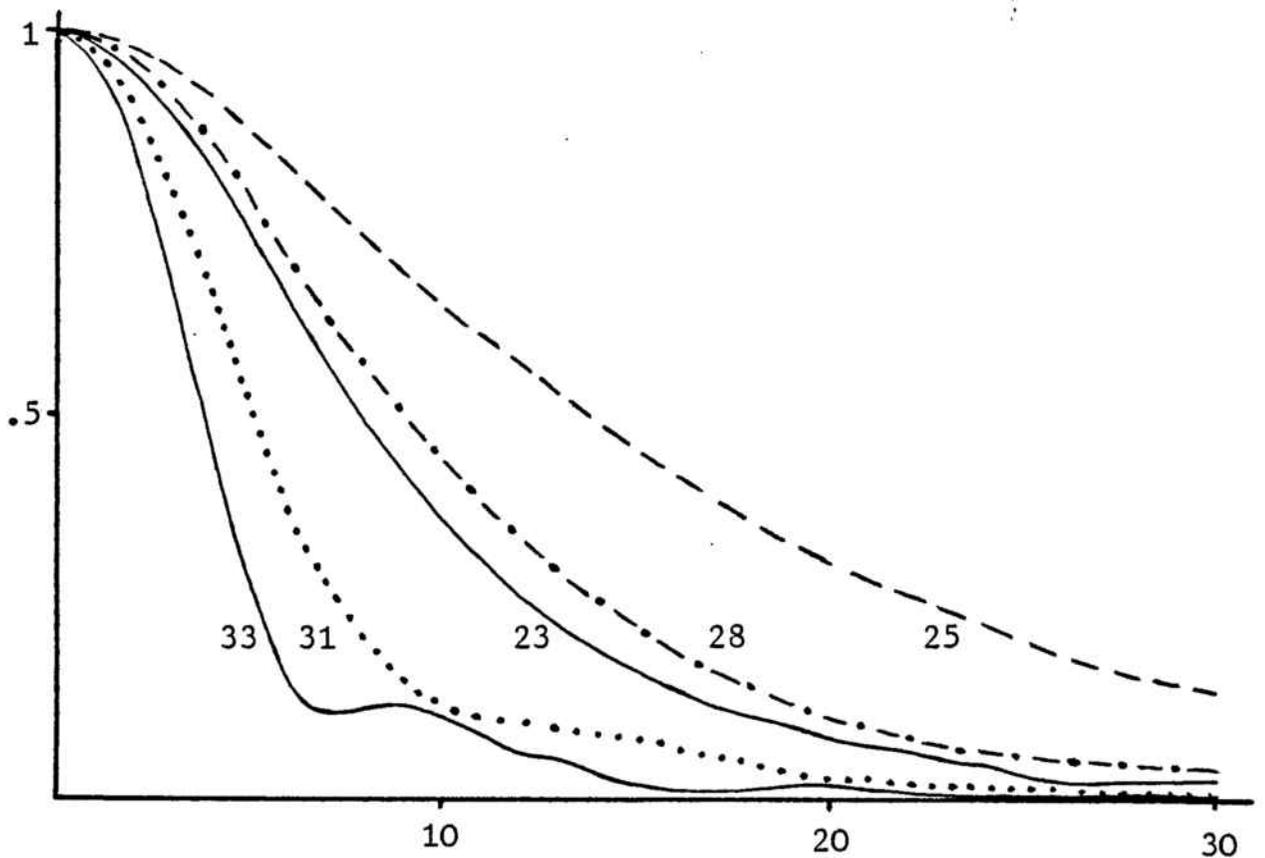


Fig. 15.- MFTP. Serie $7^{\circ}58'$, $N=33$. Sagital.

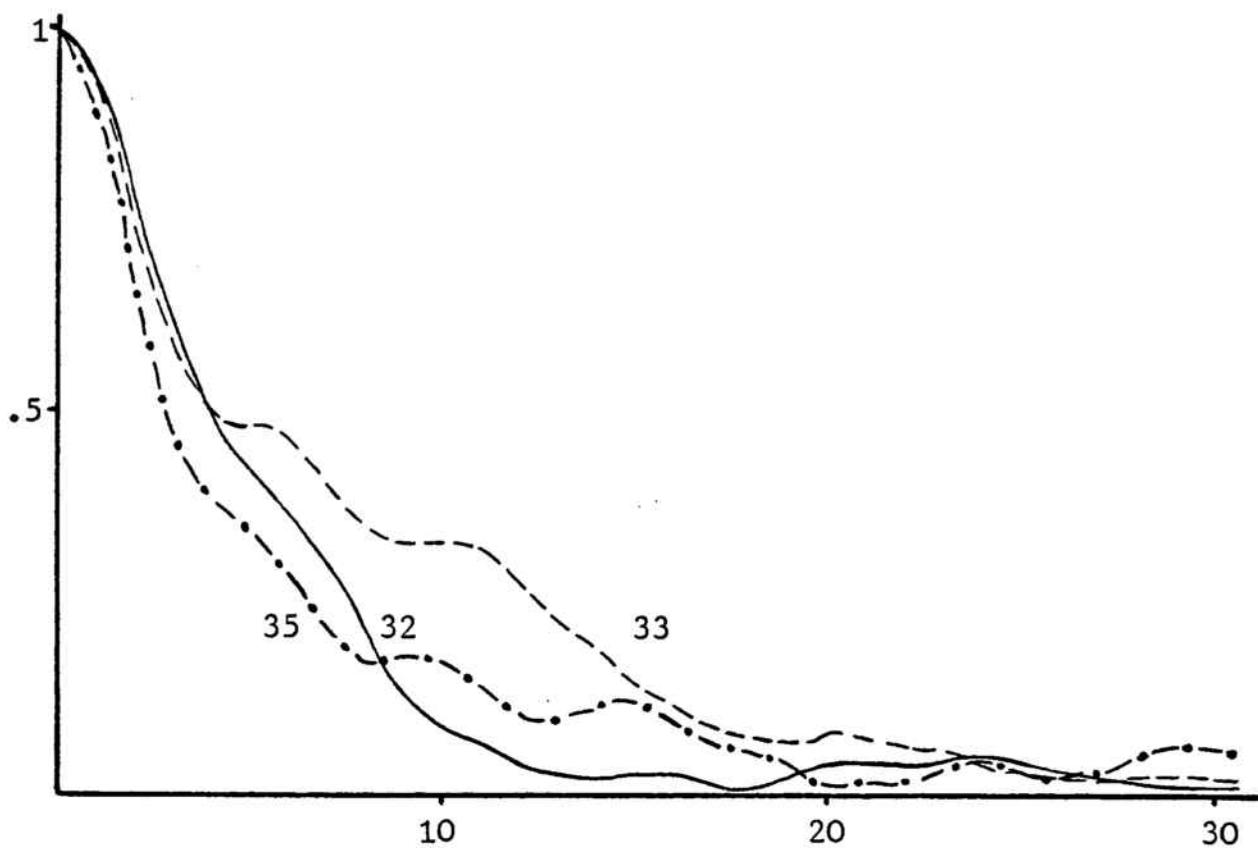


Fig. 16.- MFTP. Serie 7°58', N=5.4. Tangencial.

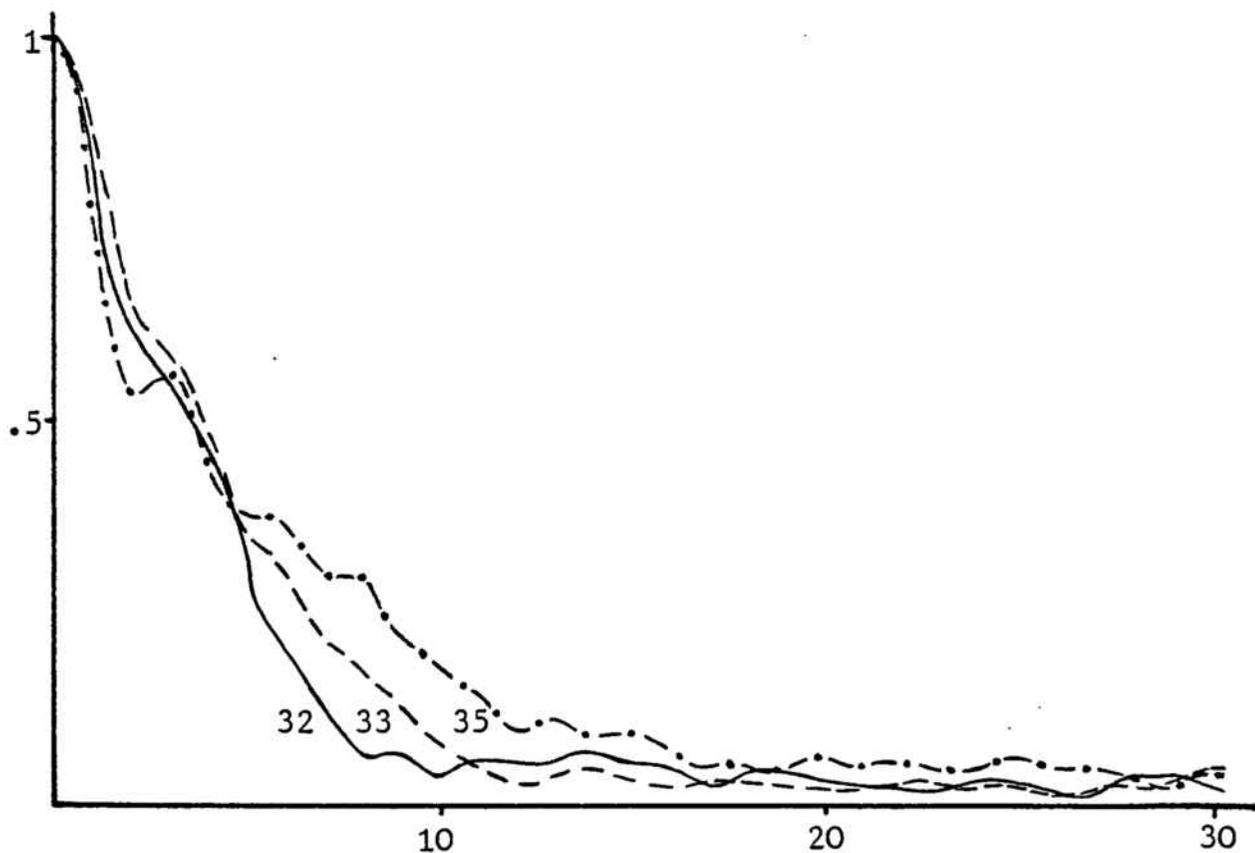


Fig. 17.- MFTP. Serie 7°58', N=5.4. Sagital.

ciones 33 y 34, superando el plano sagital, también en concordancia con los trabajos (140) y (141). Tal como se aprecia en las curvas su caída es rápida.

Las curvas obtenidas del MFTP en este modo M1 presentan en general una buena correlación con la calidad subjetiva de la imagen. La aplicación del criterio A4 permitirá afinar más en la ordenación.

Tal como hemos citado, en otro trabajo paralelo se definió el MFTP como cociente de contrastes entre la imagen y el objeto de unos tests sinusoidales medidos con el mismo microdensitómetro adaptado a la visión, y en las mismas condiciones por realizarse simultáneamente el proceso fotográfico. Los tests sinusoidales fueron elaborados con anterioridad en el Departamento (142). Comparando aquellas medidas con las del presente trabajo presentan una gran concordancia en los resultados. Las diferencias máximas en el peor de los casos no sobrepasan el valor absoluto de 0.15. Las figuras 33, 34, 35 y 36 muestran los resultados frente a las medidas en modo M1 de algunas posiciones.

8.2 Comparación entre los cuatro modos.

i) Serie en eje y N=33

Las figuras 18, 19 y 20 contienen el MFTP medido según los cuatro modos.

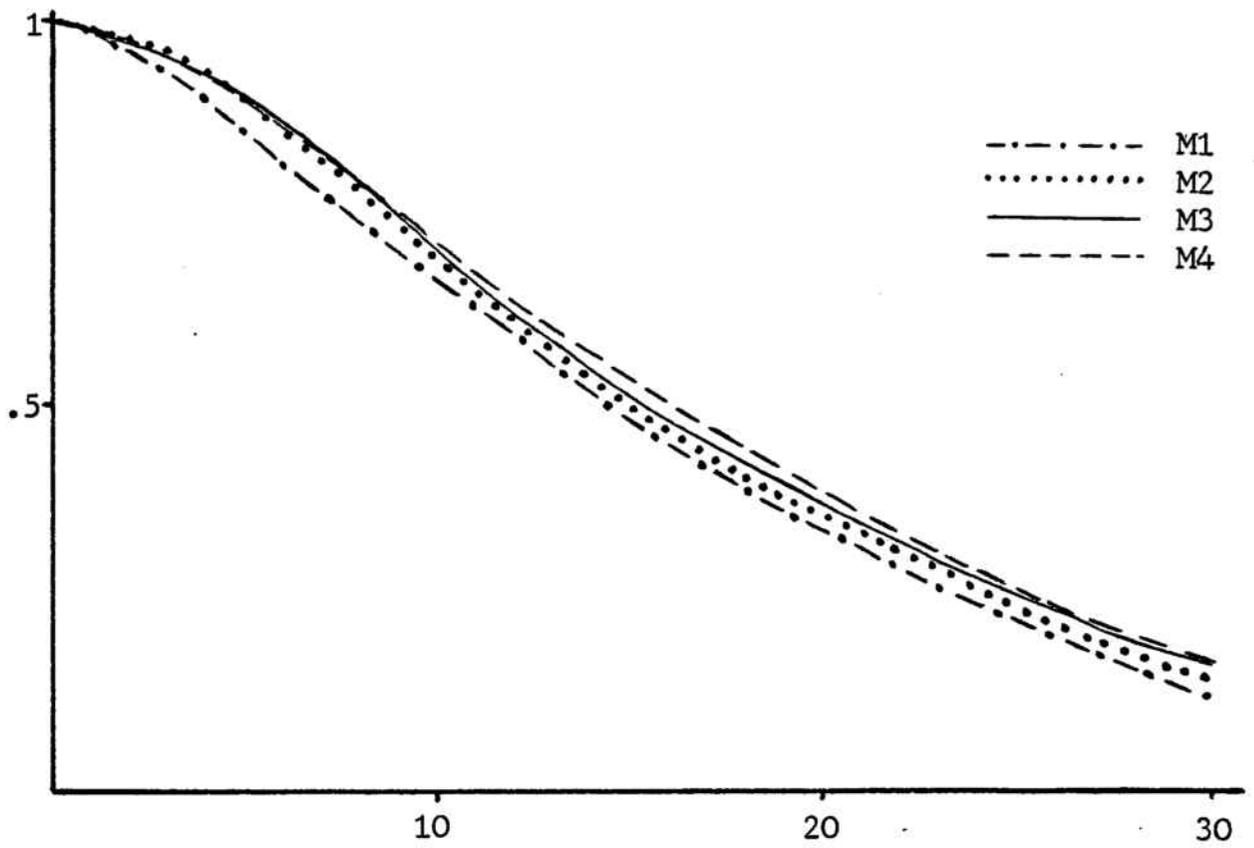


Fig. 18.- Serie en eje y N=33. Posición 35.

