

FILTRAJE ESPACIAL OPTICO Y DIGITAL DE UNA SUPERFICIE MARINA SIMULADA

OPTICAL AND DIGITAL SPATIAL FILTERING OF A SIMULATED SEA SURFACE

Pedro Negrete Regagnon
Josué Alvarez Borrego

Departamento de Optica
Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada
Espinoza 843
Ensenada, Baja California, México
P.O. Box 4944, San Ysidro, Ca. 92073, U.S.A.

Negrete Regagnon, P. y Alvarez Borrego, J. Filtraje espacial óptico y digital de una superficie marina simulada. *Optical and digital spatial filtering of a simulated sea surface. Ciencias Marinas, 15(4):51-83, 1989.*

RESUMEN

Una superficie marina al azar fue generada con un modelo numérico. La imagen fue grabada en película fotográfica usando un microdensitómetro en su modo de escritura. Se diseñaron filtros espaciales para usarse en un sistema óptico coherente de transformada doble de Fourier para estudiar el comportamiento espacial de ciertas longitudes de onda. Similares resultados se obtuvieron en la computadora usando filtros digitales bidimensionales. Ambos métodos pueden tener aplicación para estudiar la distribución espacial de olas en una superficie marina real.

ABSTRACT

A random simulated sea surface was generated with a numerical model. The image was recorded on photographic film by means of a microdensitometer with a writing mode. Spatial filters were designed and used in a double Fourier transform coherent optical system to study the spatial behaviour of certain wavelengths. Similar results were obtained on the computer using two-dimensional digital filters. Both methods can have an application to study spatial distribution of waves in a real sea surface.

INTRODUCCION

La superficie marina afectada por el viento puede ser considerada como una superficie rugosa aleatoria. En las últimas dos décadas, los esfuerzos por conocer el comportamiento de las ondulaciones superficiales del mar se han concentrado en el uso de los sensores remotos. Estos pueden ser los al-

INTRODUCTION

The sea surface affected by wind can be considered a random rough surface. During the past two decades, efforts to study the behaviour of sea surface waves have been centred on the use of remote sensors. These can be instruments placed on satellites or airplanes (radars, microwave and infrared

tímetros colocados en satélites o aviones (radares, microondas, detectores de infrarrojo, etc.) y la fotografía aérea. De esta manera las técnicas desarrolladas a través de los años en otras áreas han sido eventualmente aplicadas a la oceanografía.

La información contenida en una fotografía de una superficie rugosa puede ser procesada por dos métodos. La imagen puede ser digitalizada por un microdensitómetro y el arreglo numérico resultante se procesa con los algoritmos de computación conocidos (Procesado Digital de Imágenes). Por otro lado, la imagen fotográfica (negativo) puede ser procesada directamente en un sistema óptico coherente (Alvarez-Borrego y Machado, 1985). Esto es conocido como el Procesado Óptico de Información.

Las técnicas matemáticas usadas en el procesado óptico de información son muy semejantes a las usadas en el procesamiento electrónico de datos. El procesado óptico permite, con una simple configuración de láser, lentes y filtros, la implementación de funciones matemáticas tales como multiplicación, transformada de Fourier, correlación y convolución (Shulman, 1970). Las señales de entrada pueden ser variaciones de transmisión óptica en un plano (un negativo fotográfico) y a través de la operación de transformada de Fourier, la distribución de frecuencias de una señal puede ser representada por una distribución de la amplitud de luz en otro plano. El filtrado óptico de una señal es una operación sencilla que requiere sólo bloquear los puntos de luz que corresponden a las frecuencias no deseadas.

Desde hace algún tiempo, varios investigadores han tratado de aprovechar las cualidades de los sistemas ópticos para obtener información de fotografías aéreas de la superficie marina. Barber (1954) utilizó un método óptico para encontrar la dirección del oleaje en una superficie del mar. Otras investigaciones han sido realizadas por Stilwell (1969, 1974) y Sugimori (1975). Ellos utilizaron un método que consiste en tomar fotografías de la superficie del mar y obtener su espectro óptico bidimensional. Sin embargo, tales espectros ópticos están más relacionados con las pendientes de las elevaciones que con la altura del oleaje mismo. La razón de esto es que las variaciones de intensidad de luz que llega a la

detectores, etc.) and aerial photography. Thus, the techniques developed over the years in other areas have eventually been applied to oceanography.

The information contained in a photograph of a rough surface can be processed using two methods. The image can be digitized with a microdensitometer and the resulting numerical array is processed with known computing algorithms (Digital Image Processing). On the other hand, the photographic image (negative) can be processed directly in a coherent optical system (Alvarez-Borrego and Machado, 1985). This is known as Optical Information Processing.

The mathematical techniques used in optical information processing are very similar to those used in electronic data processing. Optical processing, with a simple laser system, lens and filters, allows the implementation of mathematical functions such as multiplication, Fourier transform, correlation and convolution (Shulman, 1970). Input signals can be variations in the optical transmission onto a plane (a photographic negative) and by means of a Fourier transform operation, the frequency distribution of a signal can be represented by a distribution of the light amplitude onto another plane. The optical filtering of a signal is a simple operation which only requires obstructing the spots of light corresponding to undesirable frequencies.

Several researchers have attempted to take advantage of optical systems to obtain information from aerial photographs of the sea surface. Barber (1954) used an optical method to find the wave direction in a sea surface. Other studies have been carried out by Stilwell (1969, 1974) and Sugimori (1975). They used the method of obtaining the two-dimensional optical spectrum from photographs of the sea surface. However, these optical spectra are related more to the elevation slopes than to the wave heights. The reason for this is that the light intensity variations which reach the photographic camera are caused by the reflection on the wave slopes.

cámara fotográfica es causada por la reflexión en las pendientes de las olas.

Como una aproximación de primer orden, Alvarez-Borrego y Machado (1985) asocian valores de intensidad de luz a valores de elevaciones, haciendo una simulación de una fotografía aérea marina regida por el espectro teórico de Pierson-Neumann, y realizan un análisis cualitativo de su espectro óptico.

En este trabajo a partir de simulaciones similares, se aplican y comparan algunas de las técnicas del procesado digital y óptico de imágenes, haciendo énfasis en el filtraje espacial de frecuencias, para conocer el comportamiento de las diferentes ondas que componen la superficie simulada.

De esta manera se pretende caracterizar las respuestas del sistema óptico ante funciones de entrada y salida numéricamente conocidas (superficies rugosas) y su posible aplicación al análisis de fotografías reales de la superficie marina.

SIMULACION DE LA SUPERFICIE MARINA

a) Generación numérica de la superficie

La técnica usada en este trabajo para generar superficies rugosas aleatorias que contengan espectros direccionales específicos fue desarrollada originalmente por Caruthers y Novarini (1971) y está basada en la teoría de sistemas lineales (teoría de filtros) en dos dimensiones. La idea principal del método consiste en aplicar un filtro numérico bidimensional $W(i,j)$ (esencialmente una función de respuesta al impulso), a una superficie $X(i,j)$, cuyas alturas tienen una función de densidad de probabilidad Gaussiana y no están correlacionadas entre sí. $W(i,j)$ es obtenido de una transformada discreta bidimensional de Fourier de la función de transferencia dada por la raíz cuadrada de la razón entre el espectro de densidad de energía de salida deseado (Pierson-Moskowitz en este caso) y el espectro de entrada correspondiente a la superficie $X(i,j)$. Este filtro modula la superficie aleatoria produciendo una superficie de salida $Z(i,j)$ regida por un espectro direccional específico $E_z(m,n)$ (el espectro teórico que se usó).

As a first order approximation, Alvarez-Borrego and Machado (1985) associate light intensity values to elevation values, simulating an aerial photograph of the sea which follows the theoretical Pierson-Neumann spectrum. A qualitative analysis of its optical spectrum is then carried out.

In the present work, based on similar simulations, some of the digital and optical image processing techniques are applied and compared, with emphasis on the spatial filtering of frequencies, in order to know the behaviour of the different waves which compose the simulated surface.

Thus, the objective is to characterize the responses of the optical system subjected to input and output functions which are known numerically and the possible application to the analysis of real photographs of the sea surface.

SIMULATION OF THE SEA SURFACE

a) Numerical generation of the surface

The technique used in this study to generate random rough surfaces which contain specific directional spectra was originally developed by Caruthers and Novarini (1971) and is based on the linear system theory (filter theory) in two dimensions. The main idea of the method is to apply a two-dimensional numerical filter $W(i,j)$ (essentially a response function to the impulse), to a surface $X(i,j)$ whose heights have a Gaussian probability density function and are not correlated. $W(i,j)$ is obtained from a discrete two-dimensional Fourier transform of the transfer function given by the square root of the ratio between the desired output energy density spectrum (Pierson-Moskowitz in this case) and the input spectrum corresponding to the surface $X(i,j)$. This filter modulates the random surface producing an output surface $Z(i,j)$ governed by a specific directional spectrum $E_z(m,n)$ (the theoretical spectrum used).

En este caso, el espectro teórico usado es el de Pierson-Moskowitz, que en función del número de onda está dado por:

$$E(Kx, Ky) = (\gamma/2)g^{-2}K^{-4} \exp(-\beta g^2/U^4 K^2) \cos^2\{\tan^{-1}(Ky/Kx)\} \quad (1)$$

donde $\gamma = 4.8978 \text{ m}^2/\text{s}^4$. En estas ecuaciones Kx existe en $(0, +\infty)$ y Ky en $(-\infty, +\infty)$.

Este espectro es de "un lado", es decir, no hay energía en componentes negativas al viento (Fig. 1). Las fórmulas desarrolladas para la simulación requieren de espectros simétricos. Como se considera una situación estática instantánea únicamente, esto puede solucionarse simplemente reteniendo la mitad de la energía propagándose en la dirección X (Caruthers y Novarini, 1971).

b) Impresión en película fotográfica

La película fotográfica ha sido y sigue siendo una componente importante en la mayoría de los sistemas de procesamiento óptico. La película usada en este trabajo fue la Kodak Technical Pan 2415 (ESTAR-AH BASE), caracterizada por un grano extremadamente fino y una muy alta resolución. La calibración de esta película fue obtenida por Alvarez-Borrego (1987) escribiendo una escala creciente de tonos de gris utilizando un microdensitómetro Micro-10 de Perkin Elmer en su modo de escritura. Una vez revelada la película y leídos los valores, se encontró una respuesta cuasi-lineal en un intervalo de 1.5 a 3.0 en valores de densidad dados por el microdensitómetro (ver Fig. 2).

De esta manera, los valores de altura en centímetros del mar simulado, se hicieron corresponder a tonos de gris (valores de densidad) dentro del intervalo antes mencionado. Así, a la parte baja de la onda (valle) le corresponde el tono más claro de densidad y a la parte más alta (cresta) el tono más oscuro, interpolándose linealmente los valores intermedios.

Este tipo de simulación no toma en cuenta la variación en la iluminación sobre la superficie que tendría un mar real. En realidad la imagen fotográfica de un mar es impresa en película por la luz del sol reflejada

In this case, the Pierson-Moskowitz theoretical spectrum was used which, as a function of the wave number, is given by:

where $\gamma = 4.8978 \text{ m}^2/\text{s}^4$. In these equations Kx exists in $(0, +\infty)$ and Ky in $(-\infty, +\infty)$.

This spectrum is one-sided, that is, there is no energy in components negative to the wind (Fig. 1). The formulae developed for the simulation require symmetrical spectra. Since only an instantaneous static situation is considered, this can be simply solved by withholding half the energy propagating in the X direction (Caruthers and Novarini, 1971).

b) Print on photographic film

The photographic film has been and continues to be an important component in most optical processing systems. Kodak Technical Pan film 2415 (ESTAR-AH BASE) was used, which is characterized by a very fine grain and very high resolution. Alvarez-Borrego (1987) obtained the calibration of the film by writing a grey-tone scale using a Perkin-Elmer Micro-10 microdensitometer in its writing mode. Once the film had been developed and the values read, a quasi-linear response was found in the 1.5 to 3.0 range of density values given by the microdensitometer (see Fig. 2).

In this way, the values of height, in centimetres, of the simulated sea were represented by grey tones (density values) within the previously mentioned range. Thus, the brightest density tone corresponds to the lowest part of the wave (trough) and the darkest tone to the highest part (crest), and the intermediate values are linearly interpolated.