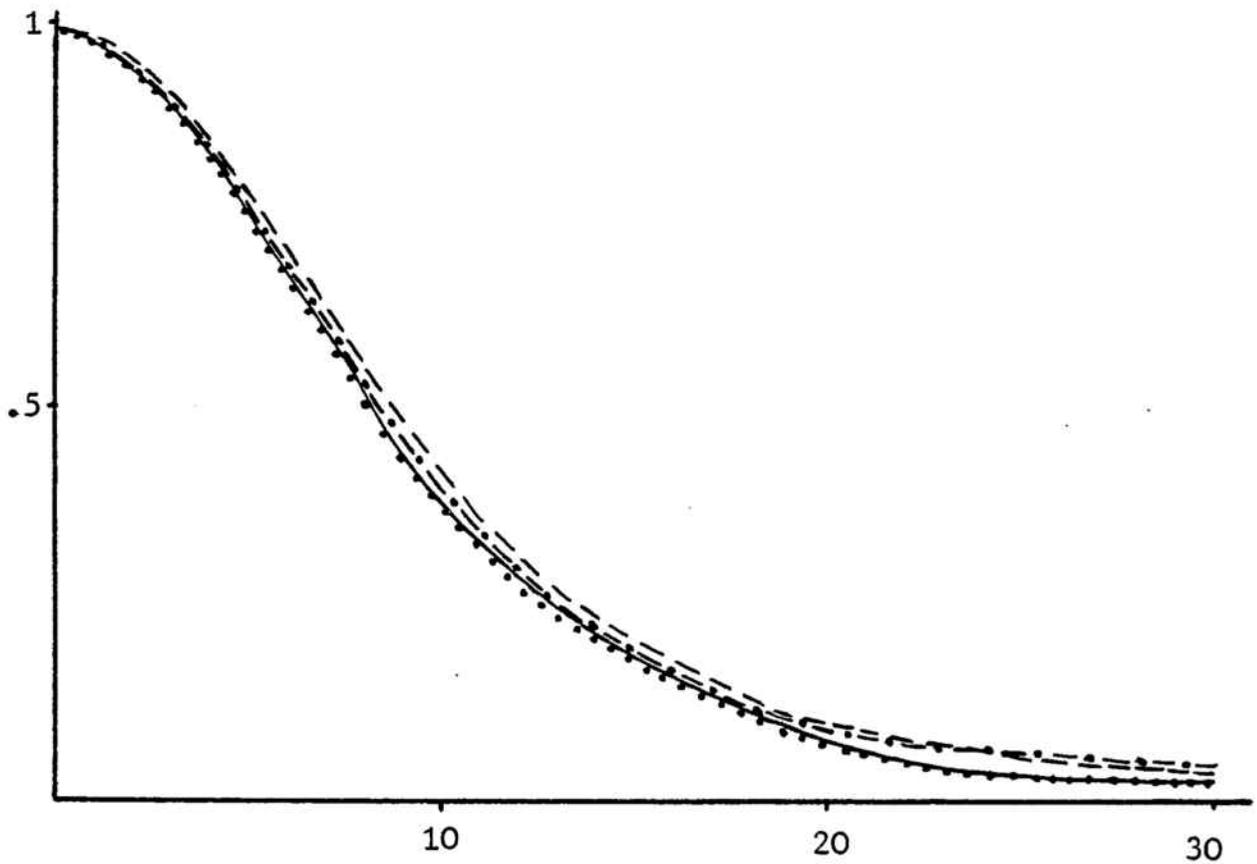


Fig. 19.- Serie en eje y N=33. Posición 32.

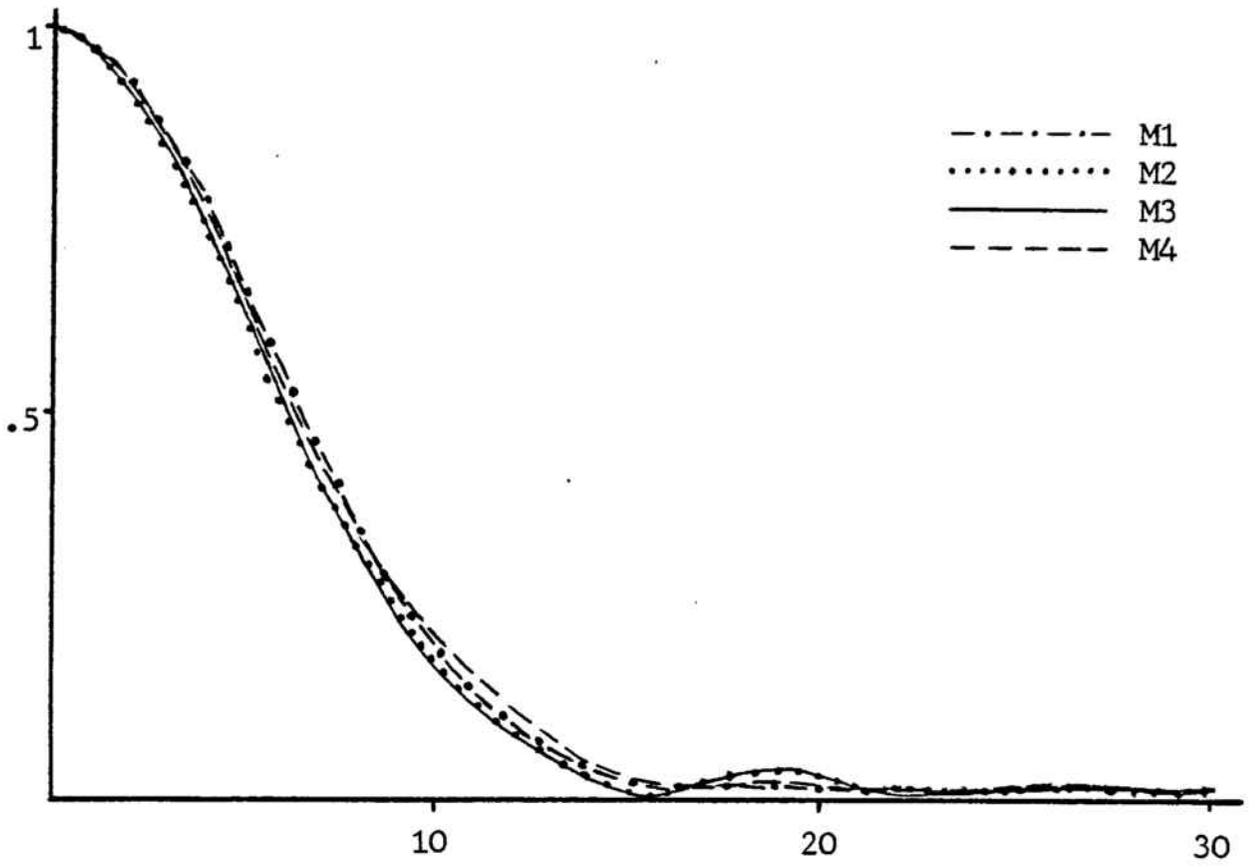


Fig. 20 .- Serie en eje y N=33. Posición 39.

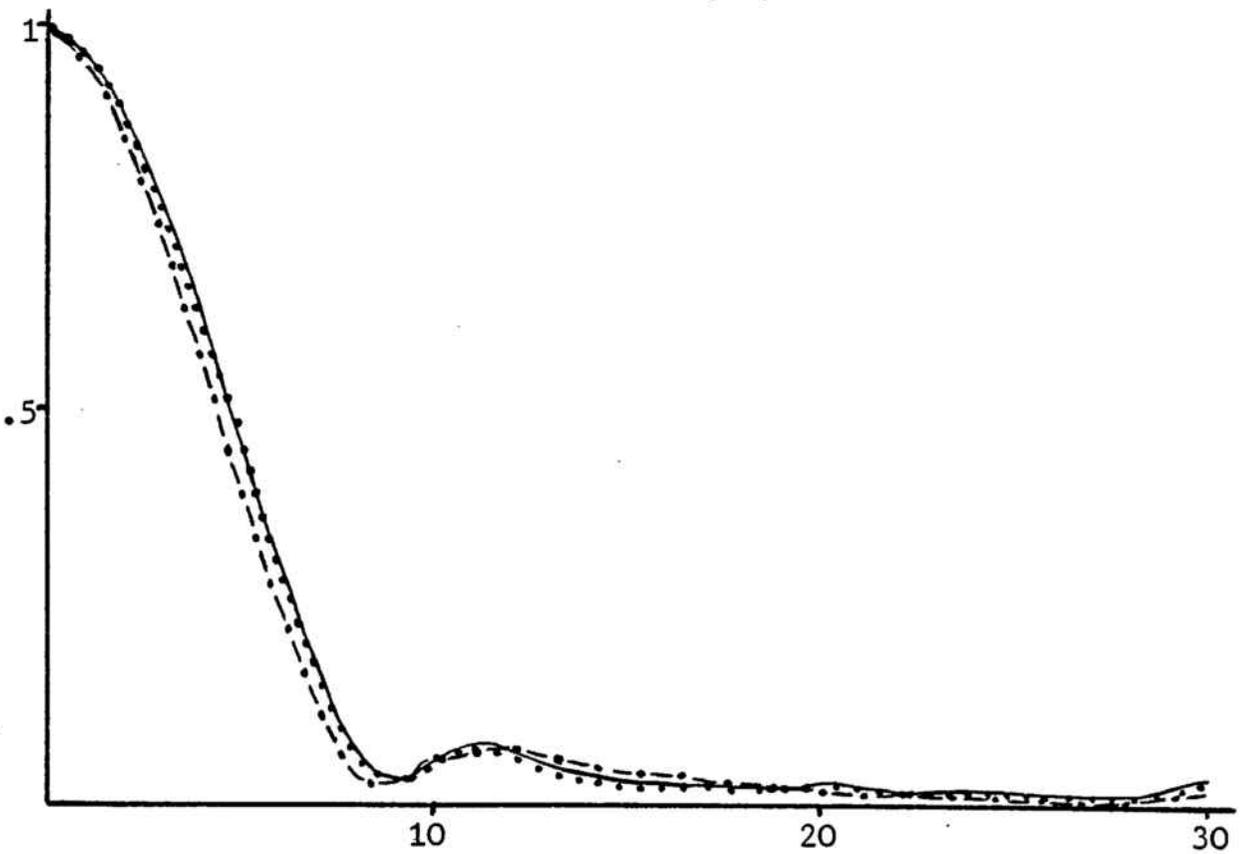


Fig. 21 .- Serie en eje y N=33. Posición 29.

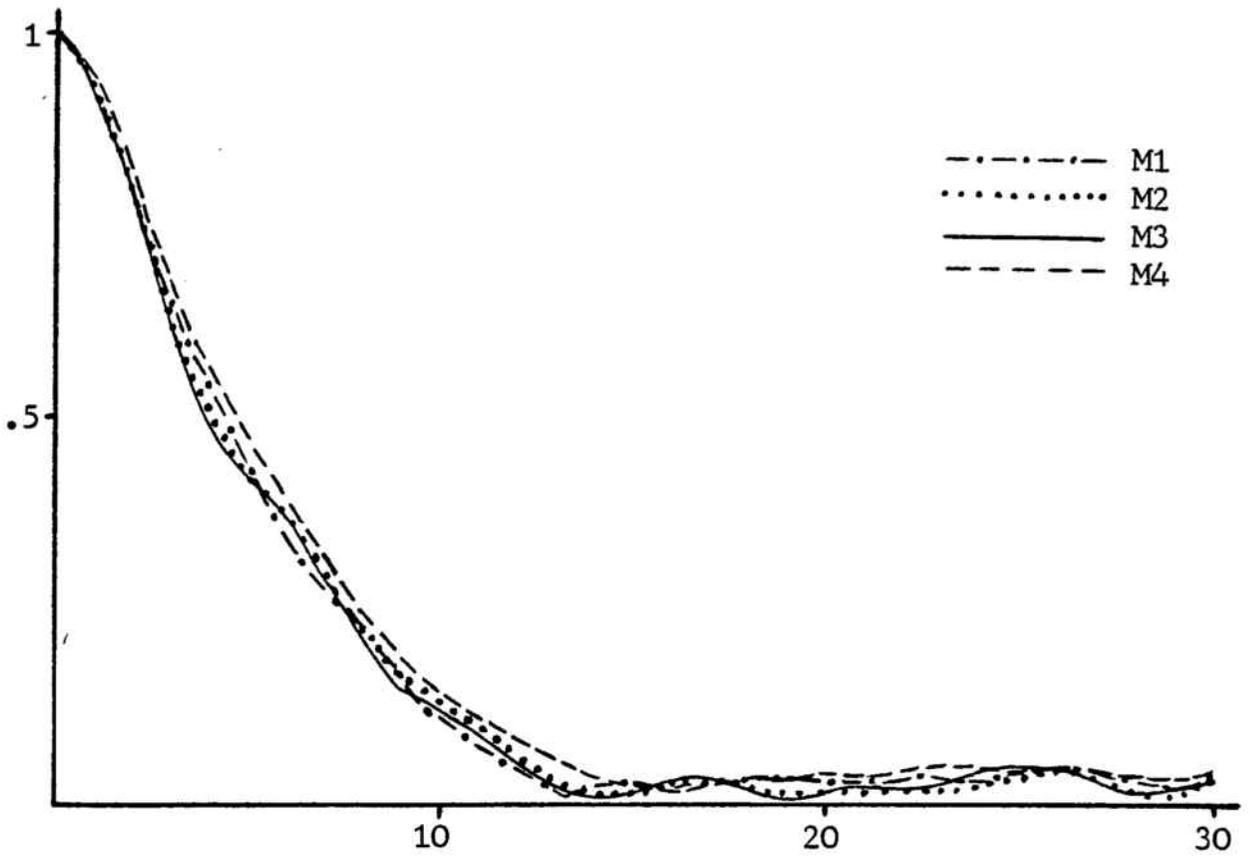


Fig. 22.- Serie en eje y N=5.4. Posición 32.5.