This type of simulation does not take into account the variation in the illumination on the surface that a real sea would have. In reality, the photographic image of a sea is recorded on film by the sunlight reflected by

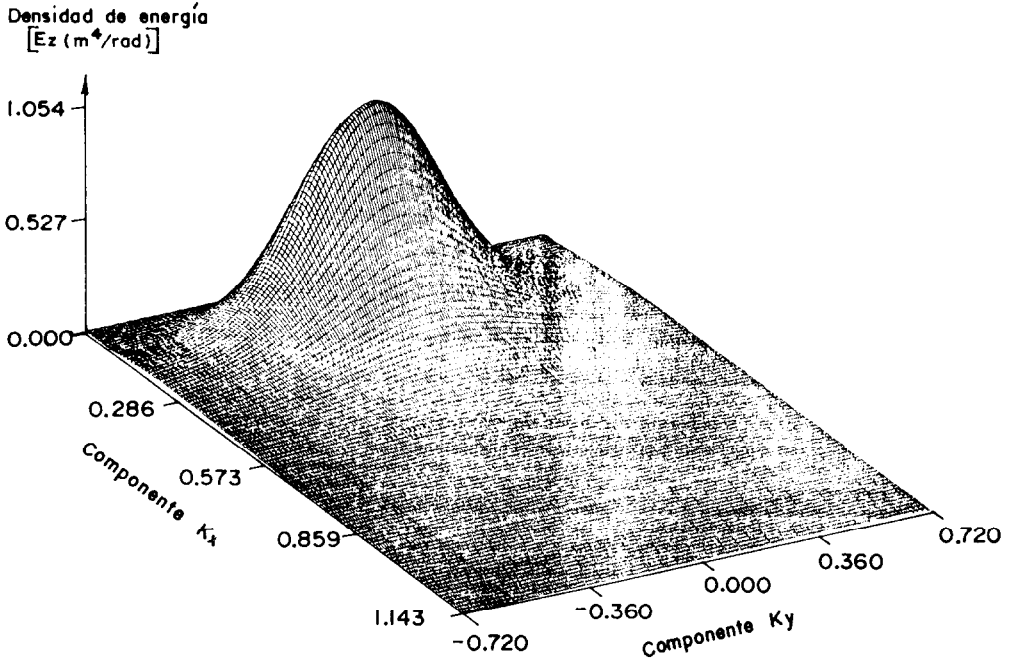


Figura 1. Espectro teórico de Pierson-Moskowitz, en función de los componentes (K_x, K_y) del número de onda, para una velocidad de viento de 5 m/s.

Figure 1. Pierson-Moskowitz theoretical spectrum, as a function of the components (K_x, K_y) of the wave number, for a wind velocity of 5 m/s.

por las pendientes de las olas. En este modelo los valores de "luz reflejada" corresponden a valores de altura de ola y no a valores de pendiente. Es importante tomar en cuenta esta consideración ya que es sólo una aproximación de primer orden a la situación física real.

the wave slopes. In this model the values of "reflected light" correspond to values of wave height and not to slope values. It is important to take this into consideration since it is only a first order approximation to the real physical situation.

PROCESADO DIGITAL DE LA IMAGEN SIMULADA

DIGITAL PROCESSING OF THE SIMULATED IMAGE

a) Espectro de densidad de energía

a) Energy density spectrum

Para procesar numéricamente una imagen, ésta debe ser digitalizada mediante un proceso inverso similar al descrito en la sección anterior. En este trabajo, para procesar las matrices numéricas de los mares simulados, se usó la transformada discreta bidimensional de Fourier

To process an image numerically, it must be digitized by means of a process opposite to the one described in the previous section. In this work, to process the numerical matrices of the simulated seas, the discrete two-dimensional Fourier transform was used

$$G_{kj} = \frac{1}{2\pi} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} g_{lm} e^{i2\pi(kl/M + jm/N)} \quad (2)$$

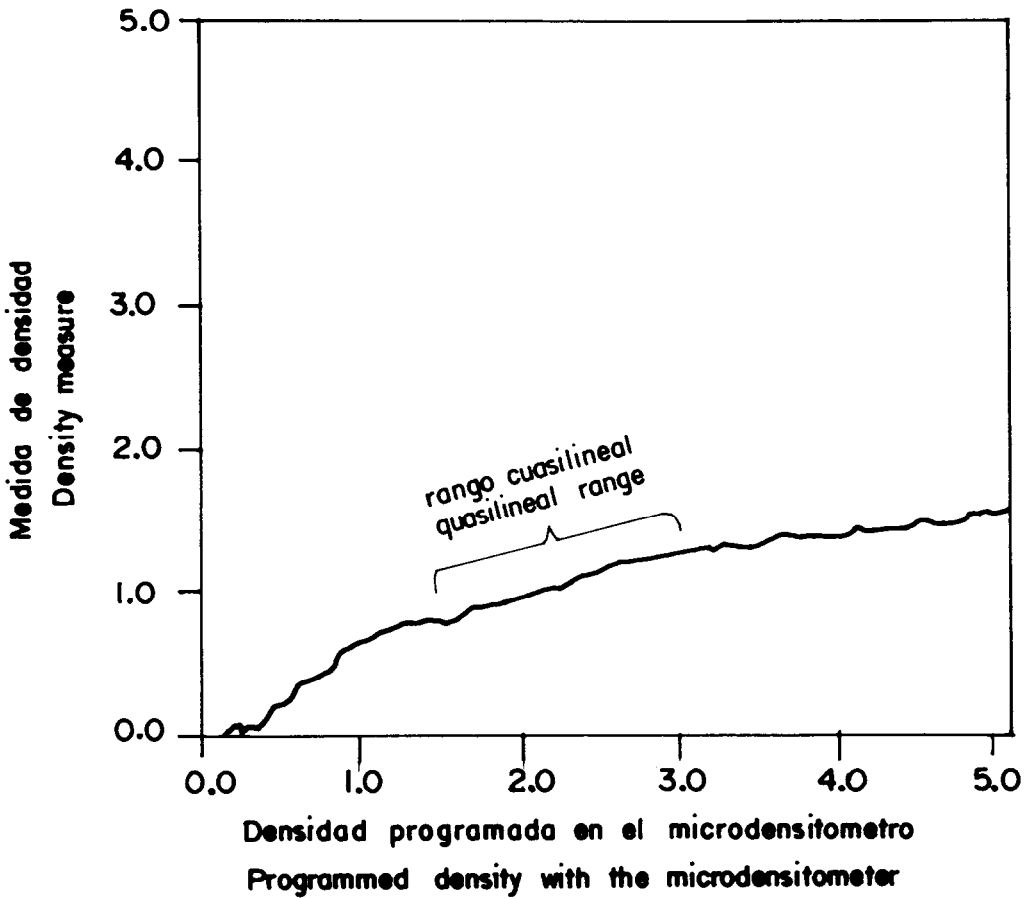


Figura 2. Calibración de la película fotográfica Kodak Technical Pan 2415 (ESTAR-AH BASE) (tomada de Alvarez-Borrego, 1987).
Figure 2. Calibration of the Kodak Technical Pan 2415 (ESTAR-AH BASE) photographic film (taken from Alvarez-Borrego, 1987).

y su transformada inversa

and its inverse transform

$$g_{kj} = \frac{1}{2\pi MN} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} G_{lm} e^{-i2\pi(kl/M + jm/N)} \quad (3)$$

con $k = 0, 1, \dots, M-1$ y $j = 0, 1, \dots, N-1$ donde k y j representan los índices de los componentes espaciales de frecuencia dados por

with $k = 0, 1, \dots, M-1$ and $j = 0, 1, \dots, N-1$ where k and j represent the indices of the spatial frequency components given by

$$F_x = 1/\Delta x = K_x/2\pi \quad ; \quad F_y = 1/\Delta y = K_y/2\pi \quad (4)$$

El par de ecuaciones (2) y (3) fueron usadas mediante una subrutina de transformada rápida de Fourier (FFT).

La Figura 3 muestra un diagrama de bloques esquematizado del proceso usado para obtener los espectros de densidad de energía de la superficie. La superficie original, cuyo origen de coordenadas se localiza en una de las esquinas del rectángulo que forma la malla numérica, es reacomodada de tal forma que el origen quede al centro de la malla. Esta superficie es transformada por la FFT, la cual vuelve el origen a la esquina de la malla escribiendo las frecuencias positivas en los índices de cero a $M/2$ y cero a $N/2$, los cuales representan los números de onda de Nyquist para los incrementos espaciales Δx y Δy

$$F_{N_x} = j \Delta K_x = (M/2)(2\pi/M \Delta x) = \pi / \Delta x \quad (5)$$

$$F_{N_y} = k \Delta K_y = (N/2)(2\pi/N \Delta y) = \pi / \Delta y$$

(los números de onda de Nyquist son los máximos números de onda que pueden ser muestreados).

Nuevamente la malla numérica es reacomodada para volver el origen al centro, de tal forma que sea más fácil visualizar la forma del espectro en el intervalo

$$-\pi / \Delta x \leq K_x \leq \pi / \Delta x \quad (6)$$

$$-\pi / \Delta y \leq K_y \leq \pi / \Delta y$$

Para obtener el espectro de densidad de energía, es necesario obtener el módulo al cuadrado de la transformada (método de Cooley-Tuckey), esto es:

$$S_{kj} = \frac{\Delta x \Delta y}{MN} G_{kj} G_{kj}^* = \frac{\Delta x \Delta y}{MN} (Re^2\{G_{kj}\} + Im^2\{G_{kj}\}) \quad (7)$$

donde G_{kj}^* es el complejo conjugado de G_{kj} y Re representa la parte real e Im la parte imaginaria del número complejo G_{kj} .

En el caso de que las dimensiones de las matrices sean pares (como en este caso), los

Equations (2) and (3) were used through a fast Fourier transform subroutine (FFT).

Figure 3 shows a block diagram of the process used to obtain the energy density spectrum of the surface. The original surface, whose origin of coordinates is located in one of the corners of the rectangle formed by the numerical grid, is rearranged in such a way that the origin is left in the centre of the grid. This surface is transformed by the FFT which sends the origin back to the corner of the grid writing the positive frequencies in the indices from zero to $M/2$ and from zero to $N/2$, which represent the Nyquist wave numbers for the spatial increments Δx and Δy

(the Nyquist wave numbers are the maximum wave numbers that can be sampled).

The numerical grid is again rearranged to send the origin back to the centre, so that it can be easier to visualize the form of the spectrum in the interval

To obtain the energy density spectrum it is necessary to obtain the squared modulus of the transform (Cooley-Tuckey method), that is:

where G_{kj}^* is the conjugated complex of G_{kj} and Re represents the real part and Im the imaginary part of the complex number G_{kj} .

If the dimensions of the matrices are even (as in this case), the Fourier wave

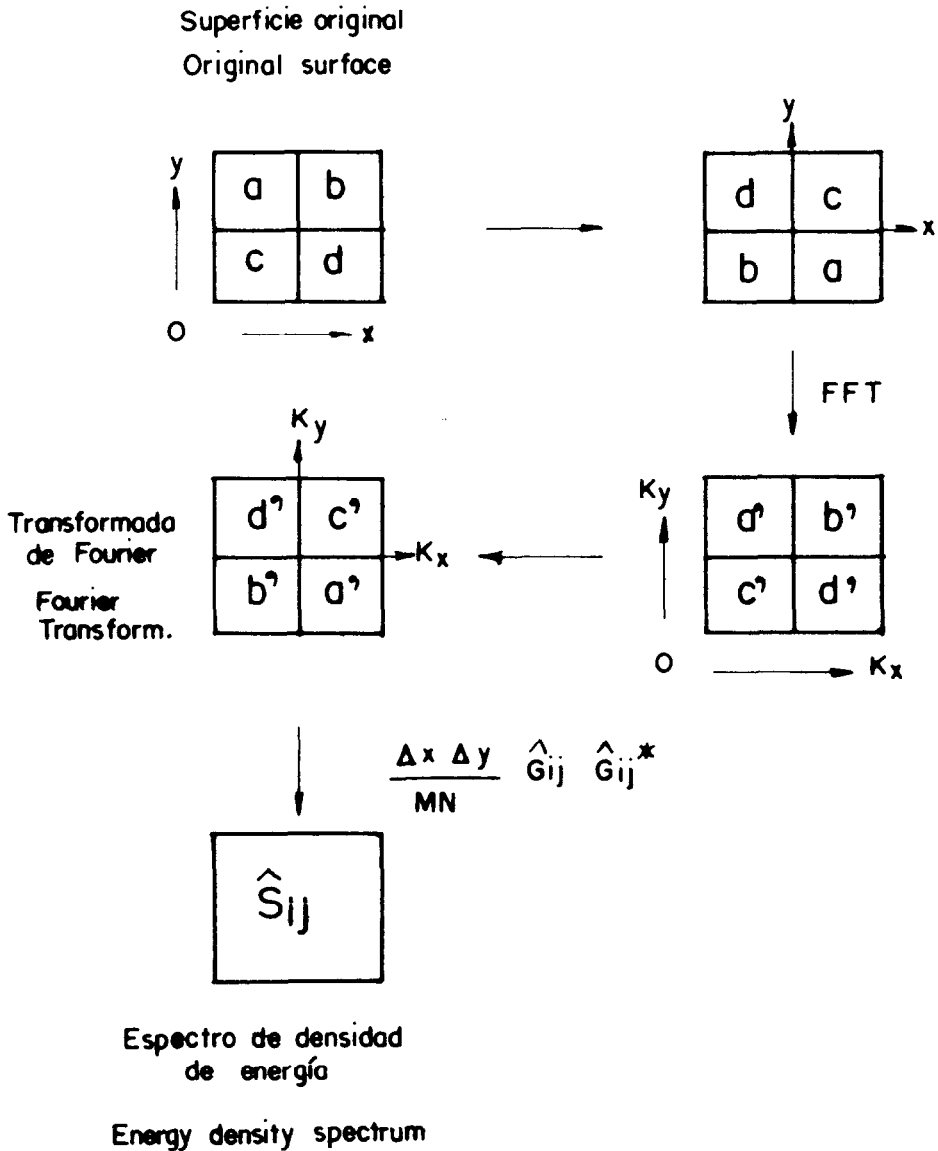


Figura 3. Diagrama de bloques usado para obtener los espectros numéricos de densidad de energía de las superficies.

Figure 3. Block diagram used to obtain the numerical energy density spectra of the surfaces.

números de onda de Fourier $k/M\Delta x$ y $j/N\Delta y$ donde $k=M/2$ y $j=N/2$ corresponden a los números de onda de Nyquist $1/2\Delta x$ y $1/2\Delta y$ respectivamente. El espectro de un "lado" cuando las dimensiones son pares consiste de:

numbers $k/M\Delta x$ and $j/N\Delta y$, where $k = M/2$ and $j = N/2$, correspond to the Nyquist wave numbers $1/2\Delta x$ and $1/2\Delta y$ respectively. The one-sided spectrum when the dimensions are even is:

$$S_{ij} \quad \text{para/for } i = 0 \text{ y } j = 0$$

$$S_{ij} = \{ 2S_{ij} \quad \text{para/for } 0 < i < M/2 \text{ y } 0 < j < N/2 \quad (8)$$

$$S_{ij} \quad \text{para/for } i = M/2 \text{ y } j = N/2$$

b) Filtrado por análisis de Fourier

El análisis de Fourier puede ser usado para filtrar una serie real (espacial o temporal) discretamente muestreada. El método consiste en calcular la transformada discreta de Fourier y reconstruir una versión filtrada pasabanda al realizar la transformada inversa de Fourier de las frecuencias deseadas. En una dimensión esto es:

$$g_n^f = \frac{1}{N} \sum_{j=j_1}^{j_2} G_j e^{-i2\pi j n / N} + \frac{1}{N} \sum_{j=N-j_2}^{N-j_1} G_j e^{-i2\pi j n / N} \quad (9)$$

donde N es el número de datos y g_n^f es la versión filtrada de la serie original. La serie filtrada incluirá solo aquellas frecuencias entre $j_1/N\Delta$ y $j_2/N\Delta$. Es esencial incluir las frecuencias de Fourier en el intervalo de $(N-j_2)/N$ a $(N-j_1)/N$ para asegurar que la serie g_n^f sea real (Chelton, 1984).

En el caso de las superficies simuladas del mar, el filtrado se realizó de la siguiente manera: se calculó la transformada directa de Fourier de la superficie, separando el número complejo resultante G_{kj} en un arreglo con su parte real y otro con su parte imaginaria. Cada uno de estos arreglos fue multiplicado por una función de transferencia que consiste de unos para los números de onda deseados y ceros para los que querían eliminarse. La imagen filtrada se reconstruye al tomar la transformada inversa del complejo G_{kj}^f (partes real e imaginaria).

PROCESADO OPTICO DE LA IMAGEN SIMULADA

El fenómeno lineal de la difracción de la luz puede ser explicado matemáticamente como una aproximación a la transformada de Fourier bidimensional del campo de amplitud compleja. Una lente convergente puede modificar dicha aproximación y convertirla en una

b) Filtering by Fourier analysis

The Fourier analysis can be used to filter a real series (spatial or temporal) discretely sampled. The method consists in calculating the discrete Fourier transform and reconstructing a passband filtered version on carrying out the inverse Fourier transform of the desired frequencies. In one dimension this is:

where N is the number of data and g_n^f is the filtered version of the original series. The filtered series will include only those frequencies between $j_1/N\Delta$ and $j_2/N\Delta$. It is essential to include the Fourier frequencies in the range of $(N-j_2)/N$ to $(N-j_1)/N$ to assure that the g_n^f is real (Chelton, 1984).

In the case of simulated sea surfaces, the filtering was carried out in the following way: the direct Fourier transform of the surface was calculated, separating the resulting complex number G_{kj} in an array composed of its real part and another one of the imaginary part. Each of these arrays was multiplied by a transfer function which consists of ones for the desired wave numbers and zeros for those to be eliminated. The filtered image is reconstructed by taking the inverse transform of the complex G_{kj}^f (real and imaginary parts).

OPTICAL PROCESSING OF THE SIMULATED IMAGE

The linear phenomenon of diffraction of light can be explained mathematically as an approximation to the two-dimensional Fourier transform of the complex amplitude field. A converging lens can modify this approximation and convert it into an exact Fourier transform

transformada de Fourier exacta y describir la perturbación de la luz como una distribución de valores reales de intensidad (espectro de potencia del campo difractado).

a) Sistema óptico coherente

Para obtener el espectro de potencia de la imagen simulada del mar (contenida en una transparencia) se utilizó el sistema óptico coherente mostrado en la Figura 4. El arreglo consiste de una fuente de luz laser de He-Ne de 632.8nm de longitud de onda, un objetivo de microscopio inmediatamente después de la salida del haz del laser, en cuyo foco se coloca un filtro espacial (un pequeño agujero de 25 micrones de diámetro) cuyo propósito es expandir la luz y filtrar las altas frecuencias provenientes del ruido inherente a las fluctuaciones aleatorias de intensidad causadas principalmente por efectos de interferencia de la luz esparcida por partículas de polvo en el aire y sobre los espejos, además de los efectos de la lente del objetivo de microscopio. Los frentes de onda esféricos que emergen del filtro espacial inciden sobre la lente colimadora situada a una distancia igual a su longitud focal (para este caso 50cm). Esta lente convierte los frentes de onda esféricos en frentes de onda planos, los cuales iluminan uniformemente la imagen de la superficie del mar contenida en la transparencia (los diafragmas controlan el área de iluminación que llega a esta función de entrada). Un poco adelante está colocada la lente que realiza la transformada de Fourier de la imagen. El plano del espectro de potencia (plano de Fourier) se encuentra a la distancia focal de esta última lente (70cm para este caso), donde pueden filtrarse las frecuencias no deseadas simplemente obstruyendo el paso de los puntos luminosos que las representan. Más adelante está situada una lente similar que realiza la transformada inversa de Fourier que reconstruye la imagen (completa o filtrada), la cual es captada en la cámara de video (que también puede ser una cámara fotográfica). El espectro de potencia puede ser captado poniendo en el plano de Fourier una cámara fotográfica o tomando mediciones de intensidad con un fotomultiplicador. Dicho espectro de potencia de la superficie marina está representado como la distribución de intensidad en el plano focal de la primer lente de transformada y está dada por:

and describe the perturbation of light as a distribution of real intensity values (power spectrum of the diffracted field).

a) Coherent optical system

The coherent optical system shown in Figure 4 was used to obtain the power spectrum of the simulated sea image (contained in a transparency). The array consists of a He-Ne laser light source of wavelength 632.8nm, a microscope objective immediately after the exit of the laser beam. In its focus a spatial filter (a small hole 25 microns in diameter) is placed whose purpose is to expand the light and filter the high frequencies originated by the noise inherent to the random fluctuations of intensity, caused mainly by effects of interference of the light scattered by dust particles in the air and over the mirrors, in addition to the effects of the lens of the microscope objective. The spherical wave fronts that emerge from the spatial filter fall on the collimator lens located at a distance equal to its focal length (in this case 50cm). This lens converts the spherical wave fronts into plane wave fronts, which illuminate uniformly the image of the sea surface contained in the transparency (the diaphragms control the illumination area which reaches this input function). The lens which carries out the Fourier transform of the image is placed in front, at a short distance. The plane of the power spectrum (Fourier plane) is found at the focus of this last lens (70cm in this case), where the undesirable frequencies can be filtered by simply obstructing the passing of the luminous spots which represent them. A similar lens is located further forward which carries out the inverse Fourier transform which reconstructs the image (complete or filtered). This is detected by a video (or photographic) camera. The power spectrum can be detected by placing a photographic camera on the Fourier plane or by measuring the intensity with a photomultiplier. This power spectrum of the sea surface is represented by the intensity distribution in the focal plane of the first transform lens and is given by:

$$I_i(x_i, y_i) = \frac{A^2}{\lambda^2 f^2} \left\{ \int \int_{-\infty}^{\infty} T_0(x_0, y_0) \exp\left\{ \frac{-i2\pi}{\lambda f} (x_0 x_i + y_0 y_i) \right\} dx_0 dy_0 \right\}^2 \quad (10)$$

donde A es la amplitud de la onda plana incidente, λ es la longitud de onda de la luz láser, f es la distancia focal de la lente, i es el número imaginario $(-1)^{1/2}$ y $T_0(x_0, y_0)$ es la transmitancia de amplitud compleja de la transparencia con la imagen simulada (Goodman, 1968).

RESULTADOS

a) Simulación

Se generaron varias superficies $Z(i,j)$ usando una velocidad de viento de 5 m/s y con diferente semilla aleatoria para la generación de la malla no correlacionada $X(i,j)$. En este trabajo se utilizan áreas 113 veces mayores que en Caruthers y Novarini (1971), quedando mares con (208,160) datos de elevaciones de la superficie en centímetros, con un Δx de 2.74m y un Δy de 5.45m. La elevación máxima promedio fue de 155cm y la varianza promedio de 1480cm².

Un segmento de (100,100) datos de una de las superficies simuladas es mostrado en la Figura 5. En la Figura 6 se observa que la distribución de elevaciones tiene una distribución muy aproximada a la normal. El eje horizontal superior de esta figura muestra los valores de densidad asociados a los valores de altura en centímetros de la superficie (histograma de grises). A cada 2cm de altura le corresponde un aumento de 0.01 en valor de densidad.

La Figura 7 muestra una amplificación fotográfica de una de las imágenes simuladas (los tonos de gris están invertidos con respecto al negativo).

b) Procesado digital

La Figura 8 muestra un espectro de dos "lados" obtenido por la ecuación (7). Se seleccionaron seis bandas arbitrarias de frecuencias, cuatro en la dirección K_x y dos en K_y , para realizar un filtrado numérico de una de las superficies numéricas simuladas. La Tabla I muestra la localización de tales bandas de frecuencias en el espectro numérico y su relación con el espectro óptico de la misma imagen.

where A is the amplitude of the incident plane wave, λ is the wavelength of the laser light, f is the focal distance of the lens, i is the imaginary number $(-1)^{1/2}$ and $T_0(x_0, y_0)$ is the transmittance of complex amplitude of the transparency with the simulated image (Goodman, 1968).