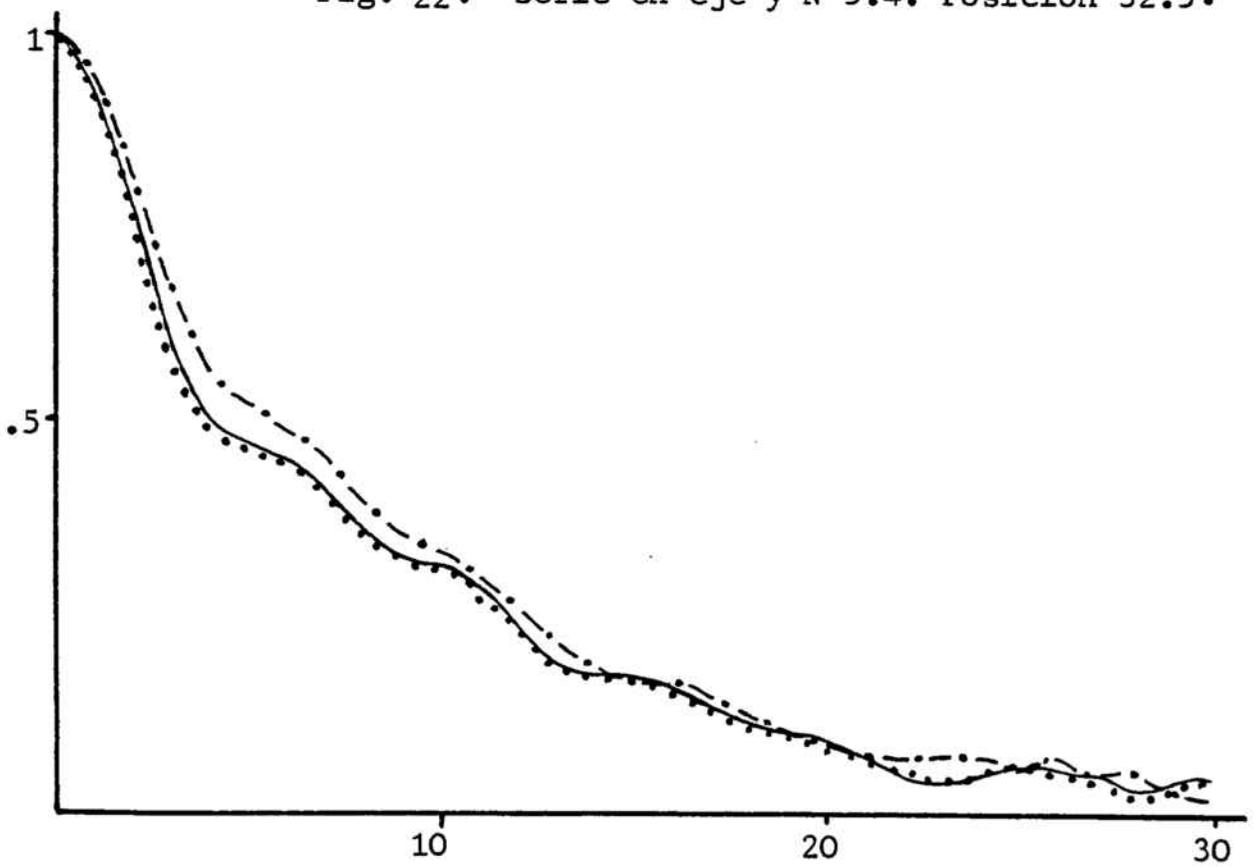


Fig. 23.- Serie en eje y N=5.4. Posición 33.5.

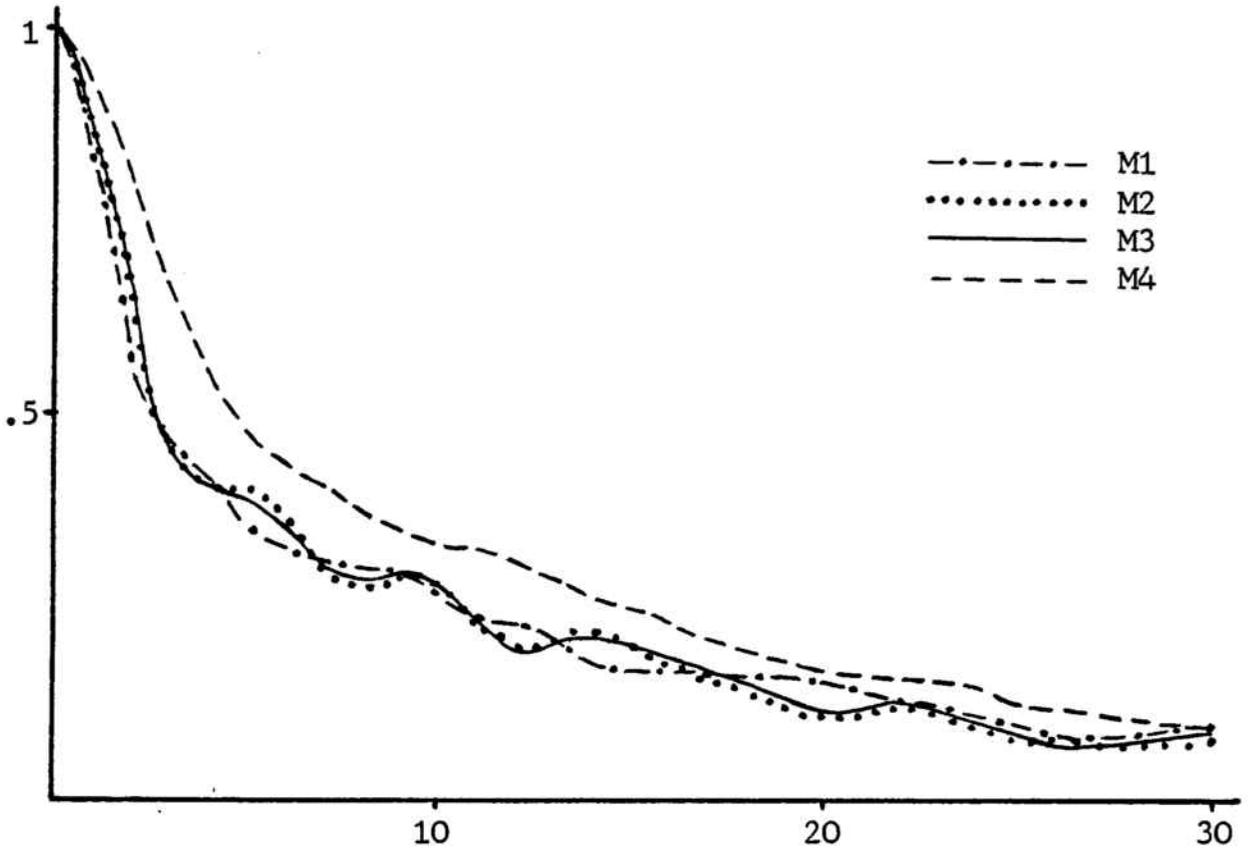


Fig. 24 .- Serie en eje y N=5.4. Posición 34.5.

La similitud de los resultados es evidente, y en general, el M4 tiene valores más altos. El M2 y M3 son casi coincidentes, pero M3 por encima de M2, resultado lógico por la ponderación menor de los colores rojo y azul.

El modo M1 fluye entre los demás, presentando una tendencia a tomar valores más bajos.

La figura 21 contiene los modos M1, M2 y M3 en la posición 30.

ii) Serie en eje y $N=5.4$

Las figuras 22 y 24 muestran los cuatro modos. En la última el M4 se separa sensiblemente.

En la figura 23 (posición 33.5) hay sólo los modos M1, M2 y M3.

iii) Serie en campo y $N=33$

Las figuras 25, 27 y 29 corresponden a orientación tangencial, mientras que las figuras 26, 28 y 30 corresponden a orientación sagital. La agrupación de las medidas es satisfactoria.

iv) Serie en campo y $N= 5.4$

Reflejada en las figuras 31 y 32, de una misma posición (33.5) en orientación tangencial y sagital.

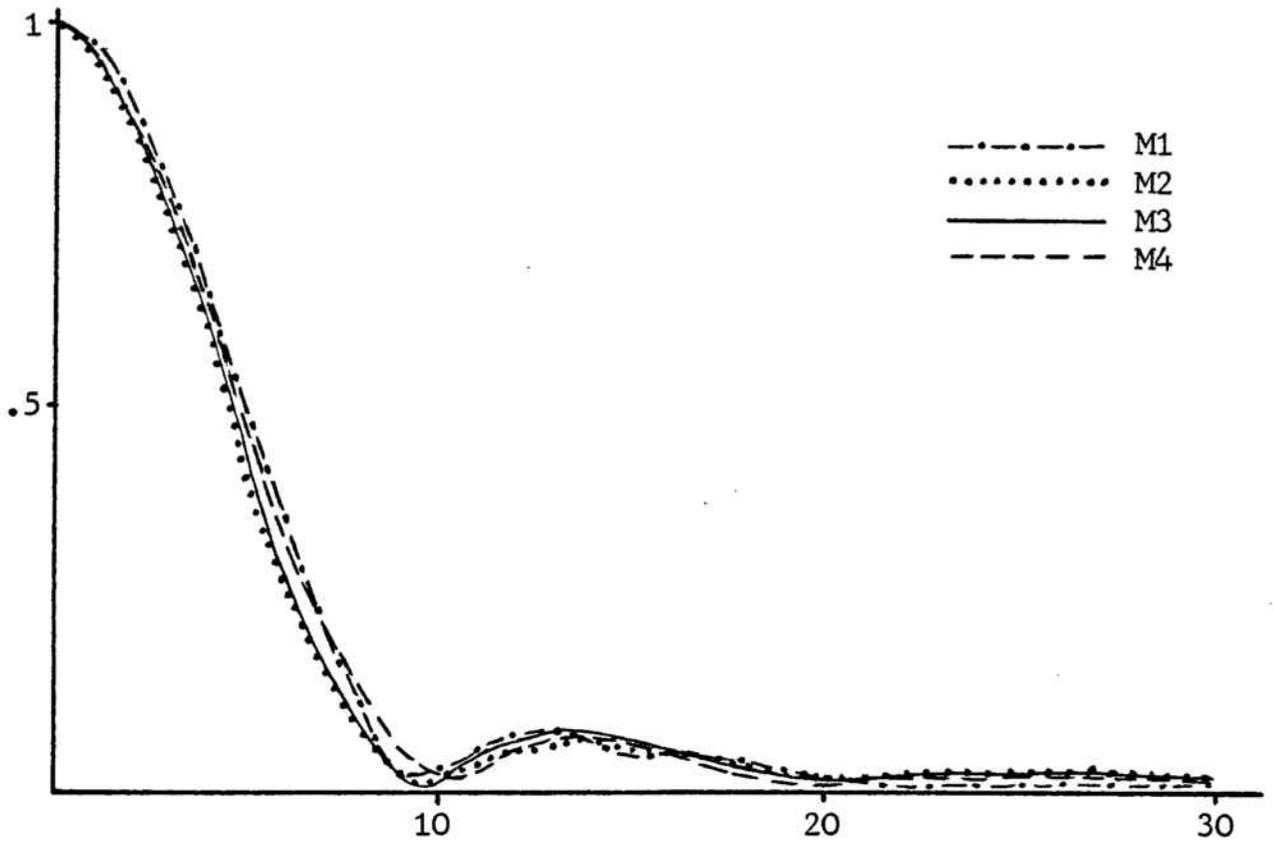


Fig. 25 .- Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Tangencial. Posición 25.

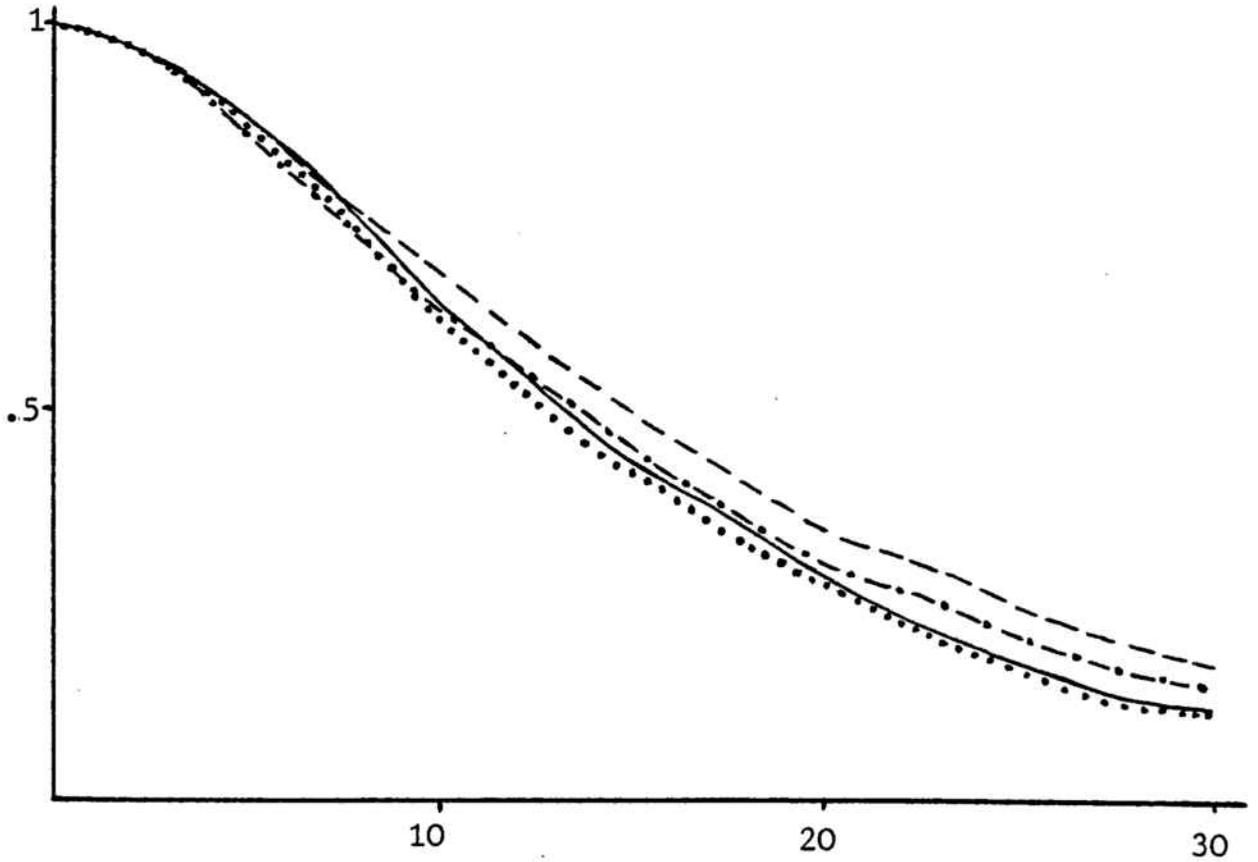


Fig. 26 .- Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Sagital. Posición 25.