RESULTS

a) Simulation

Several $Z(i,j)$ surfaces were generated using a wind velocity of 5 m/s and different random seed for the generation of the non-correlated grid $X(i,j)$. In this work, the areas were 113 times larger than in Caruthers and Novarini (1971). The resulting seas had (208,160) elevation data of the surface in centimetres, with a Δx of 2.74m and a Δy of 5.45m. The maximum average elevation was 155cm and the average variance 1480cm².

A segment of (100,100) data of one of the simulated surfaces is shown in Figure 5. In Figure 6 it can be seen that the distribution of elevations has a distribution very close to normal. The upper horizontal axis of this figure shows the density values associated with the height values in centimetres of the surface (grey histogram). An increase of 0.01 in density value corresponds to 2cm in height.

Figure 7 shows a photographic enlargement of one of the simulated images (the grey tones are inverted with respect to the negative).

b) Digital processing

Figure 8 shows a two-sided spectrum obtained by equation 7. Six arbitrary frequency bands were selected, four in the K_x direction and two in the K_y direction, in order to carry out a numerical filtering of one of the simulated numerical surfaces. Table I shows the location of these frequency bands in the numerical spectrum and its relation to the optical spectrum of the same image.

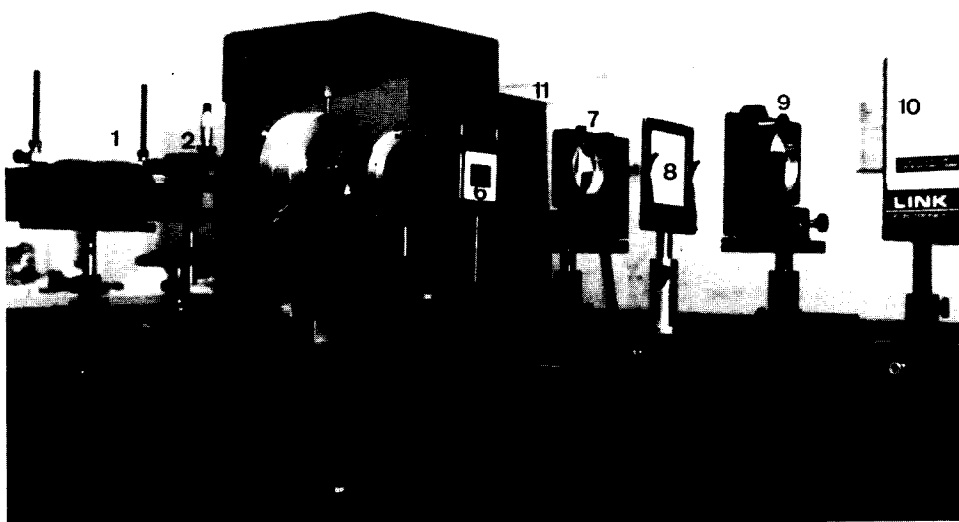
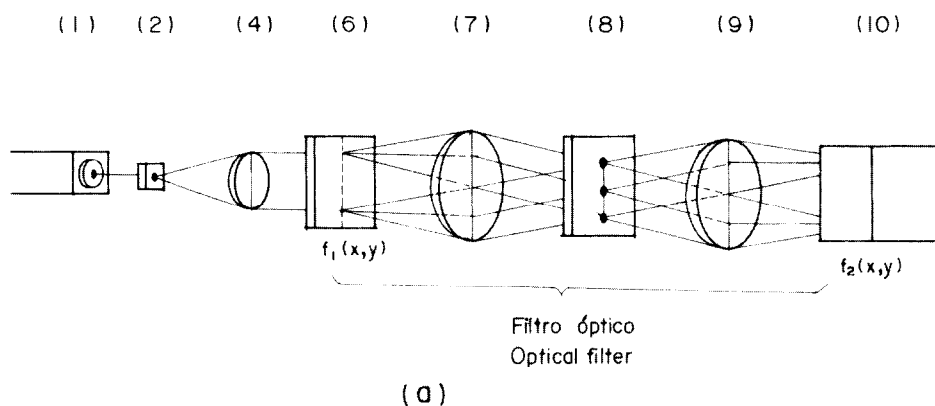


Figura 4. Sistema óptico coherente usado para la obtención de los espectros ópticos y las imágenes filtradas, a) diagrama esquemático y b) fotografía del sistema compactado. Los componentes son: 1) laser He-Ne, 2) filtro espacial, 3) diafragma, 4) lente colimadora, 5) diafragma, 6) plano del objeto (imagen del mar), 7) lente transformadora 1, 8) plano de Fourier, 9) lente transformadora 2, 10) plano de referencia (detector o cámara fotográfica o de video) y 11) pantalla de televisión.

Figure 4. Coherent optical system used to obtain the optical spectra and the filtered images, a) schematic diagram and b) photograph of the system. The components are: 1) laser He-Ne, 2) spatial filter, 3) diaphragm, 4) collimator, 5) diaphragm, 6) plane of the object (image of the sea), 7) transform lens 1, 8) Fourier plane, 9) transform lens 2, 10) reference plane (detector or photographic or video camera) and 11) television screen.

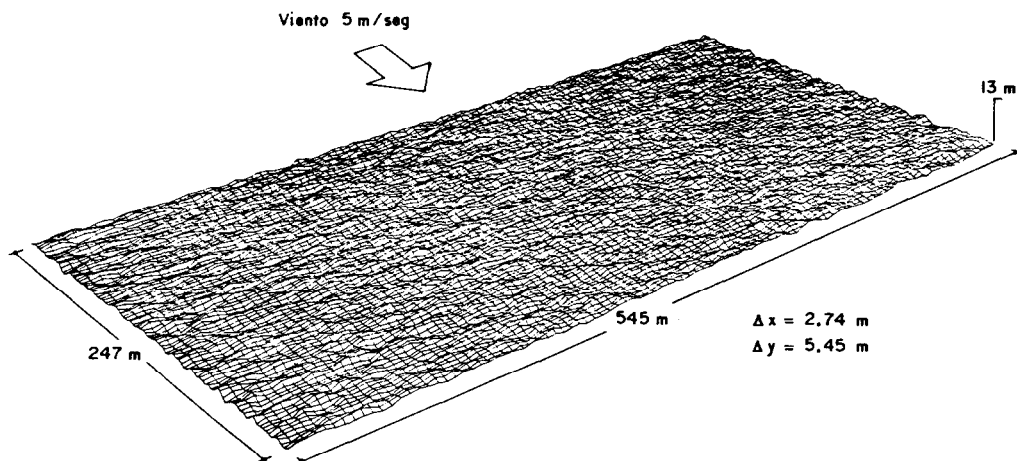


Figura 5. Gráfica de 100 por 100 datos de un mar simulado con una velocidad de viento de 5 m/s.
Figure 5. Graph of 100 by 100 data of a simulated sea with a wind velocity of 5 m/s.

La longitud L y el período de las olas T en aguas profundas se calculó a partir de la teoría lineal de primer orden (Kinsman, 1965) de acuerdo con:

The length L and period T of the waves in deep waters were calculated from the first order linear theory (Kinsman, 1965) according to:

$$L = 2\pi / K \quad ; \quad T = (2\pi L / g)^{1/2} \quad (11)$$

La Figura 9 muestra las distribuciones de elevaciones de las superficies filtradas y su respectivo histograma de grises. La distribución de alturas fue muy aproximada a la distribución normal. Cada una de estas superficies fue impresa en película fotográfica para su comparación con las imágenes obtenidas por un filtrado óptico semejante. El resultado de esto es mostrado en la Figura 10.

Figure 9 shows the distributions of elevations of the filtered surfaces and their respective grey histogram. The distribution of heights was very close to the normal distribution. Each one of these surfaces was printed on photographic film for comparison with the images obtained by a similar optical filtering. The result of this is shown in Figure 10.

c) Procesado óptico

c) Optical processing

Una ampliación fotográfica del espectro óptico de la imagen simulada del mar, obtenido en el sistema óptico coherente descrito anteriormente, es mostrada en la Figura 11. La Tabla I muestra la relación existente entre la posición de los números de onda en el espectro numérico y su localización en el pla-

A photographic enlargement of the optical spectrum of the simulated sea image, obtained in the coherent optical system described previously, is shown in Figure 11. Table I shows the relation which exists between the position of the wave numbers in the numerical spectrum and their location in the

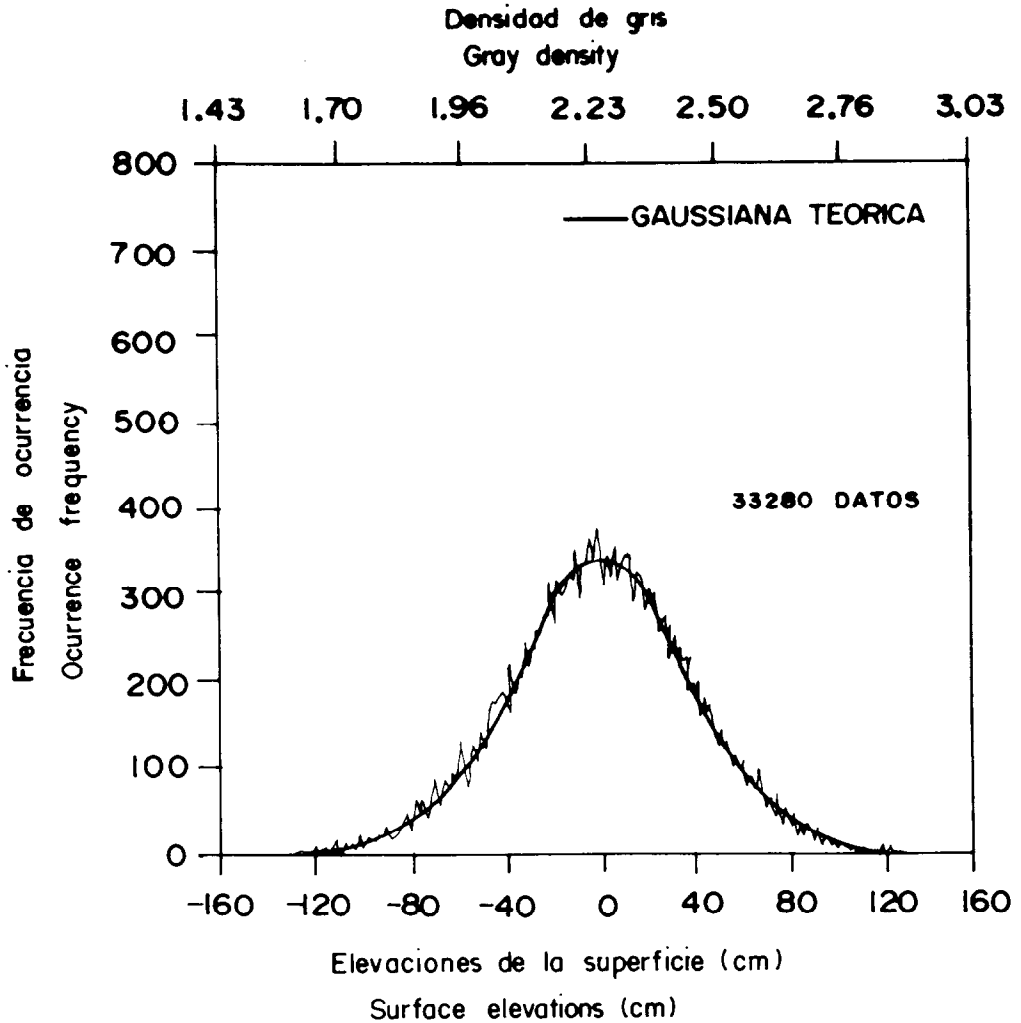


Figura 6. Distribución de alturas del mar simulado y su respectivo histograma de grises. La distribución es muy aproximada a una distribución normal.