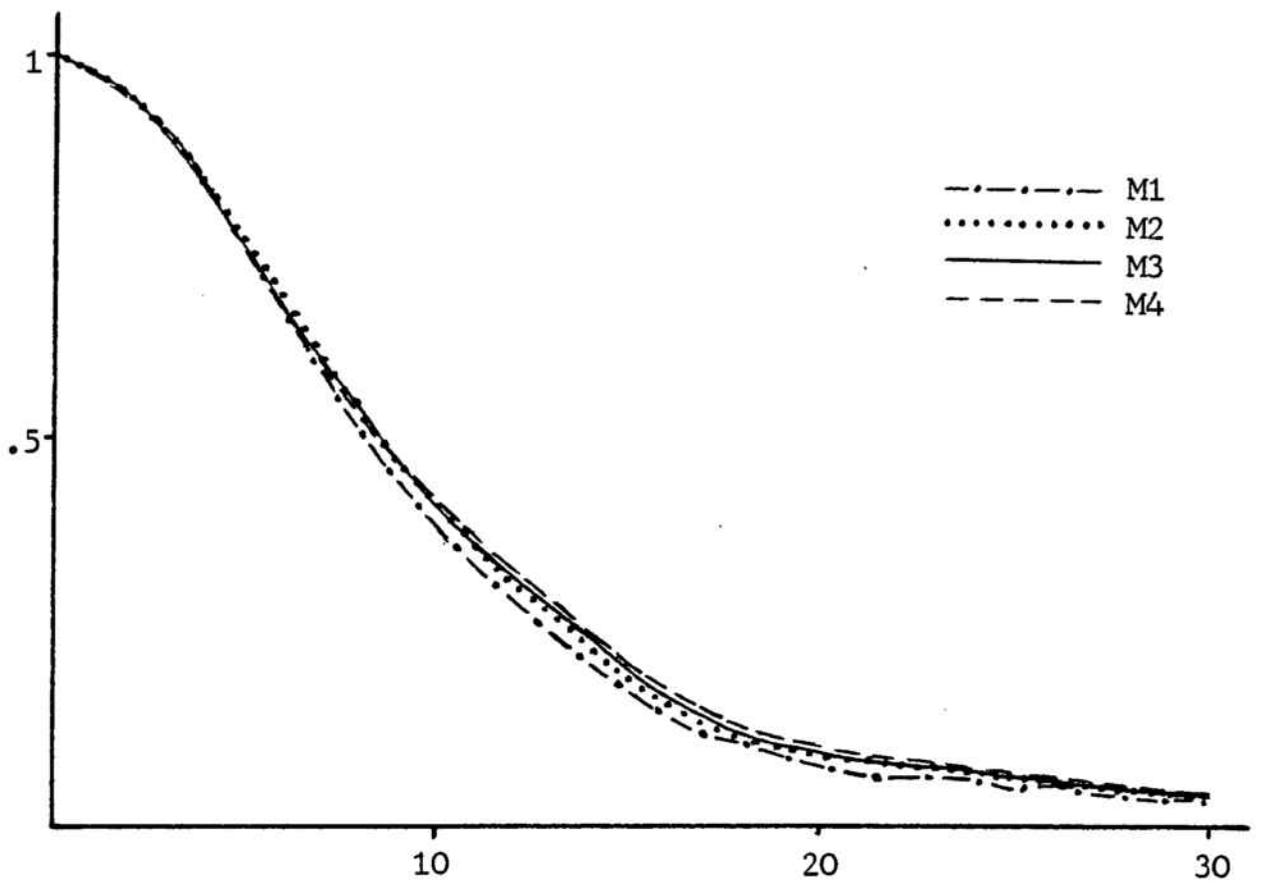


Fig.27 .- Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Tangencial. Posición 28.

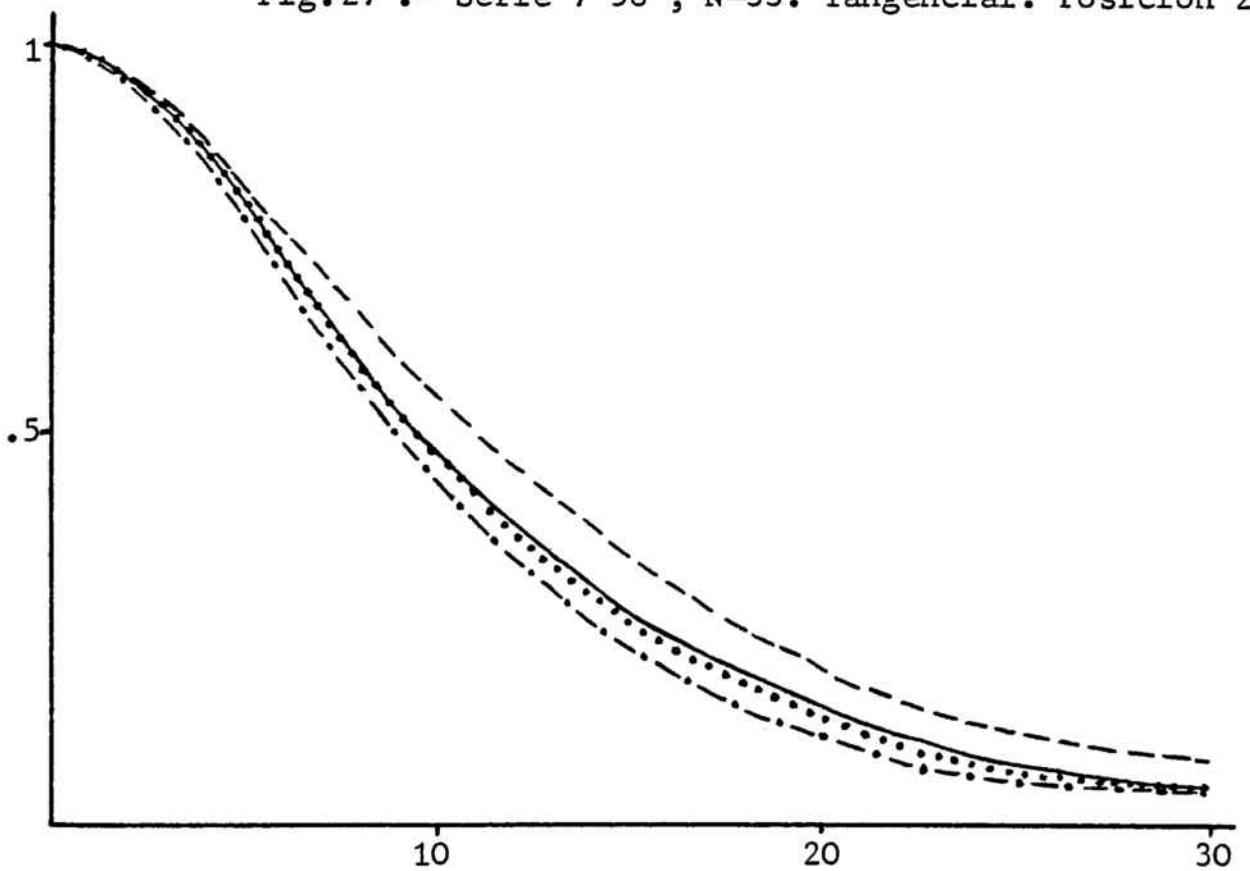


Fig.28 .- Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Sagital. Posición 28.

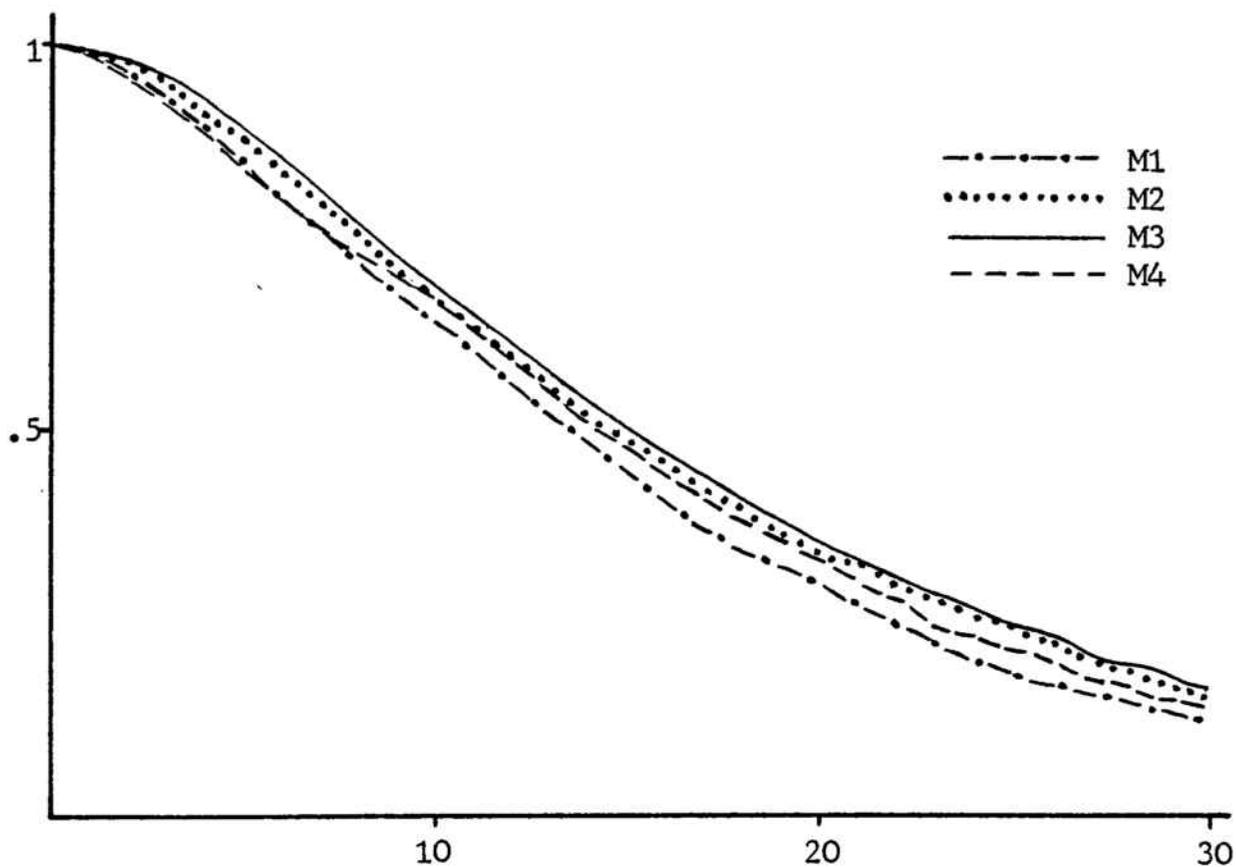


Fig. 29 .- Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Tangencial. Posición 31.

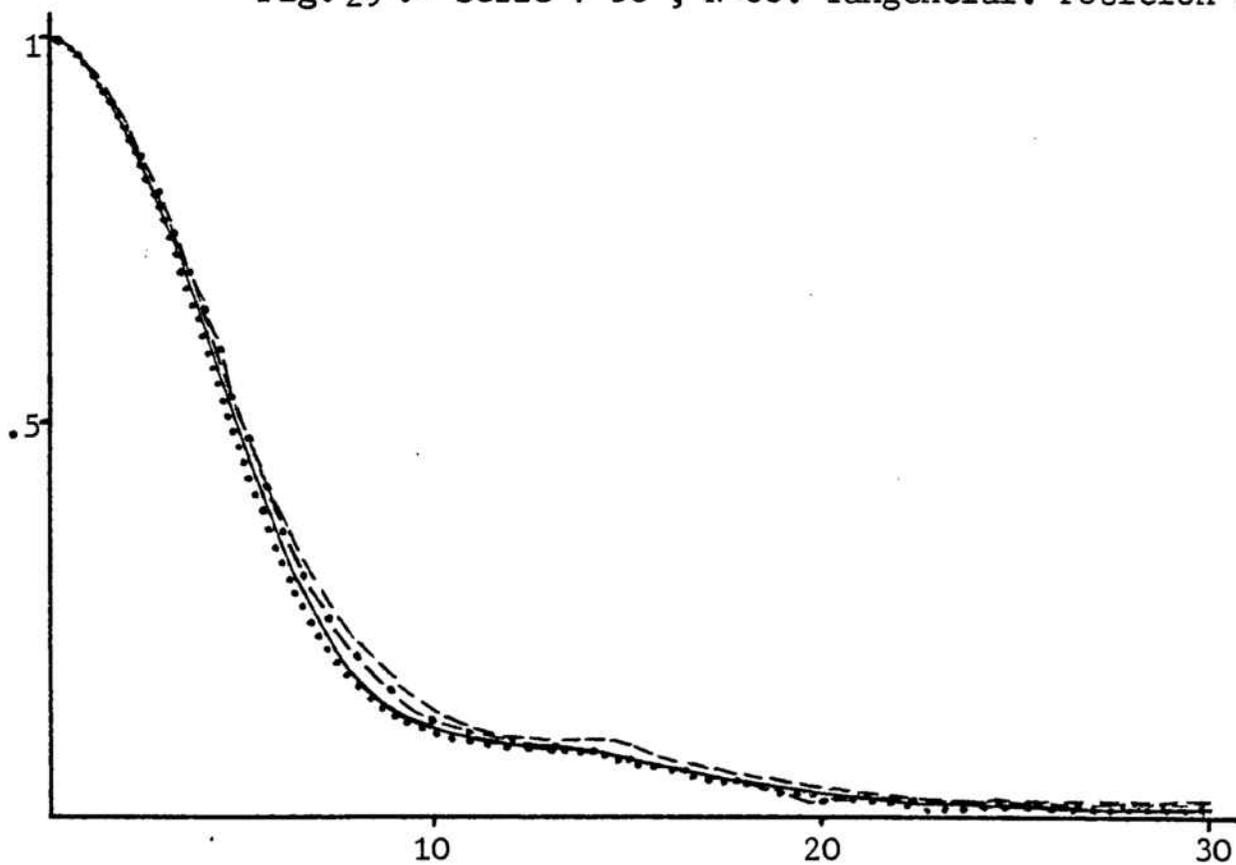


Fig. 30 .- Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Sagital. Posición 31.

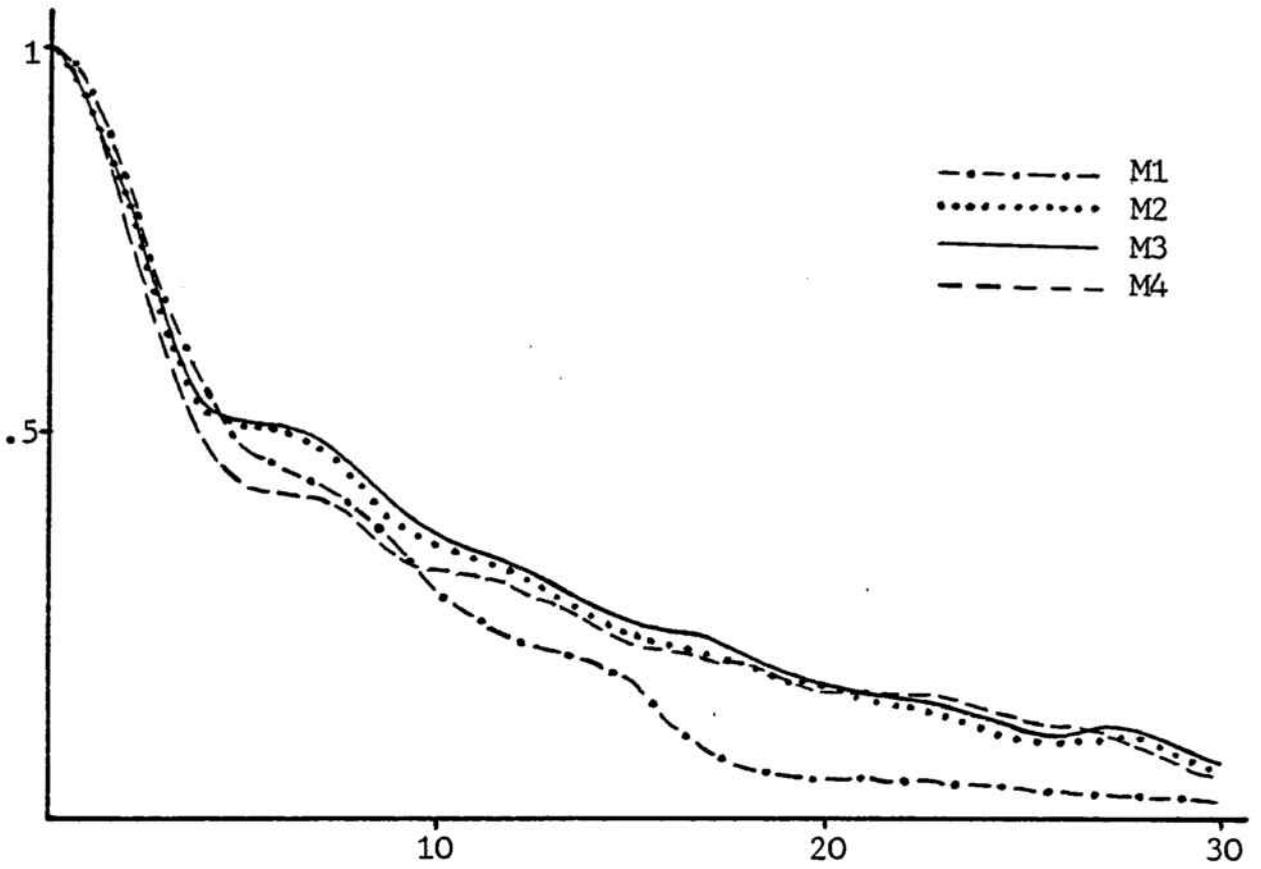


Fig. 31 .- Serie 7°58', N=5.4.Tangencial.Posición 33.5.

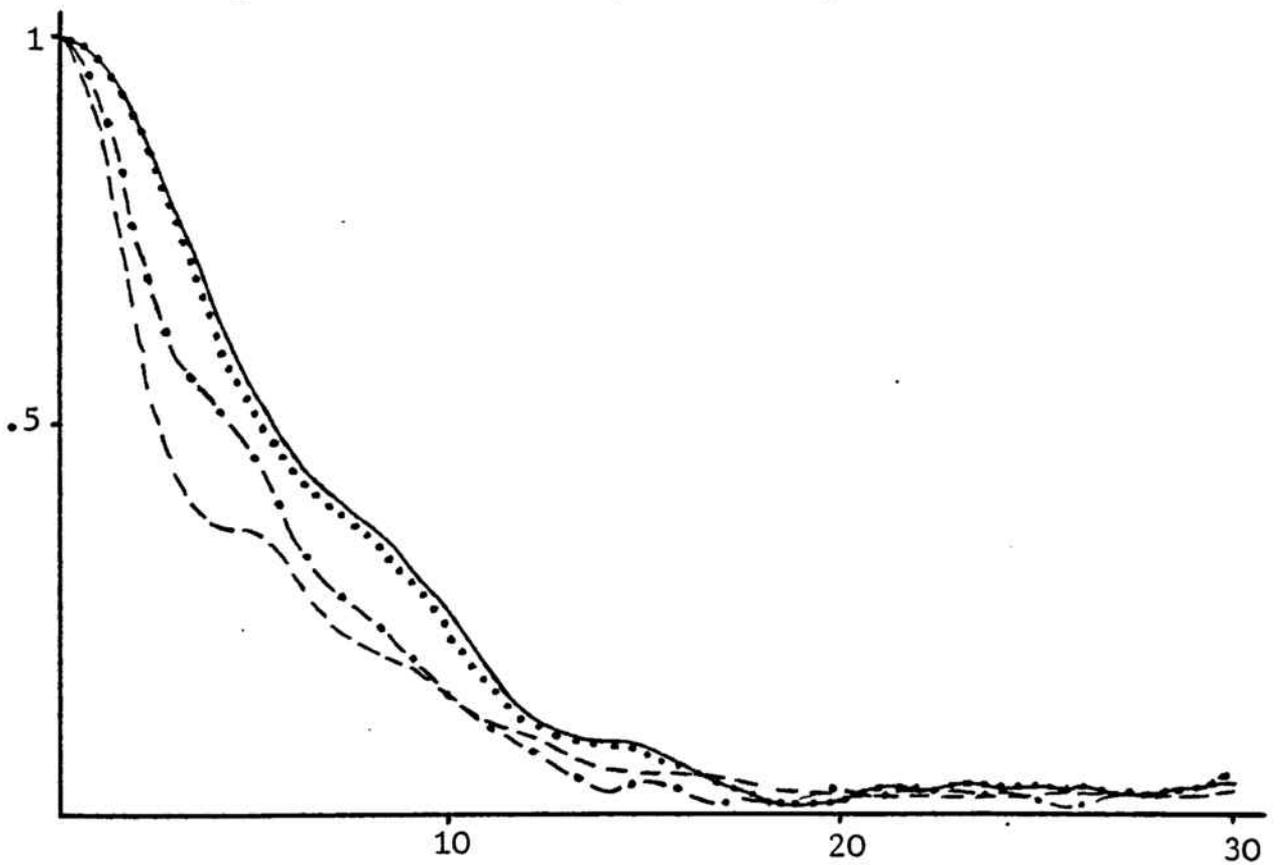


Fig. 32 .- Serie 7°58', N=5.4.Sagital. Posición 33.5.

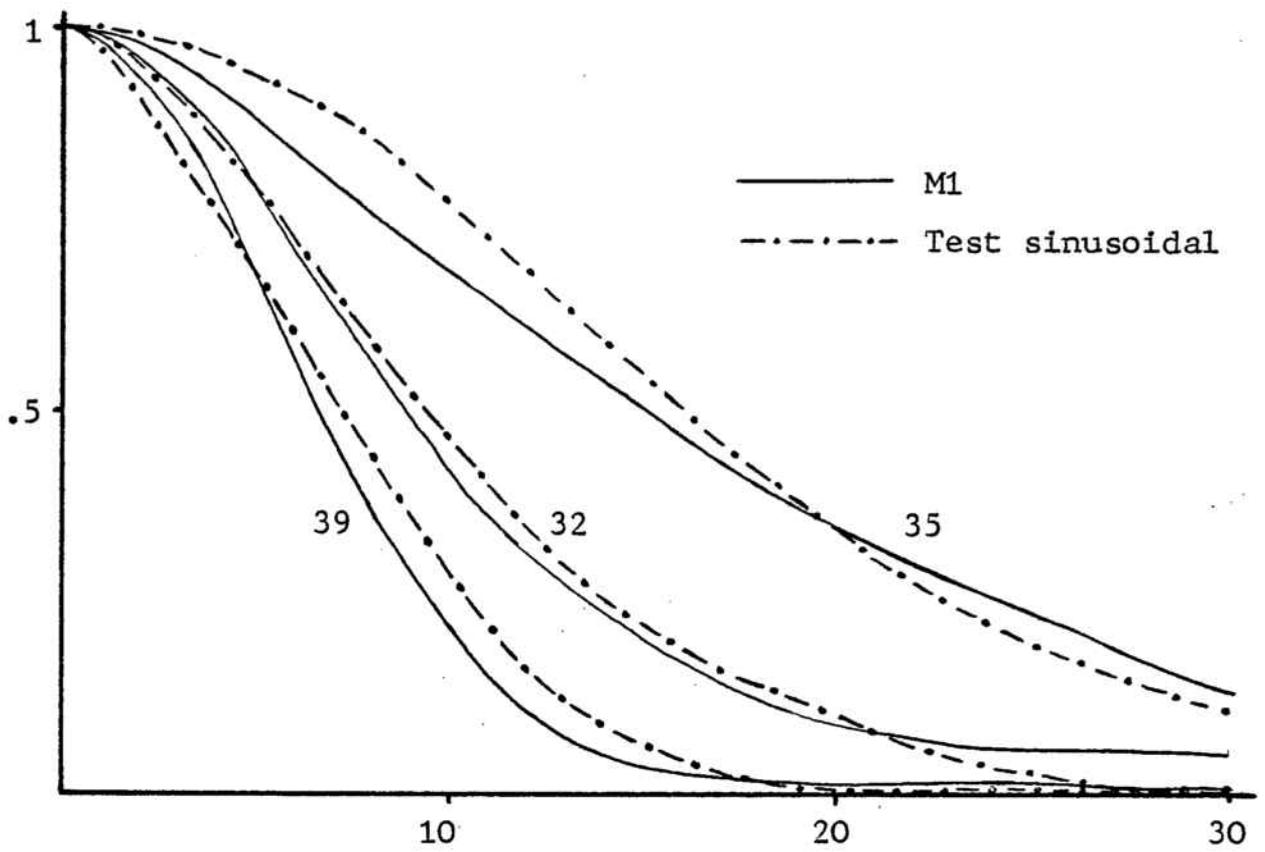


Fig.33.- MFTP. Serie en eje y N=33.

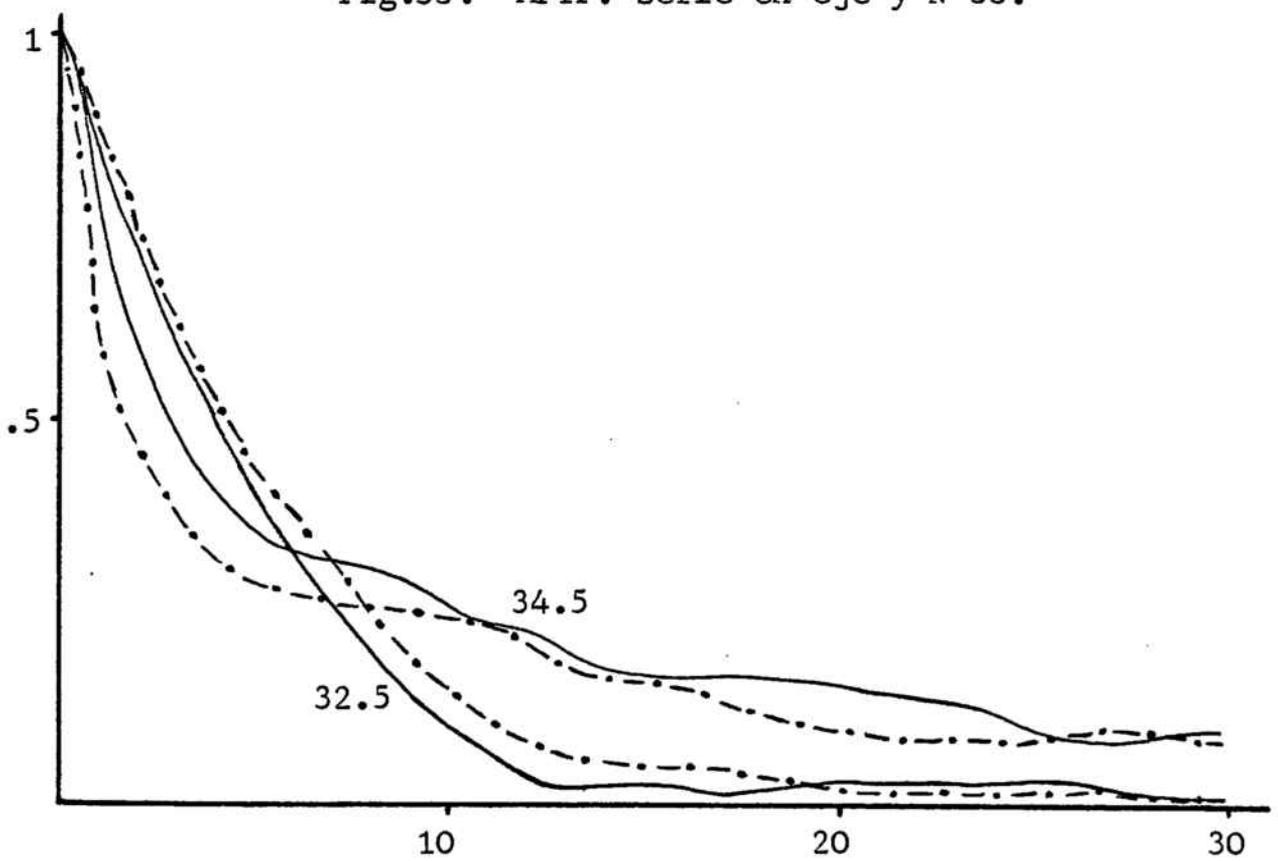


Fig.34.- MFTP. Serie en eje y N=5.4.