Figure 6. Distribution of heights of the simulated sea and its respective grey histogram. The distribution is very close to a normal distribution.

no de Fourier del sistema óptico. Los componentes espaciales de frecuencia F_x y F_y son los inversos de la longitud de onda en la película (similares a los numéricos de la ecuación (4)). x_f y y_f son las coordenadas del espectro en el plano de Fourier y están dadas por (Goodman, 1968)

Fourier plane of the optical system. The spatial frequency components F_x and F_y are the inverse of wavelength in the film (similar to the numerical components of equation (4)). x_f and y_f are the coordinates of the spectrum in the Fourier plane and are given by (Goodman, 1968)

$$x_f = F_x \lambda f \quad y_f \text{ and } y_f = F_y \lambda f \quad (12)$$

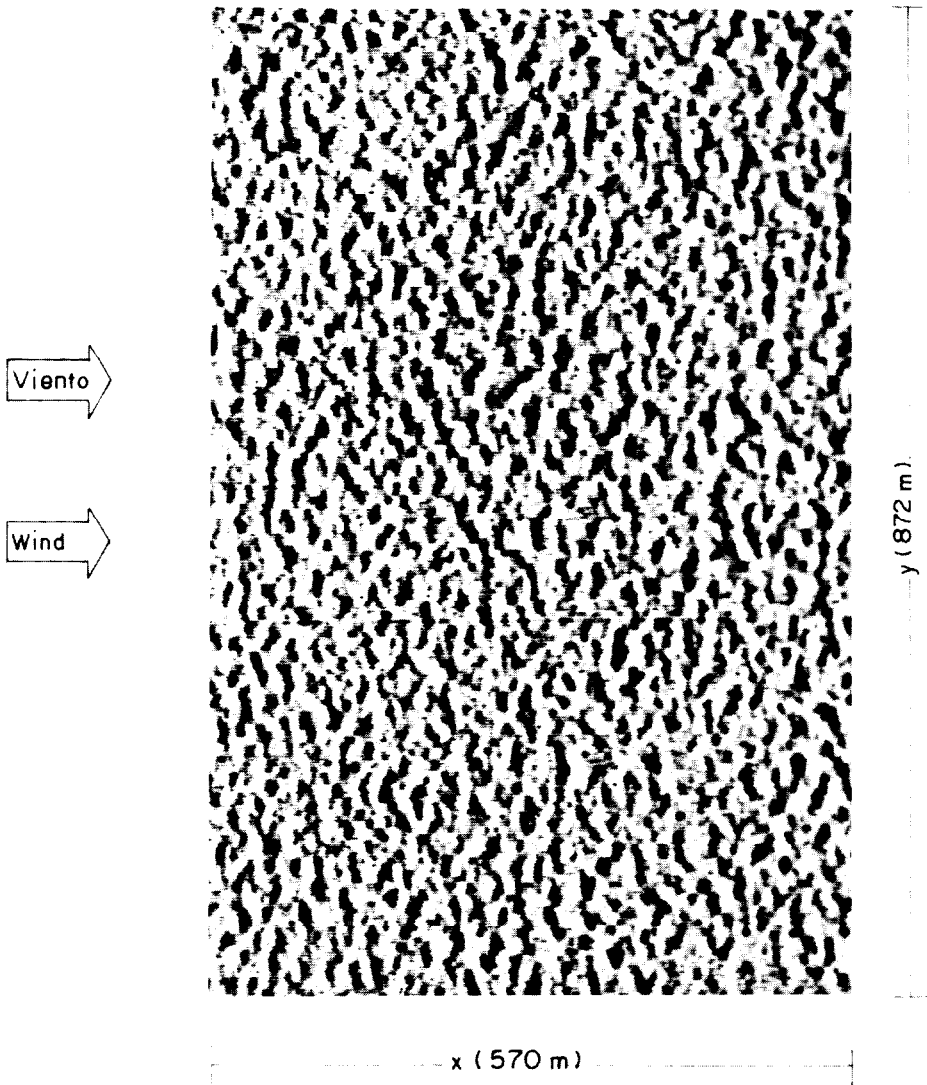


Figura 7. Amplificación fotográfica de la imagen simulada del mar de la Figura 5.
Figure 7. Photographic enlargement of the simulated sea image of Figure 5.

Se obtuvieron así mismo los espectros ópticos de las imágenes filtradas numéricamente, observándose una gran semejanza entre los resultados de ambos métodos de análisis espectral. Dichos espectros ópticos y sus correspondientes espectros numéricos son

The optical spectra of the numerically filtered images were also obtained. A great similarity was observed between the results of both methods of spectral analysis. These optical spectra and their corresponding numerical spectra are shown in Figure 12 for

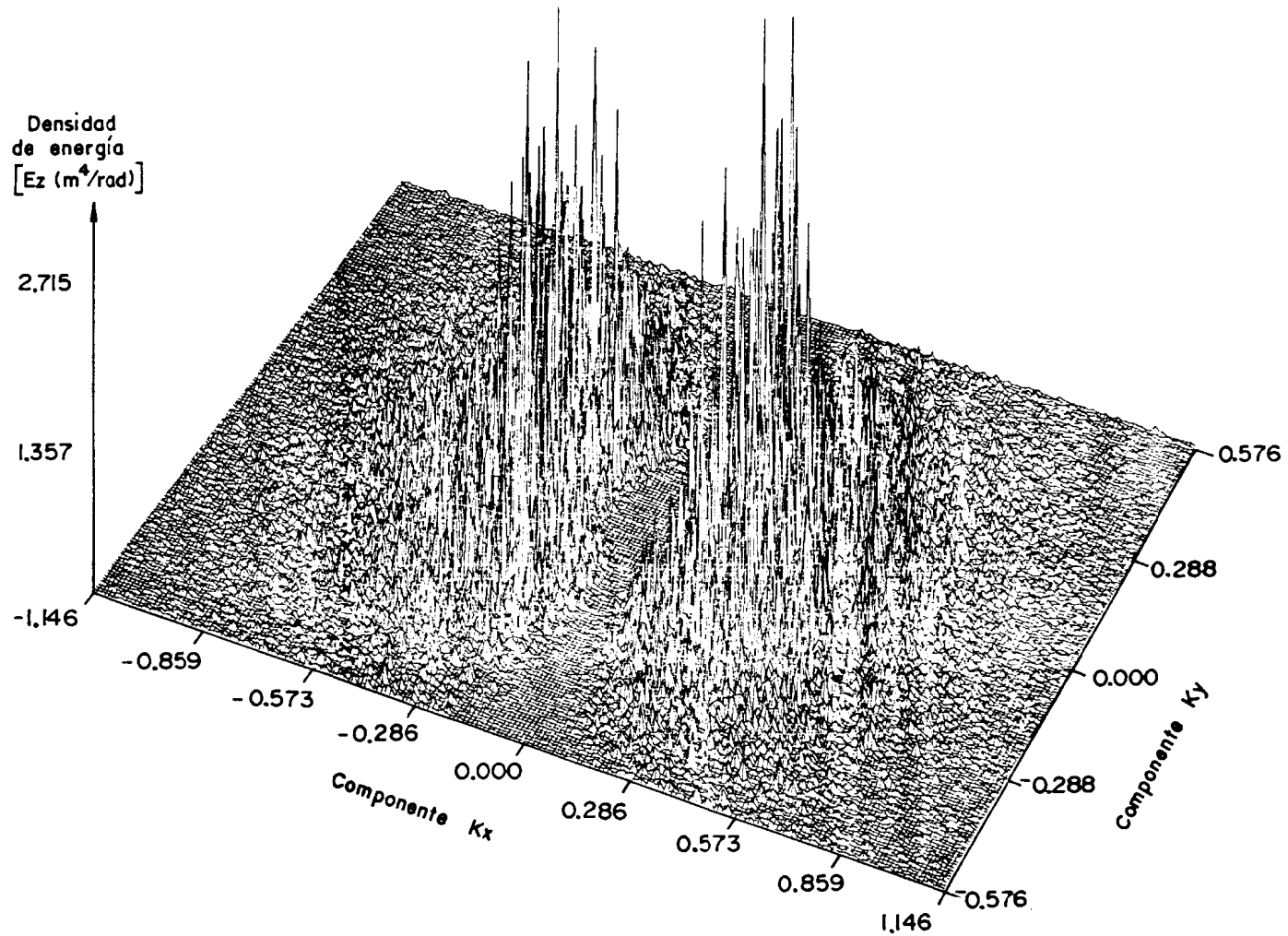


Figura 8. Espectro de densidad de dos "lados" obtenido del análisis numérico de la superficie simulada.
Figure 8. Two-sided density spectrum obtained from the numerical analysis of the simulated surface.

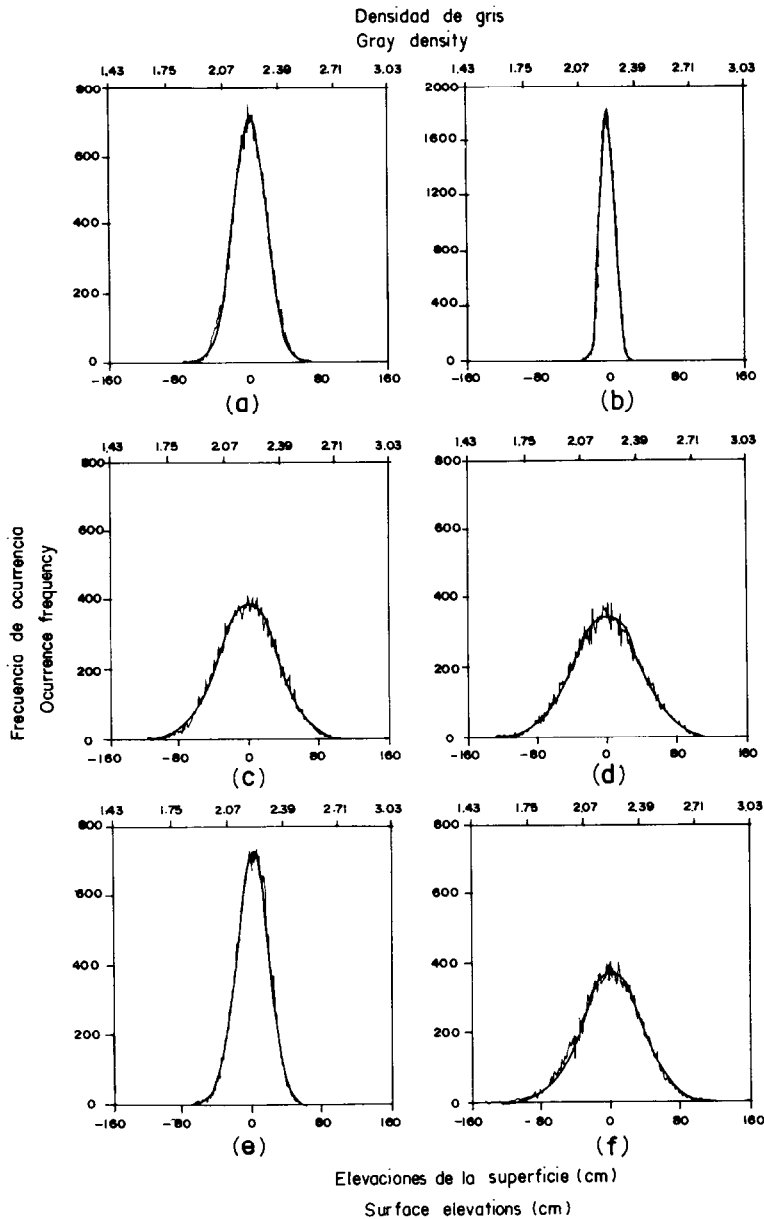


Figura 9. Distribuciones de las elevaciones de los mares filtrados y su correspondiente histograma de grises, a) con altas frecuencias en X, b) con bajas frecuencias en X, c) pasabanda en X, d) con altas e intermedias en X, e) con altas frecuencias en Y y f) con bajas frecuencias en Y.

Figure 9. Distributions of the elevations of the filtered seas and their corresponding grey histogram, a) with high frequencies in X, b) with low frequencies in X, c) passband in X, d) with high and intermediates in X, e) with high frequencies in Y and f) with low frequencies in Y.