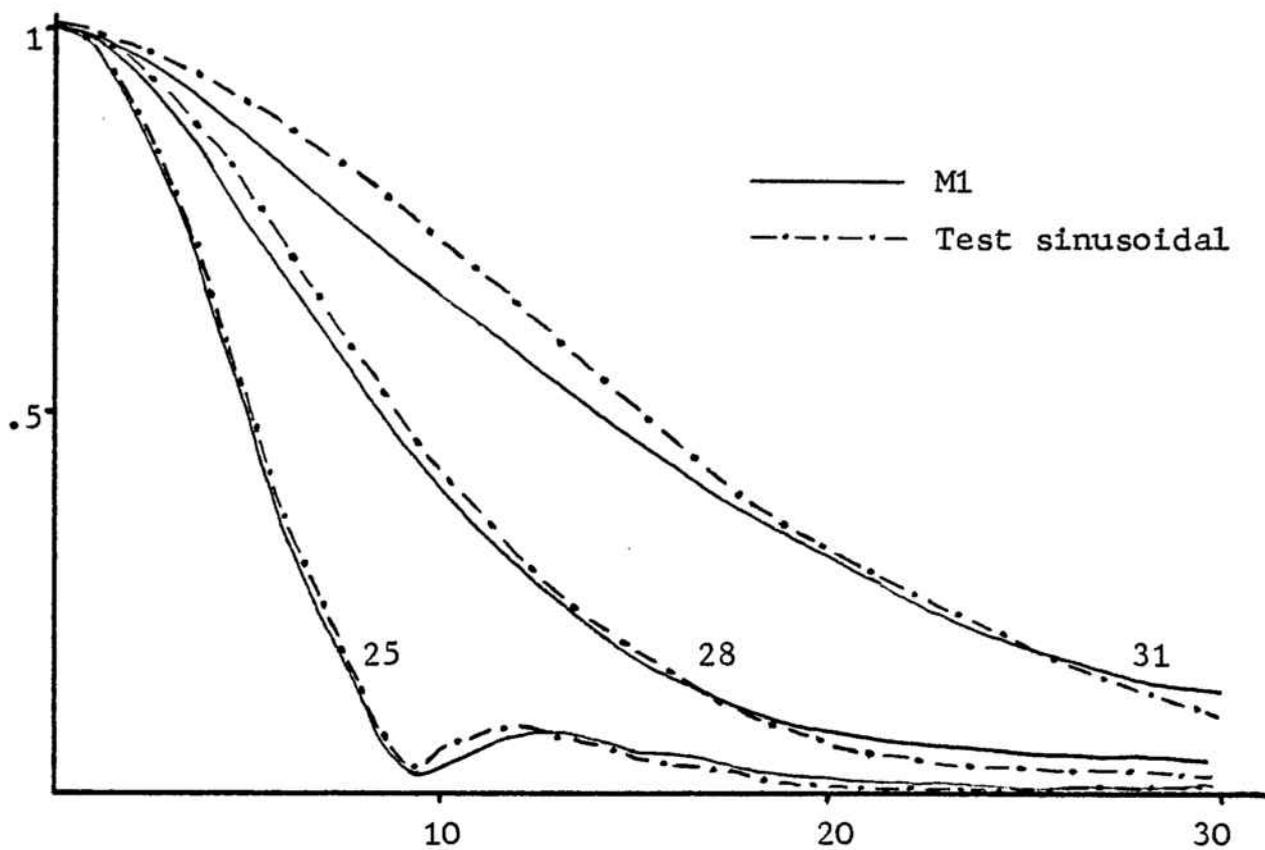


Fig.35.- MFTP. Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Tangencial.

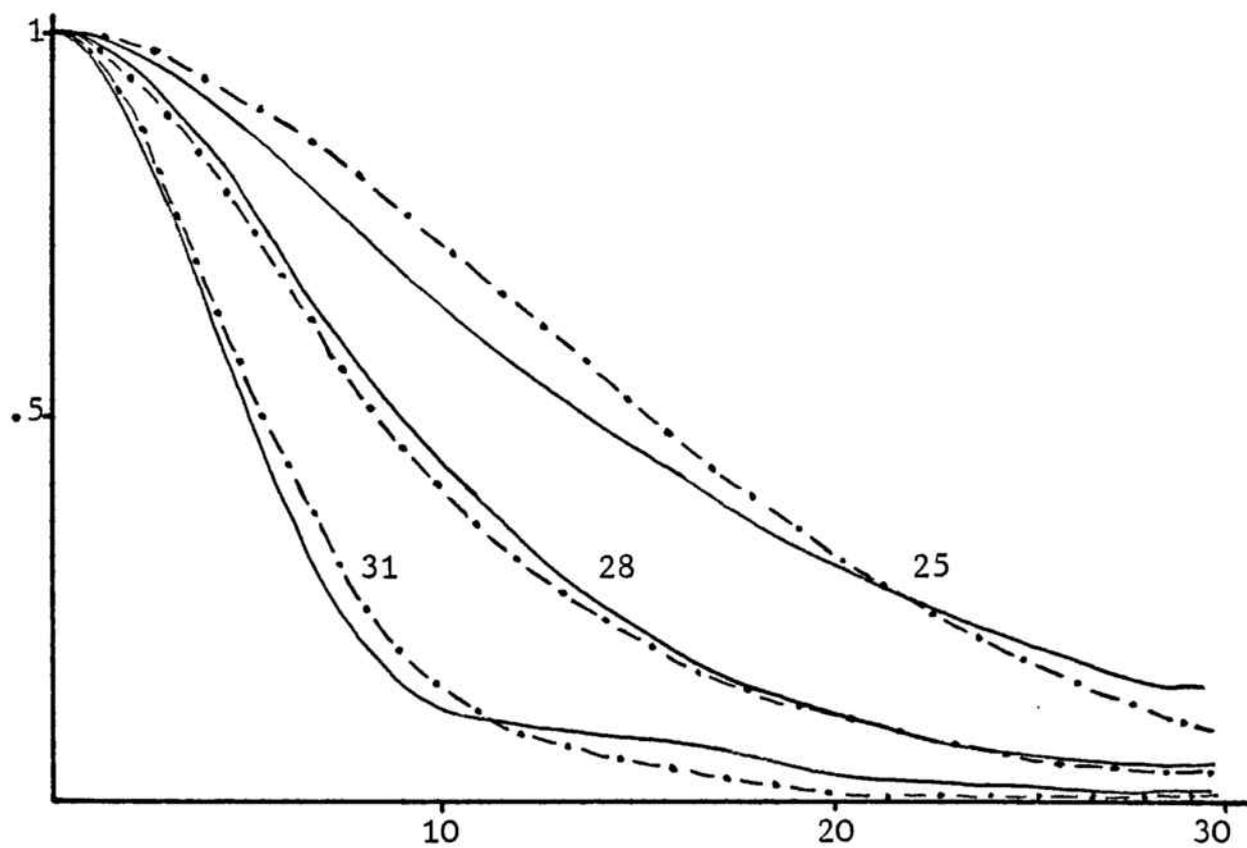


Fig.36.- MFTP. Serie $7^{\circ}58'$, N=33. Sagital.

Los resultados se dispersan un poco, sin rebasar a 0.15, excepto en la última en que el M4 desciende más rápidamente.

8.3 Criterio numérico de calidad A4.

En las figuras 37, 38, 39 y 40 se ilustran los resultados de aplicar en cada modo y a cada posición el criterio de calidad A4. Las posiciones ordenadas según los observadores están referidas a la serie principal (eje y $N=33$), donde coinciden con el orden por el área bajo las curvas, y están representadas en las demás series por medio de un segmento, según la imprecisión.

En las posiciones en campo se indican los valores del criterio tomando como MFTP el valor medio y el mínimo entre las curvas sagital y tangencial. Este criterio recomienda tomar como número de calidad el valor intermedio entre los dos valores.

En general se adaptan bien a la observación visual, sobreevaluando ligeramente las posiciones correspondientes a las imágenes de peor calidad.

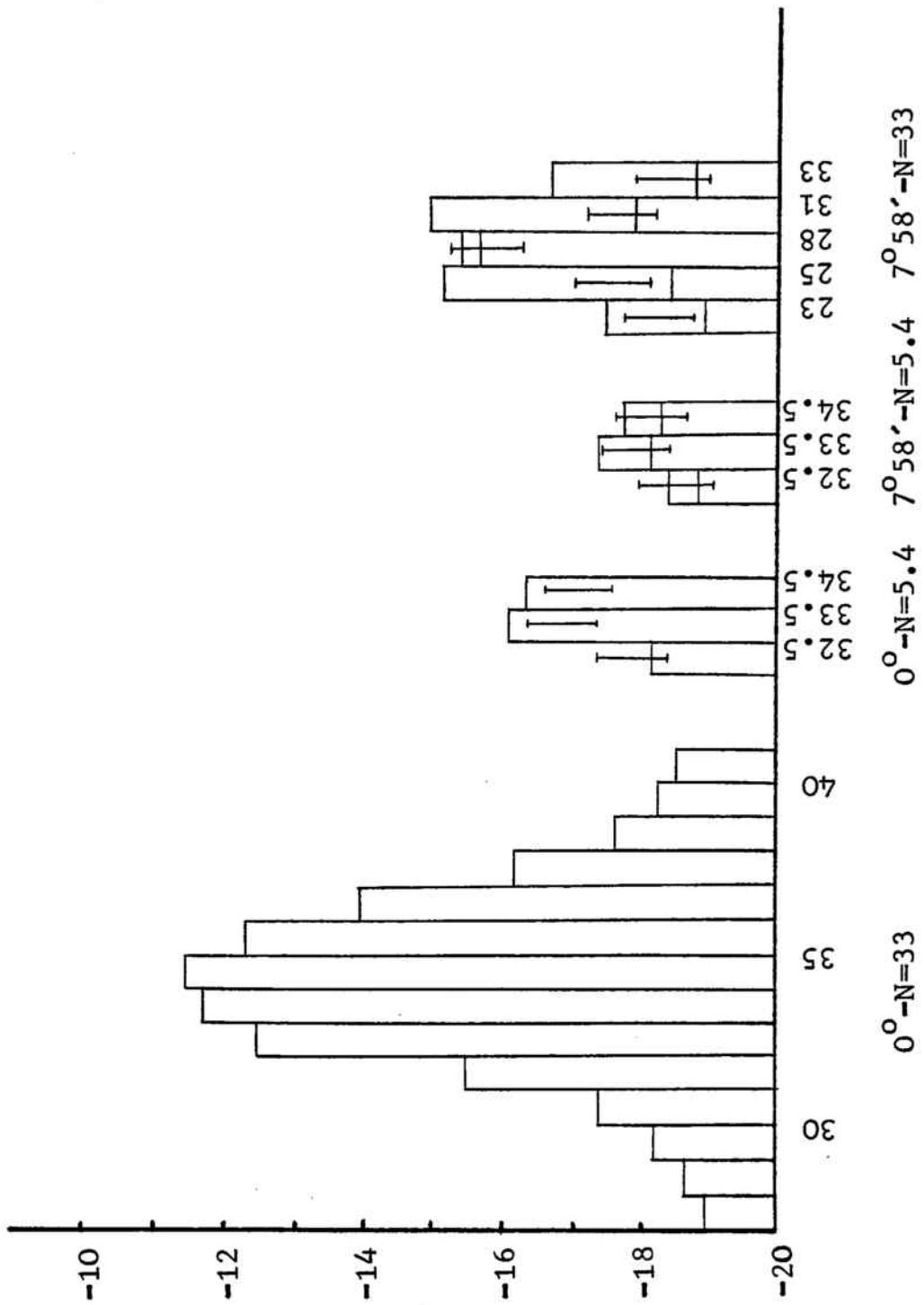


Fig.37 .- Posiciones ordenadas del modo M1 según el criterio de calidad A_4 .

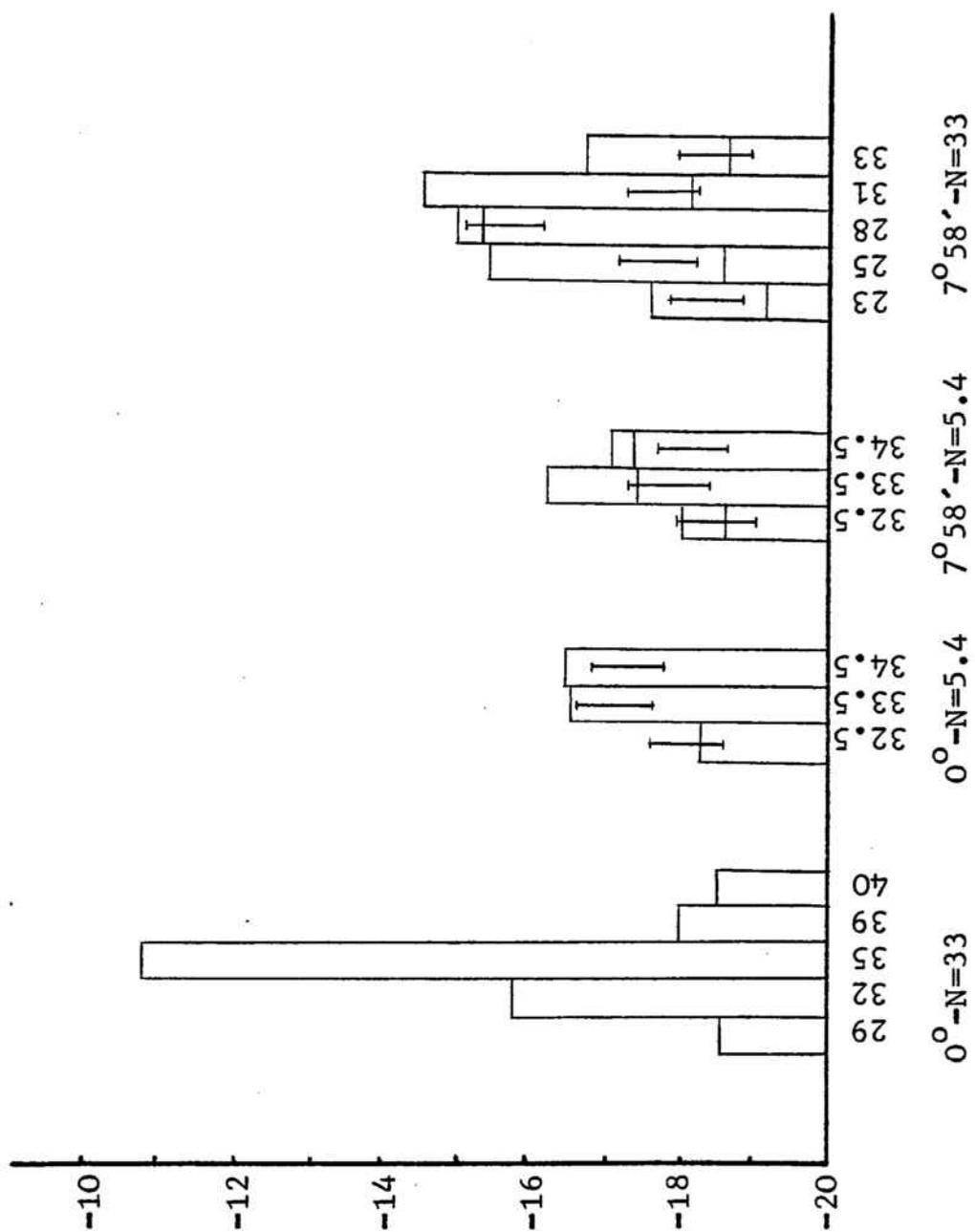


Fig. 38.- Posiciones ordenadas del modo M2 según el criterio de calidad A_4 .

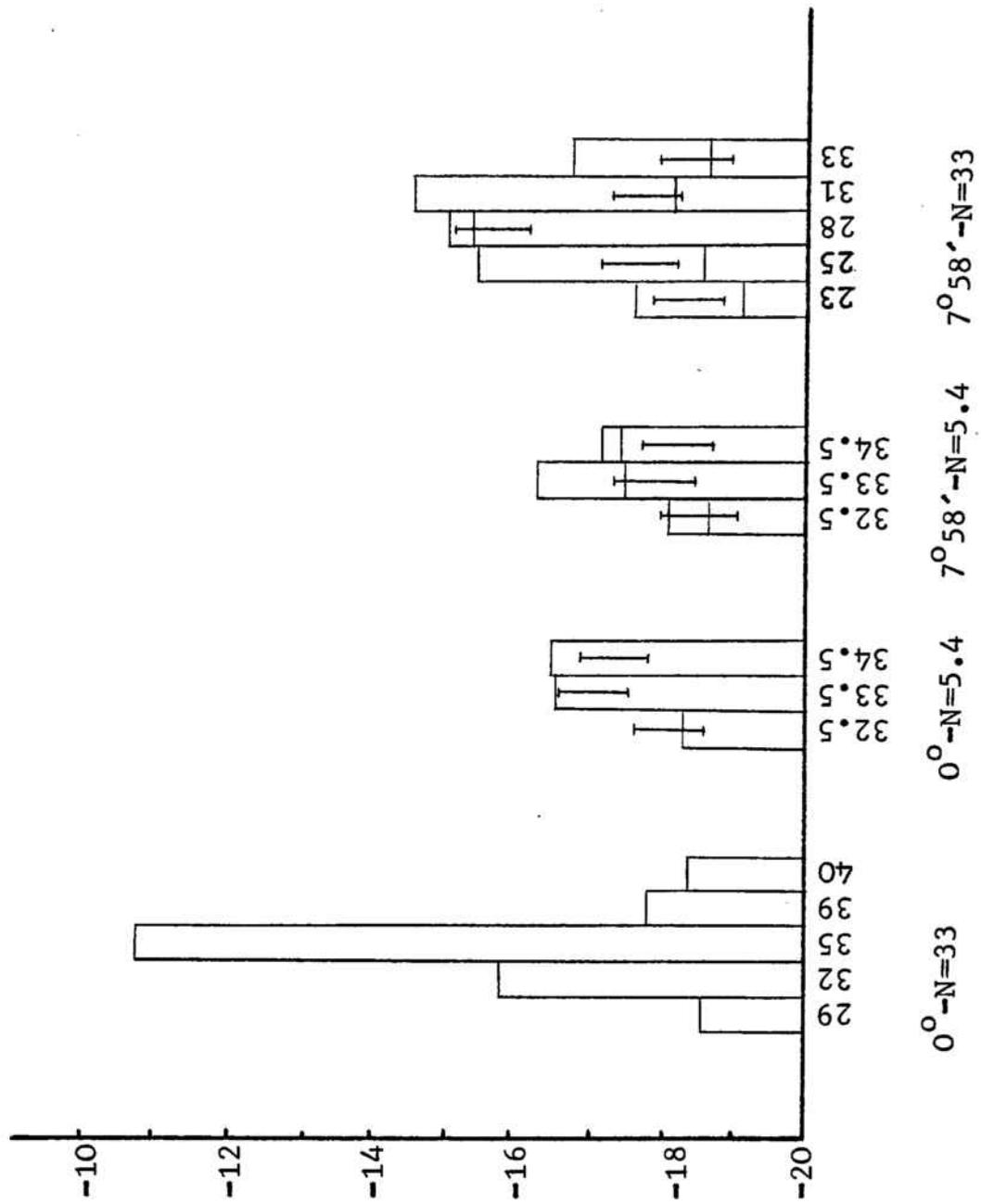


Fig 39.- Posiciones ordenadas del modo M3 según el criterio de calidad A_4 .

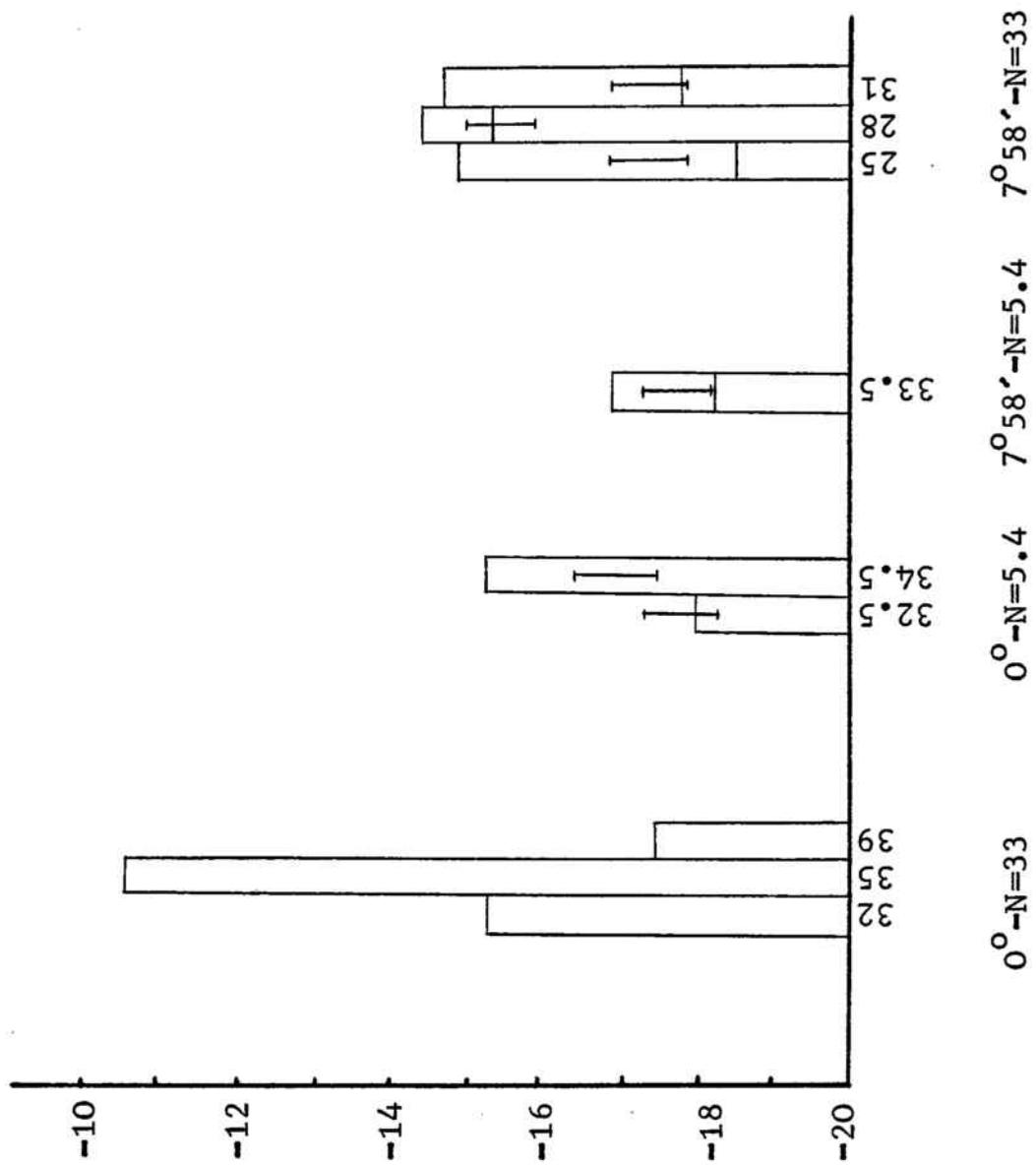


Fig.40 .- Posiciones ordenadas del modo M4 según el criterio de calidad A_4 .

9.- CONCLUSIONES

9.- CONCLUSIONES

1ª. Se ha puesto a punto un material fotográfico y una técnica de revelado de película inversible en color que garantiza un comportamiento lineal en una zona de densidad óptica comprendida entre 0.5 y 2.4 .

2ª. Se han desarrollado unos métodos de medida de la función de transmisión policromática de un conjunto opto-fotográfico, basados en el barrido y transformada de Fourier de la imagen fotográfica de una rendija como test objeto, a través del sistema.

3ª. La anchura de la rendija objeto debe ser tal que el primer mínimo de su transformada corresponda a una frecuencia superior a la de corte del sistema para evitar errores en las frecuencias próximas a la de dicho mínimo.

4ª. Ya que la imagen barrida debe ser digitalizada para calcular su transformada discreta de Fourier, esta digitalización debe cumplir un compromiso óptimo entre la precisión y el intervalo de digitalización en la transformada.

5ª. Teniendo en cuenta que la imagen de la rendija queda siempre algo ensanchada debido a las aberraciones, difracción y difusión en la fotografía, se ha comprobado que es suficiente utilizar para el barrido una rendija con anchura $1/4$ de la anchura de la imagen perfecta, efectuando las correspondientes correcciones. Esta anchura permite aprovechar suficientemente la intensidad luminosa.

6ª. Se ha realizado el cálculo directo de la integral que da la función de transmisión policromática aproximándola a una suma, utilizando 11 longitudes de onda distintas espaciadas regularmente en el espectro visible. La fuente empleada tenía una temperatura de color de 3200°K y el receptor seguía la curva de sensibilidad del ojo.

Este método (que designamos por modo M4) da unos resultados que no difieren de otros más sencillos en más de 0.15 .

7ª. Se ha definido la medida del MFTP en modo M1 para el conjunto opto-fotográfico como cociente entre la transformada de Fourier de la distribución de la intensidad de la imagen fotográfica de un test rendija medida a través de un micodensitómetro con la respuesta espectral adaptada a la del ojo humano en visión fotópica, y la transformada de Fourier del objeto.

8ª. Puesto que el material fotográfico en color es portador de la estructura de la imagen en tres capas, se ha definido la medida del MFTP del conjunto opto-fotográfico en modo M2, como los módulos de la función de transmisión medidos a través de tres filtros adecuados a las capas fotográficas, ponderados por la sensibilidad espectral del ojo humano correspondientes a las longitudes de onda dominantes de dichos filtros bajo el iluminante empleado.

9ª. Dada la gran eficiencia relativa del ojo frente a la zona central del espectro visible, se ha definido la medida del MFTP en modo M3 como cociente de la transformada de Fourier de la distribución de la intensidad de la imagen fotográfica de una rendija barrida a través de un filtro igual o similar al Kodak Wratten nº 93 y la transformada de Fourier de la rendija objeto.

10ª. Las medidas en los cuatro modos mencionados han presentado una elevada similitud.

11ª. Comparando los resultados de todos estos métodos con los obtenidos a partir de tests sinusoidales, las diferencias máximas nunca sobrepasan el valor de 0.15 .

12ª. La aplicación de un criterio numérico de calidad de imagen a las curvas medidas en los cuatro modos ha dado

una ordenación relativa notablemente parecida a la realizada visualmente por distintos observadores. Este resultado ha justificado el hecho de haber tenido presente los parámetros de la visión humana en los cálculos realizados.