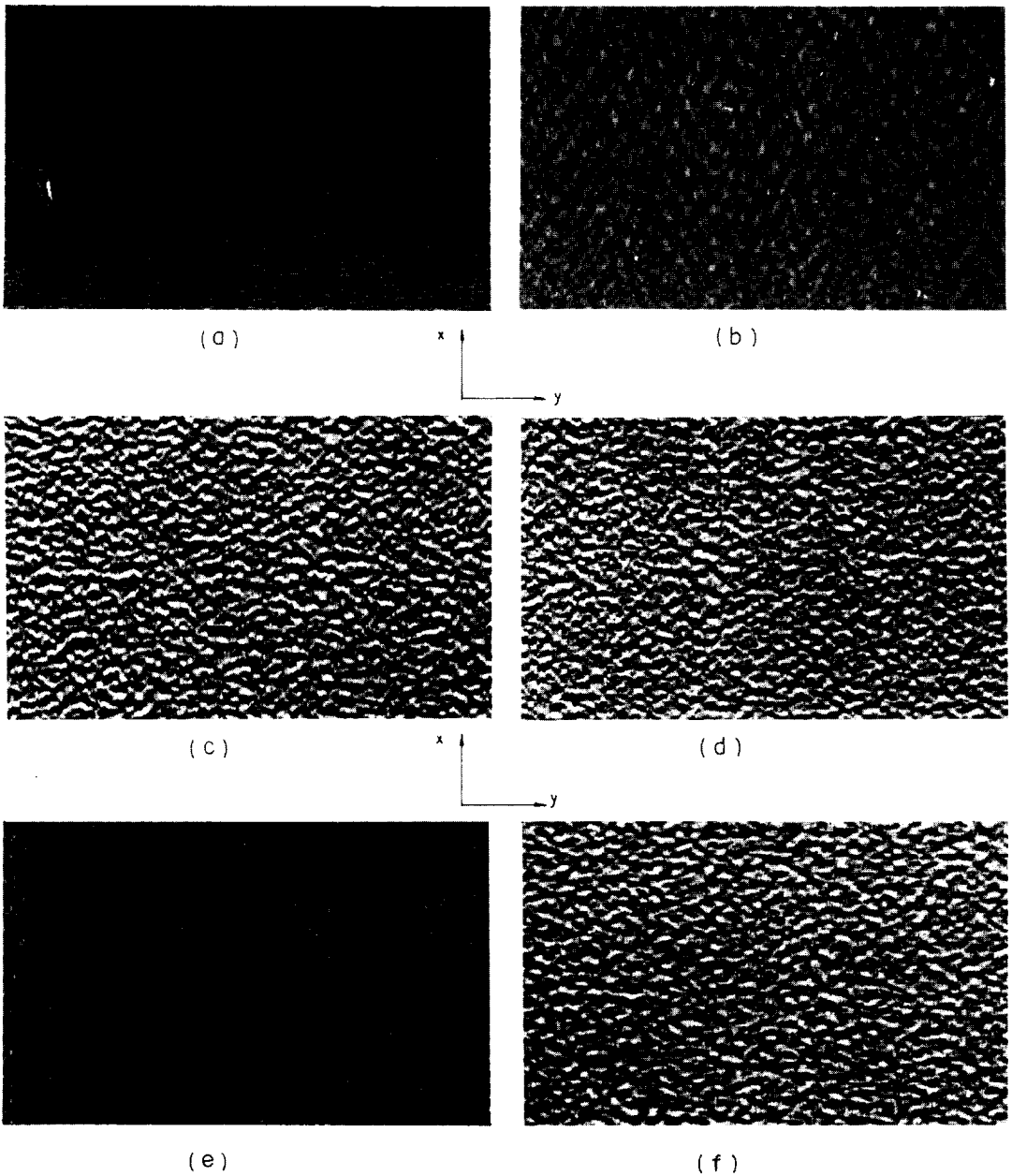


Figura 10. Amplificación fotográfica de las seis superficies filtradas numéricamente, a) altas frecuencias en X , b) bajas frecuencias en X , c) pasabanda en X , d) altas e intermedias en X , e) altas frecuencias en Y y f) bajas frecuencias en Y .

Figure 10. Photographic enlargement of the six numerically filtered surfaces, a) high frequencies in X , b) low frequencies in X , c) passband in X , d) high and intermediates in X , e) high frequencies in Y and f) low frequencies in Y .

Tabla I. Relación entre la posición de los números de onda en el espectro numérico y su localización en el plano de Fourier (espectro óptico).

Table I. Relation between the position of the wave numbers in the numerical spectrum and their location in the Fourier plane (optical spectrum).

EN LA DIRECCION DE X

Indice <i>i</i> del espectro	Período (seg)	Componente K_x (m^{-1})	Longitud de onda (mar) (m)	Longitud de onda (película) (mm)	Frecuencia espacial F_x (mm^{-1})	X_f (mm)
10	6.0443	0.1102	56.9920	0.4368	2.2894	1.0141
20	4.2740	0.2205	28.4960	0.2184	4.5788	2.0282
30	3.4897	0.3307	18.9973	0.1456	6.8681	3.0423
43	2.9148	0.4741	13.2540	0.1016	9.8443	4.3606
50	2.7031	0.5512	11.3984	0.0874	11.4469	5.0705
60	2.4676	0.6615	9.4987	0.0728	13.7363	6.0846
70	2.2845	0.7717	8.1417	0.0624	16.0256	7.0987
80	2.1370	0.8820	7.1240	0.0546	18.3150	8.1128
90	2.0148	0.9922	6.3324	0.0485	20.6044	9.1269
103	1.8833	1.1355	5.5332	0.0424	23.5806	10.4453

Mares filtrados y sus índices: altas frecuencias (44-104), bajas frecuencias (1-10), pasabanda (11-43), altas e intermedias (11-104).

EN LA DIRECCION DE Y

Indice <i>j</i> del espectro	Período (seg)	Componente K_y (m^{-1})	Longitud de onda (mar) (m)	Longitud de onda (película) (mm)	Frecuencia espacial F_y (mm^{-1})	Y_f (mm)
10	7.4765	0.0721	87.2000	0.6720	1.4881	0.6592
20	5.2867	0.1441	43.6000	0.3360	2.9762	1.3183
30	4.3165	0.2162	29.0667	0.2240	4.4643	1.9775
37	3.8868	0.2666	23.5676	0.1816	5.5060	2.4389
50	3.3436	0.3603	17.4400	0.1344	7.4405	3.2958
60	3.0523	0.4323	14.5333	0.1120	8.9286	3.9550
70	2.8258	0.5044	12.4571	0.0960	10.4167	4.6142
80	2.6433	0.5764	10.9000	0.0840	11.9048	5.2733

Mares filtrados y sus índices: altas frecuencias (38-80), bajas frecuencias (1-37).

mostrados en la Figura 12 para su comparación. Los espectros numéricos están presentados en forma de espectros de un "lado". Los espectros ópticos están amplificados en papel de alto contraste para resaltar los puntos que tuviesen información. Las mediciones de x_f y y_f en los espectros ópticos se verificaron cuidadosamente, correspondiendo satisfactoriamente con la teoría.

De acuerdo a la información de la Tabla I, se diseñaron filtros espaciales para implementar un filtrado semejante al numérico en el sistema óptico. Este filtrado consiste en dejar pasar las bandas de luz que corresponden a las frecuencias deseadas en el plano de Fourier del sistema óptico.

Las imágenes filtradas pueden reconstruirse en la pantalla de televisión que se muestra en la Figura 4, observándose sus características y variaciones al cambiar la forma de los filtros espaciales usados. Las imágenes obtenidas mediante un filtrado óptico similar al numérico son presentadas en la Figura 13.

comparison purposes. The numerical spectra are presented in the form of one-sided spectra. The optical spectra are enlarged on high contrast paper in order to emphasize the points which would have information. The measurements of x_f and y_f in the optical spectra were carefully verified and corresponded satisfactorily with the theory.

According to the information in Table I, spatial filters were designed to implement a filtering similar to the numerical one in the optical system. This filtering consists in letting the light bands corresponding to the desired frequencies in the Fourier plane of the optical system pass through.

The filtered images can be reconstructed on the television screen shown in Figure 4. The characteristics and variations on changing the form of the spatial filters used can be observed. The images obtained by means of an optical filtering similar to the numerical filtering are shown in Figure 13.

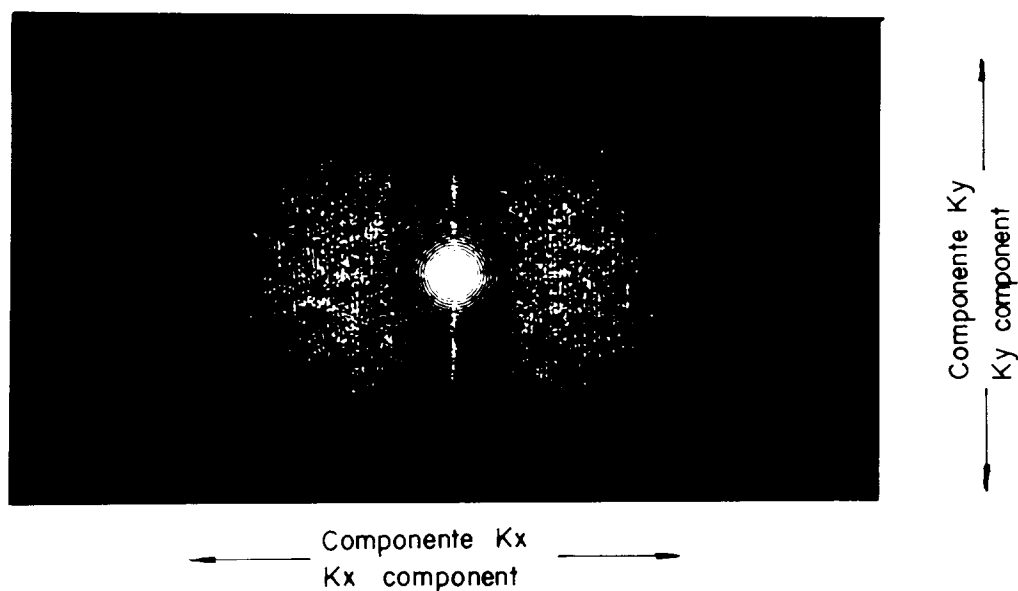


Figura 11. Espectro óptico de la imagen simulada de la Figura 7.
Figure 11. Optical spectrum of the simulated image in Figure 7.

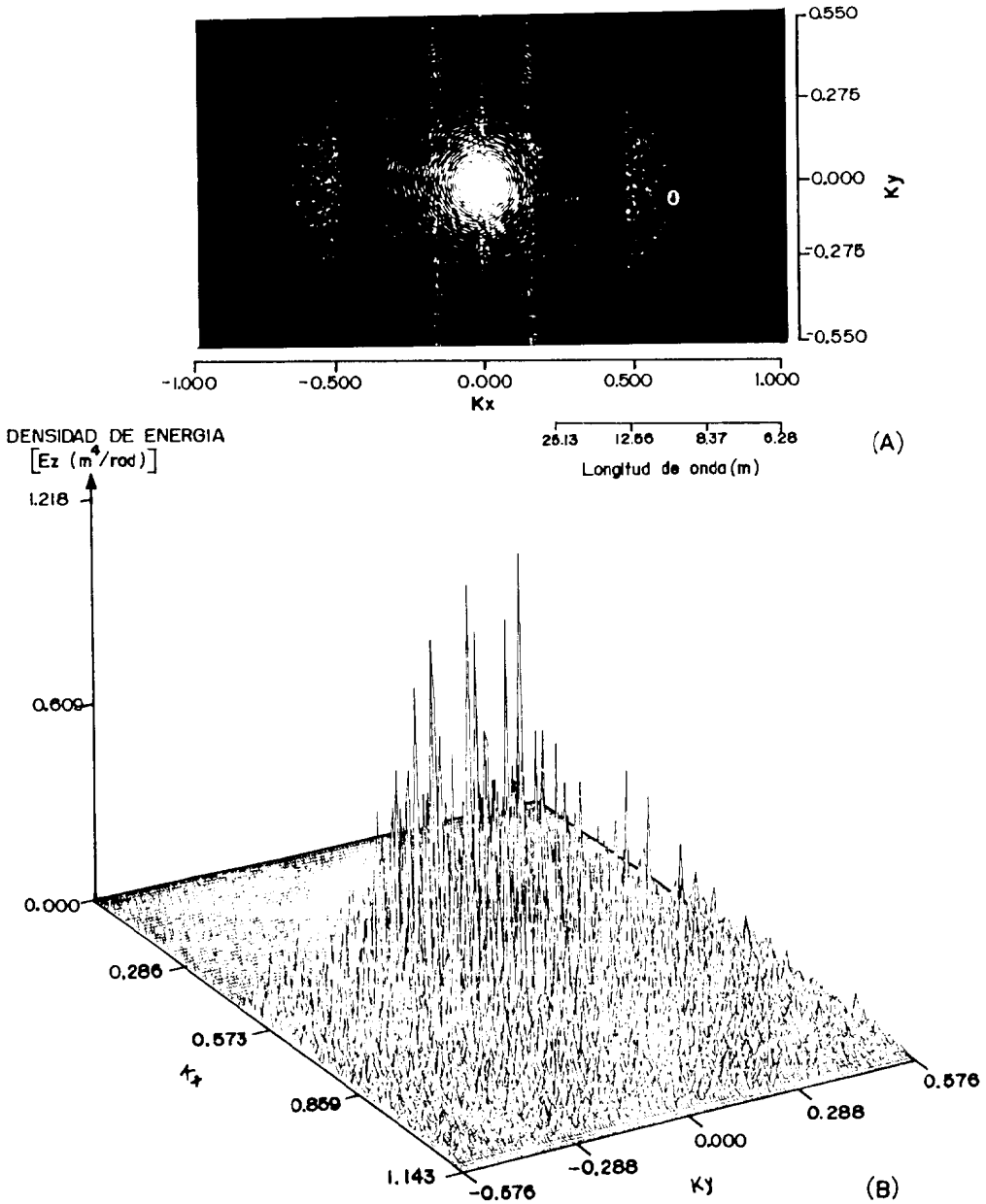


Figura 12. Espectros ópticos (A) y numéricos (B) (presentados como espectros de un "lado") de los mares filtrados numéricamente, a) con altas frecuencias en X, b) con bajas frecuencias en X, c) pasabanda en X, d) altas e intermedias en X, e) con altas frecuencias en Y y f) con bajas frecuencias en Y.

Figure 12. Optical (A) and numerical (B) spectra (presented as one-sided spectra) of the numerically filtered seas, a) with high frequencies in X, b) with low frequencies in X, c) passband in X, d) highs and intermediates in X, e) with high frequencies in Y and f) with low frequencies in Y.

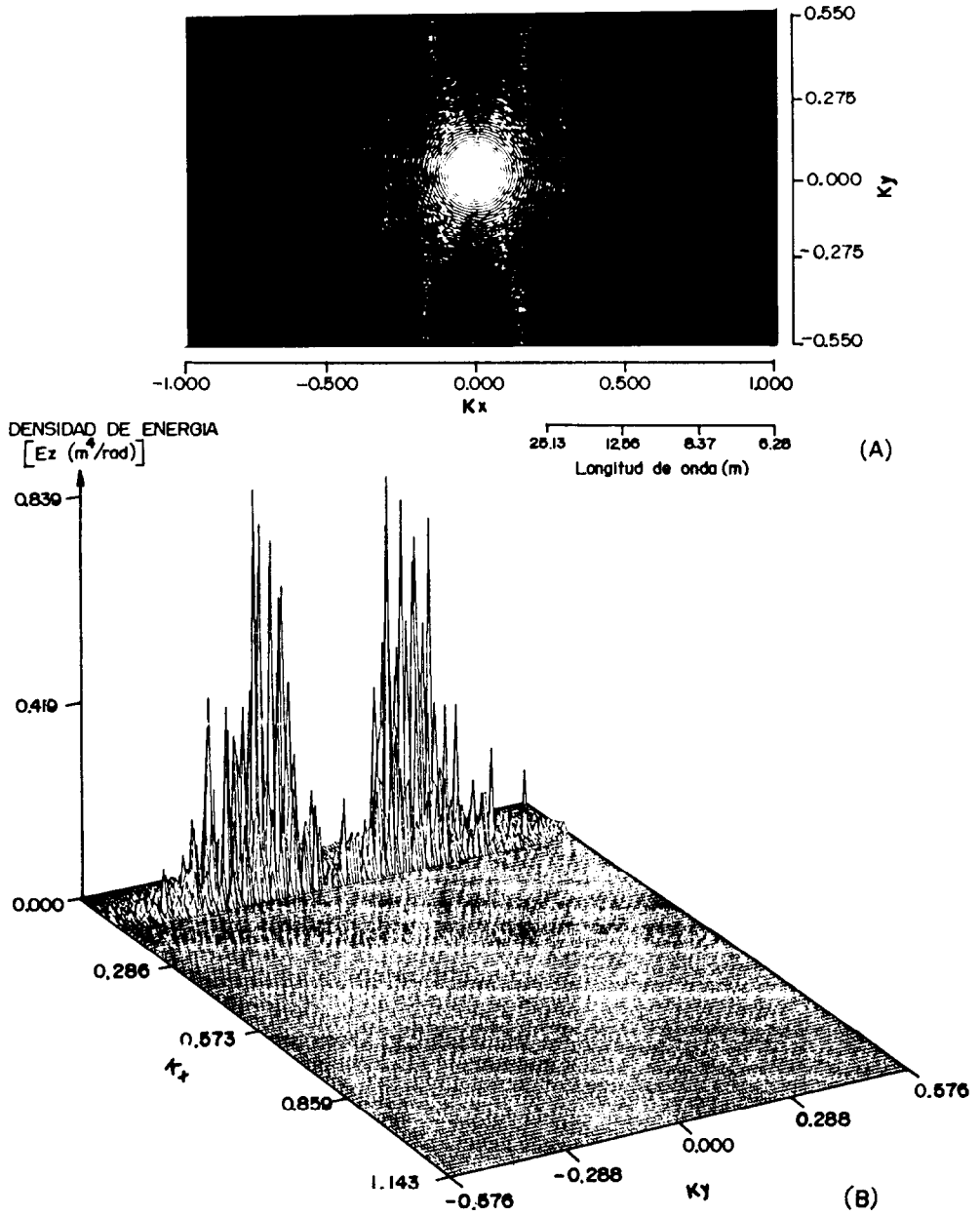


Figura 12b.(cont.)

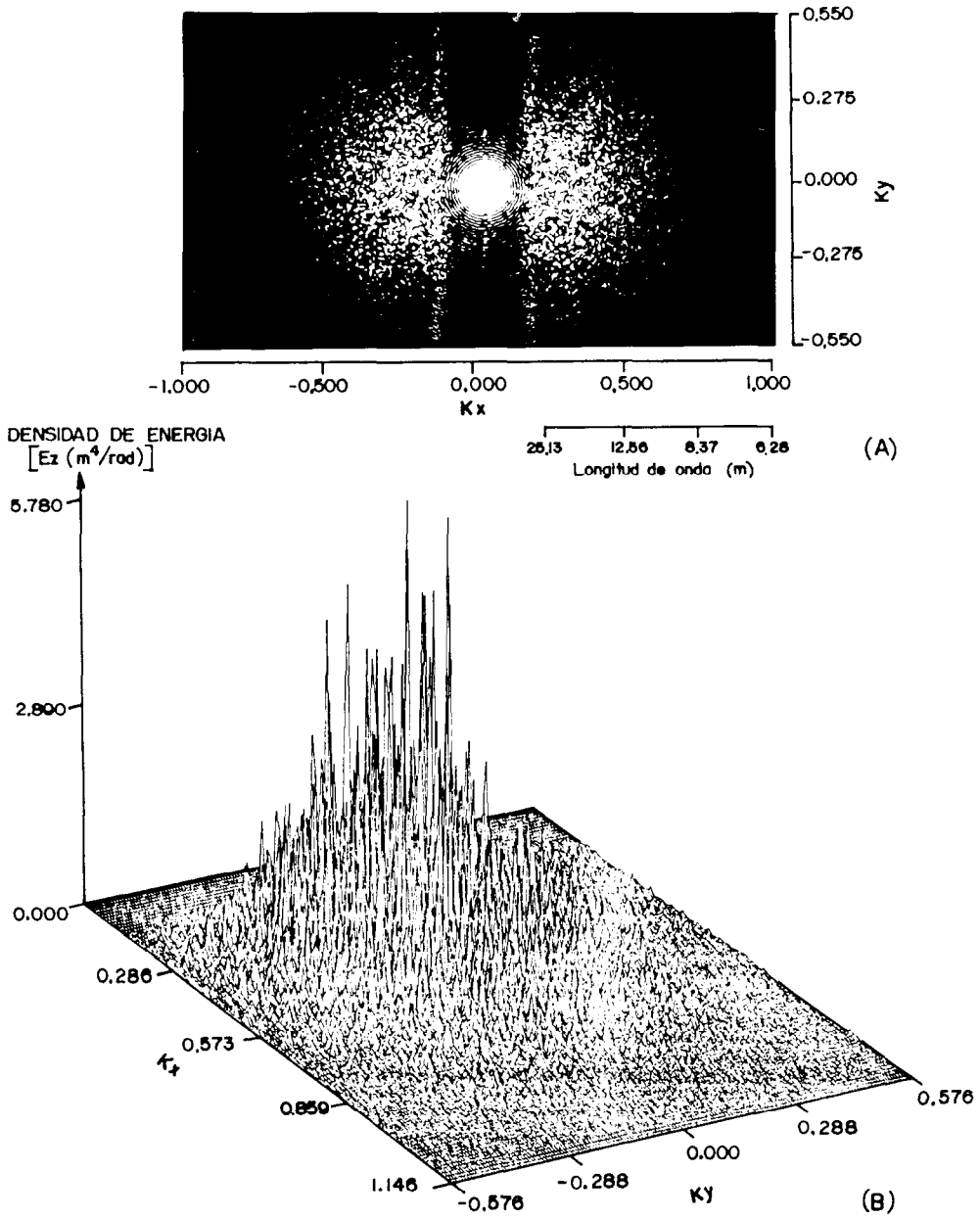


Figura 12c.(cont.)

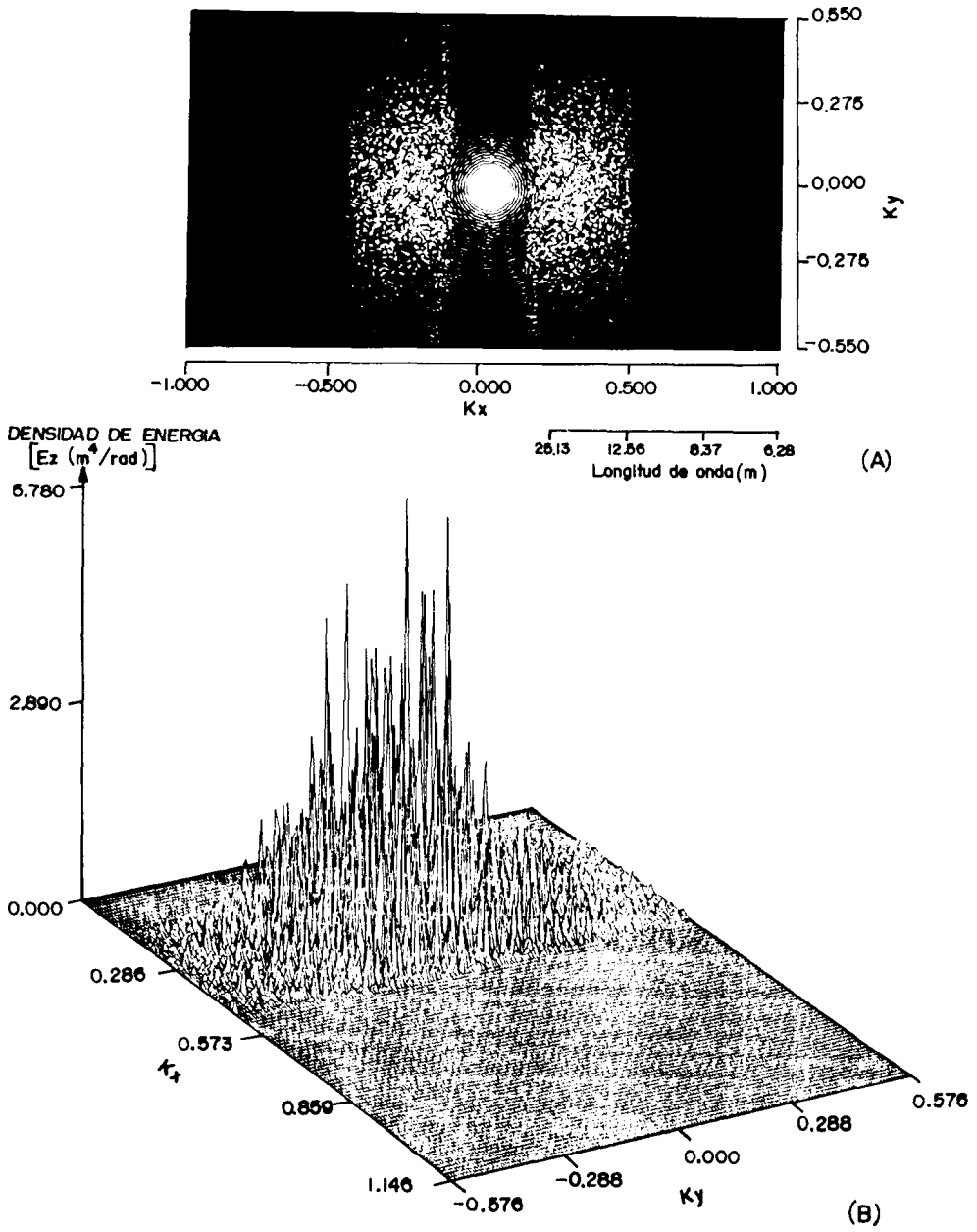


Figura 12d.(cont.)