10.- BIBLIOGRAFIA

10.- BIBLIOGRAFIA

- (1) Frison, E., Comm.nº 89 du Musée National des Sciences Exactes et Naturelles a Leyde, (1954)
- (2) Frieser, H., Z.Wiss Photogr., 37, 261, (1938)
- (3) Selwyn, E.W.H., Phot. J, 88 B, 46, (1948)
- (4) Duffieux, P.M., S.A. des Imprimeries Oberthur, Rennes, (1946)
- (5) Schade, O.H. R.C.A. Rev., 9, 245, (1948)
- (6) Hopkins, H.H., Optica Acta, 2, 23, (1955)
- (7) Rosenhauer, K. & Rosenbruch, K.J., Optica Acta, 4, 21, (1957)
- (8) Baker, L.R., Optica Acta, 18, 81, (1971)
- (9) International Society for Photogrammetry, National Research Council of Canada, Ottawa, (1964)
- (10) International Society for Photogrammetry, XI th Congress, Comision 1, Appendix 4, (1968)
- (11) Williams, T.L. & Ashton, A., App. Opt., 8, 2007, (1969)
- (12) Marchant, A.C., Optica Acta, 18, 133, (1971)

- (13) Matsui, Y. & Murata, K., *Optica Acta*, 18, 149, (1971)
- (14) Hopkins, R.E. & Dutton, D., *Optica Acta*, 18, 105, (1971)
- (15) Marchant, A.C. et al., *Optica Acta*, 22, 249, (1975)
- (16) Kuttner, P., *Optica Acta*, 22, 265, (1975)
- (17) Brock, G.C. et al., *Optica Acta*, 19, 953, (1972)
- (18) Consitt, F.J.P. & Mandler, W., *Optica Acta*, 18, 123, (1971)
- (19) Rosenbruch, K.J., *Optica Acta*, 22, 291, (1975)
- (20) Hopkins, H.H., *Optica Acta*, 13, 343, (1966)
- (21) King, W.B., *J.Opt.Soc.Am.*, 59, 1155, (1969)
- (22) Vogl, T.P. & Lavi, A., *J.Opt.Soc.Am.*, 60, 813, (1970)
- (23) Rosenbruch, K.J., *Optica Acta*, 18, 93, (1971)
- (24) Brixner, B., *Appl.Opt.*, 17, 715, (1978)
- (25) Luizov, A.V. & Fedorova, N.S., *Sov.J.Opt.Technol.*, 38, 331, (1971)
- (26) Dutton, D., *Appl.Opt.*, 11, 1091, (1972)
- (27) Leach, B.A., *Optica Acta*, 22, 375, (1975)

- (28) Evteeva, N.P. et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 43, 254, (1976)
- (29) Ivanovskii, I.B. et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 44, 220, (1977)
- (30) Davydkin, I.M. & Lesina, T.M., *Sov. J. Opt. Technol.*, 39, 329, (1972)
- (31) Artishevskii, V.I. & Chalova, V.A., *Sov. J. Opt. Technol.*, 42, 299, (1975)
- (32) Slater, P.N., *Optica Acta*, 22, 277, (1975)
- (33) Kondo, H. et al., *Optica Acta*, 22, 353, (1975)
- (34) Moneo, J.R. de F., Yzuel, M.J. & Quintanilla, M., *Rev. Acad. Ciencias Zaragoza*, 22, 3, (1967)
- (35) Marchant, A.C., *Optica Acta*, 22, 347, (1975)
- (36) Heidinger, D. et al., *Optica Acta*, 24, 617, (1977)
- (37) Nill, N.B., *Appl. Opt.*, 15, 2846, (1976)
- (38) Meeteren, A. van, *Optica Acta*, 21, 395, (1974)
- (39) Kelly, D.H., *Optica Acta*, 24, 107, (1977)
- (40) Fry, G.A., *Progress in Optics* 8, 51, (1970)
- (41) Ostrovskaya, M.A., *Sov. J. Opt. Technol.*, 36, 132, (1969)

- (42) Levi, L., *Progress in Optics*, 8, 343, (1970)
- (43) Simon, J., F. & Denieul, P. M., *J. Opt. Soc. Am.*, 63, 894, (1972)
- (44) Overington, I., *Optica Acta*, 22, 365, (1975)
- (45) Overington, I. & Gullick, S. A., *Optica Acta*, 20, 49, (1973)
- (46) BenYosef, N. & Rose, A., *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 935, (1978)
- (47) Van der Wildt, G. J., *Optica Acta*, 21, 843, (1974)
- (48) Gal'pern, D. Y., *Opt. Mekh. Prom.*, 9, 18, (1964)
- (49) Rosenhauer, K. & Rosenbruch, K. J., *Japan J. Appl. Phys.* 4, 238, (1965)
- (50) Blumova, V., *Optik*, 24, 237, (1969)
- (51) Levi, L., *Appl. Opt.*, 8, 607, (1969)
- (52) Slyusarev, G. C., *Sov. J. Opt. Technol.*, 37, 299, (1970)
- (53) Shmyga, V. V., *Sov. J. Opt. Technol.*, 41, 81, (1974)
- (54) Kraskovskiy, R. A., *Sov. J. Opt. Technol.*, 37, 69, (1970)
- (55) Hopkins, H. H. & Yzuel, M. J., *Optica Acta*, 17, 157, (1970)
- (56) Yzuel, M. J. & Bescós, J., *Optica Acta*, 22, 913, (1975)

- (57) Yzuel, M.J. & Santamaría, J., *Optica Acta*, 22, 673, (1975)
- (58) Yzuel, M.J. & Bescós, J., *Optica Acta*, 23, 529, (1975)
- (59) Barnden, R., *Optica Acta*, 21, 981, (1974)
- (60) Barnden, R., *Optica Acta*, 23, 1, (1976)
- (61) Moneo, J.R. de F. & Barandalla, J.J., *Rev. Acad. Ciencias de Zaragoza*, 29, 299, (1974)
- (62) Moneo, J.R. de F. & Juvells, I., *Optica Pura y Aplicada* 12, 91, (1979)
- (63) Navajas, D., *Tesis Doctoral, Fac. Física, Univ. Barna.* (1980)
- (64) Sokolova, N.N. & Serafetdinova, O.V., *Sov. J. Opt. Technol.* 42, 442, (1975)
- (65) Bigelmaier, A., Schaefer, K.D. & Wasmund, H., *Appl. Opt.*, 7, 277, (1968)
- (66) Ichioka, Y. & Suzuki, T., *Appl. Opt.*, 7, 927, (1968)
- (67) Artishevskiy, V.I. , Lishnevskaya & Ye, B., *Sov. J. Opt. Technol.*, 38, 567, (1971)
- (68) Jaiswal, A.K., *Appl. Opt.*, 12, 2248, (1973)
- (69) Tatian, B., *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1214, (1971)

- (70) Tescher, A.G. & Andrews, H.C., *Appl. Opt.*, 11, 919, (1972)
- (71) Basuray, A., Sarkar, S.K. & De, M., *Optica Acta*, 26, 349, (1979)
- (72) Kuttner, P., *Appl. Opt.*, 7, 1029, (1968)
- (73) Felstead, E.B., *Optica Acta*, 21, 85, (1974)
- (74) Bepal'chik, A.I. et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 42, 18, (1975)
- (75) Johansson, S. & Predko, K., *Optica Acta*, 23, 549, (1976)
- (76) Matskovskaya, Y.Z., et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 39, 589, (1972)
- (77) Chopra, K.N. & Singh, K., *Optica Pura y Aplicada*, 4, 19, (1971)
- (78) Maggo, J.N., Chopra, K.N. & Bhatnagar, G.S., *Optica Acta*, 20, 995, (1973)
- (79) Nijhawan, O.P., Datta, P.K. & Bhushan, J., *Nouv. Rev. Optique*, 6, 33, (1975)
- (80) Artishewskiy, V.I. & Gradoboev, V.M., *Sov. J. Opt. Technol.*, 42, 672, (1975)
- (81) Rabedeau, M.E., *J. Opt. Soc. Am.*, 59, 1309, (1969)
- (82) Willem, A.A., *Optica Acta*, 18, 205, (1971)

- (83) Lagasse, P.E. & Willem, A.A., *Optica Acta*, 18, 205, (1971)
- (84) Savoy, R.L. & McCann, J., *J. Opt. Soc. Am.*, 65, 343, (1975)
- (85) Takeda, M & Ose, T., *Optica Acta*, 21, 477, (1974)
- (86) Slaymaker, F.H., *Appl. Opt.*, 12, 2709, (1973)
- (87) Macdonald, J., *Optica Acta*, 18, 269, (1971)
- (88) Brich, K.G., *Optica Acta*, 18, 139, (1971)
- (89) Grimes, D.N., *Appl. Opt.*, 11, 914, (1972)
- (90) Grumet, A., *Appl. Opt.*, 16, 154, (1977)
- (91) Matsui, Y. et al., *Optica Acta*, 23, 389, (1976)
- (92) Wyant, J.C., *Appl. Opt.*, 14, 1613, (1975)
- (93) Kintner, E.C. & Sillitto, R.M., *Optica Acta*, 23, 607, (1976)
- (94) Murata, K., *Progress in Optics*, 5, (1966)
- (95) Kubota, H. & Ohzu, H., *J. Opt. Soc. Am.*, 47, 666, (1957)
- (96) Jones, G.E., *Optica Acta*, 22, 379, (1975)
- (97) Barton, N.P., *Optica Acta*, 19, 473, (1972)

- (98) Pouleau, J., *Optica Acta*, 22, 339, (1975)
- (99) Khlebnikov, F.P., *Sov. J. Opt. Technol.*, 42, 749, (1975)
- (100) Shul'man, M.Y. et al., *Sov. J. Opt. Technol.*, 40, 431, (1973)
- (101) Zanegin, N.A. & Zemlyakov, V.D., *Sov. J. Opt. Technol.*, 43, 149, (1976)
- (102) Kowaliski, P., *Théorie photographique appliquée*, Masson et Cie. Editeurs, Paris, (1972)
- (103) Shaw, R., *Optica Acta*, 20, 749, (1973)
- (104) Barteneva, O.A., *Sov. J. Opt. Technol.*, 44, 197, (1977)
- (105) Hamilton, J.F., *Appl. Opt.*, 11, 13, (1972)
- (106) Kodak, *Publicación F-20*
- (107) Aznarez, J. et al., *Optica Acta*, 21, 809, (1974)
- (108) Biedermann, K. & Johansson, S., *J. Opt. Soc. Am.*, 64, 862, (1974)
- (109) Ehn, D.C. & Silevitch, M.B., *J. Opt. Soc. Am.*, 64, 667, (1974)
- (110) Aver'yanova, M.A. & Pruss, P.K., *Sov. J. Opt. Technol.*, 44, 268, (1977)

- (111) Thomas, C.E., *Appl. Opt.*, 11, 1756, (1972)
- (112) Green, A.E.S. & McPeters, R.D., *Appl. Opt.*, 14, 271, (1975)
- (113) Vinogradov, K.M., Ivanov, A.M. & Sokolova, M.N., *Sov. J. Opt. Technol.*, 42, 173, (1975)
- (114) Tai, A. & Yu, F.T.S., *Appl. Opt.*, 17, 2450, (1978)
- (115) Anderson, W.J., *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 972, (1978)
- (116) Vernier, P.J., *J. Opt. Soc. Am.*, 59, 444, (1969)
- (117) Baker, A. & Korff, D., *Appl. Opt.*, 8, 563, (1969)
- (118) Bonnet, G., *Journal of Optics*, 8, 243, (1977)
- (119) Laing, R.A. & Oak, S.M., *Appl. Opt.*, 15, 1276, (1976)
- (120) Everett, R.L., *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 1113, (1978)
- (121) Ooue, S., *Progress in Optics*, 7, 301, (1969)
- (122) Lamberts, R.L., *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 1389, (1970)
- (123) Pruss, P.K. & Studenova, T.B., *Sov. J. Opt. Technol.*, 42, 576, (1975)
- (124) Smith, P.L., *Appl. Opt.*, 11, 1424, (1972)

- (125) Carroll, J.P. & Cupery, K.N., *Appl. Opt.*, 10, 2279, (1971)
- (126) Dainty, J.C., *Optica Acta*, 18, 795, (1971)
- (127) Barteneva, O.A., *Sov. J. Opt. Technol.*, 43, 217, (1976)
- (128) Petukhov, B.V., *Sov. J. Opt. Technol.*, 41, 140, (1974)
- (129) Lamare, M., *Nouv. Rev. d'Optique appliquée*, 1, 405, (1970)
- (130) Mayevskiy, G.V., *Sov. J. Opt. Technol.*, 38, 593, (1971)
- (131) Muratov, V.R. & Struzer, R.L., *Sov. J. Opt. Technol.*, 39, 519, (1972)
- (132) Vega, M.A. & Sauras, E., *Optica Pura y Aplicada*, 9, 185, (1976)
- (133) Cooley, J.W. & Tukey, J.W., *Math. Comp.*, 19, 291, (1965)
- (134) Papoulis, A., *Systems and transforms*, McGraw-Hill, (1968)
- (135) Cooley, J.W., Lewis, P.A.W. & Welch, P.D., *I.E.E.E., Trans. Audio Electro Acoust.*, AJ15, 79, (1967)
- (136) Markel, J., *I.E.E.E., Trans. Audio Electro Acoust.*, AJ19, 305, (1971)
- (137) Kodak, Publicación B-3

- (138) Wyszeccki,G. & Stiles,W.S.,Color Science,John Wiley & Sons Inc.,(1967)
- (139) Kodak, Publicación E-39
- (140) Casas,J.,Moneo,J.R.de F. & Yzuel,M.J.,Rev.Acad. Ciencias de Zaragoza,21,15,(1966)
- (141) Moneo,J.R.de F.,Barandalla,JJ.& Abbad,F.,Optica Pura y Aplicada,9,113,(1976)
- (142) Moneo,J.R. & Barandalla,J.J.,Atti della Fondazione Giorgio Ronchi,32,800,(1977)
- (143) Pospisil,J. & Bumba,V.,Optica Acta,19,593,(1972)
- (144) Som,S.C.,J.Opt.Soc.Am.,61,859,(1971)
- (145) Yasuda,Y.,Bulletin of the Tech.Assoc.of Graphic Arts of Japan,Overseas,4,13,(1974)
- (146) Kodak, Publicación E-37
- (147) Kodak, Publicación F-5