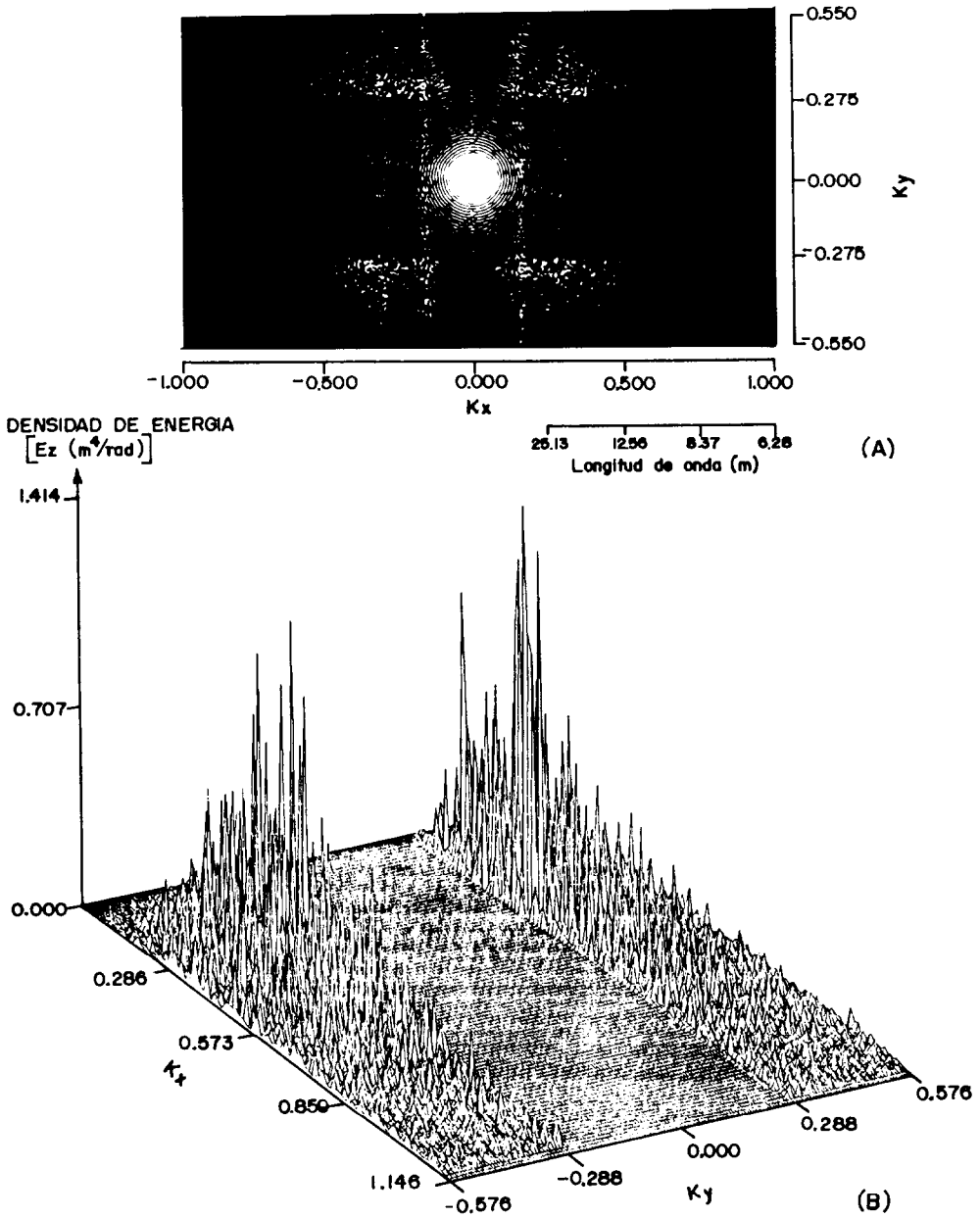


Figura 12e.(cont.)

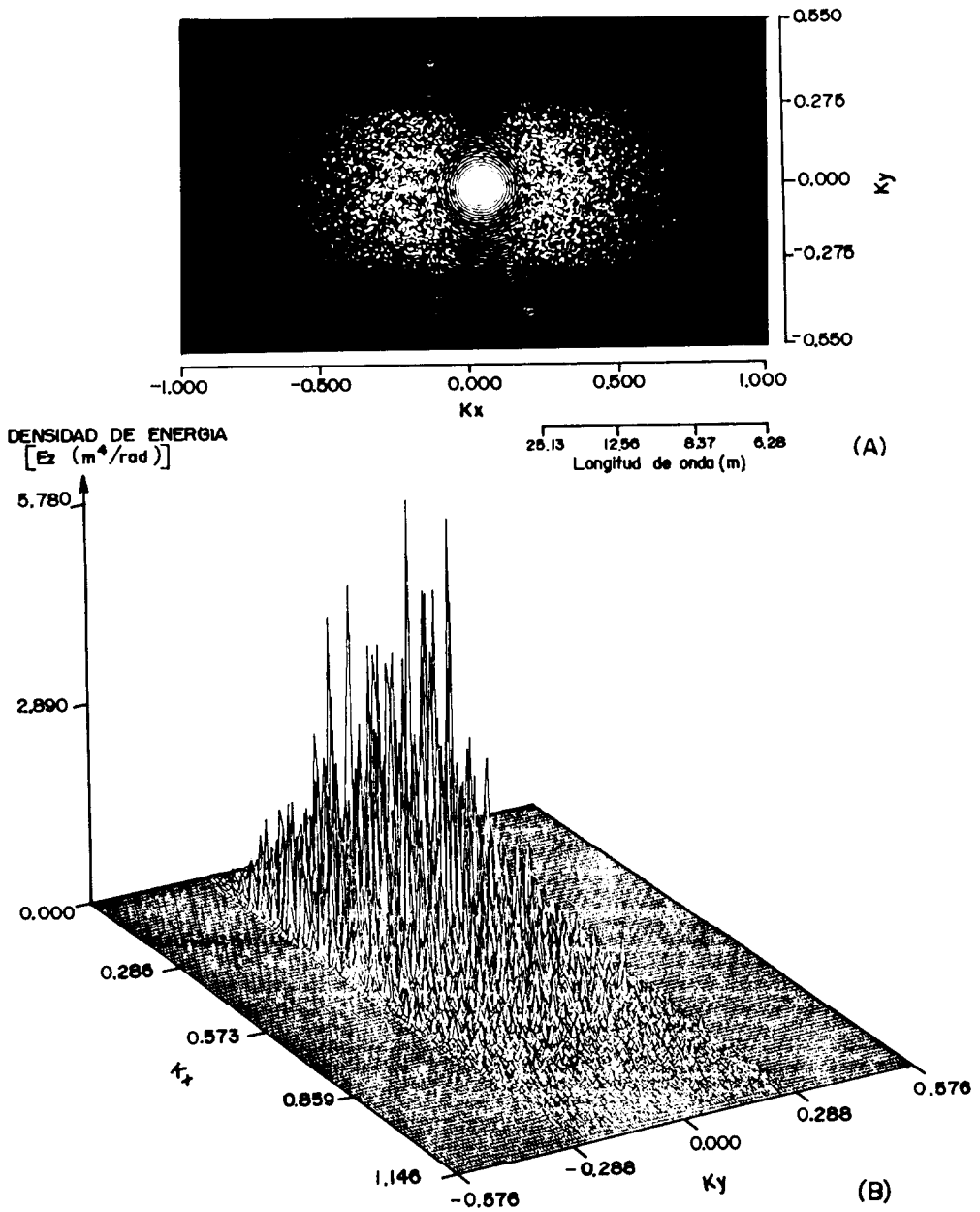


Figura 12f.(cont.)

Para comprobar que las imágenes filtradas ópticamente realmente contengan el espectro deseado, una de ellas (filtrada pasabanda en Kx) es colocada en lugar de la imagen del mar en el sistema y se obtiene su espectro óptico. El resultado de esto es mostrado en la Figura 14, observándose que dicha imagen contiene la banda deseada de frecuencia (número de onda).

DISCUSION

Las superficies se simularon con una velocidad de viento de 5 m/s por ser éste semejante al promedio real que existe en la región de Ensenada, B.C. (Alvarez-Borrego, 1983). El área de la superficie se extendió mucho más grande que en el modelo original (Caruthers y Novarini, 1971) para simular elevaciones de gran longitud de onda (570m en la dirección del viento y 872m perpendicular a él). El intervalo de frecuencias importantes del espectro teórico corresponde a períodos de olas de dos a cinco segundos. Como corresponde a las suposiciones del modelo, la distribución de alturas es muy semejante a una distribución Gaussiana.

El pixel usado para la impresión de las imágenes en el negativo fotográfico fue cuadrado de 21 micras de lado. Debido a que el intervalo de muestreo en Y es aproximadamente dos veces el de X , cada renglón escrito en X fue repetido una vez, de tal forma que el pixel quedara de 21 micras en X y 42 micras en Y ($\Delta y = 2 \Delta x$).

El tamaño en el negativo de la imagen impresa es de 4.368mm en X y 6.720mm en Y . Las imágenes fueron escritas en la dirección X y, debido a un ligero error mecánico del microdensitómetro, cada renglón en X no ajustó perfectamente con el siguiente, provocando de esta manera el rayado horizontal que se observa en la fotografía (Fig. 7).

El sistema óptico resuelve perfectamente la alta frecuencia asociada con el mencionado rayado (el punto de luz que la representa no aparece en la amplificación de la Figura 11), lo cual significa que puede resolver todas las frecuencias presentes en la imagen simulada del mar.

In order to test if the optically filtered images really do contain the desired spectrum, one of them (passband filtered in Kx) is placed instead of the image of the sea in the system and its optical spectrum is obtained. The result of this is shown in Figure 14 where it can be seen that this image contains the desired frequency band (wave numbers).

DISCUSSION

The surfaces were simulated with a wind velocity of 5 m/s since this value is similar to the real average that exists in the region of Ensenada, Baja California (Alvarez, 1983). The surface area extended more than in the original model (Caruthers and Novarini, 1971) to simulate elevations of large wavelength (570m in the direction of the wind and 872m perpendicular to it). The range of important frequencies of the theoretical spectrum corresponds to periods of waves of 2 to 5 seconds. In agreement with the assumptions of the model, the distribution of heights is very similar to a Gaussian distribution.

The pixels used for printing the images on the photographic negative were square of size 21 x 21 microns. Given that the sampling interval in Y is approximately twice that of X , each line written in X was repeated once, in such a way that the pixel remained of 21 microns in X and 42 microns in Y ($\Delta y = 2 \Delta x$).

The size of the printed image in the negative is 4.368mm in X and 6.720mm in Y . The images were written in the X direction and, due to a slight mechanical error of the microdensitometer, each X line did not fit perfectly with the following, thus causing the horizontal stripes that are seen in the photograph (Fig. 7).

The optical system resolves perfectly the high frequency associated with the stripes (the light spot which represents it does not appear in the enlargement of Figure 11), which means that it can resolve all the frequencies present in the simulated sea image.

Nine images of the same surface were written on film, in order to increase the signal of the spectrum over the background noise in the optical system. It would be adequate to

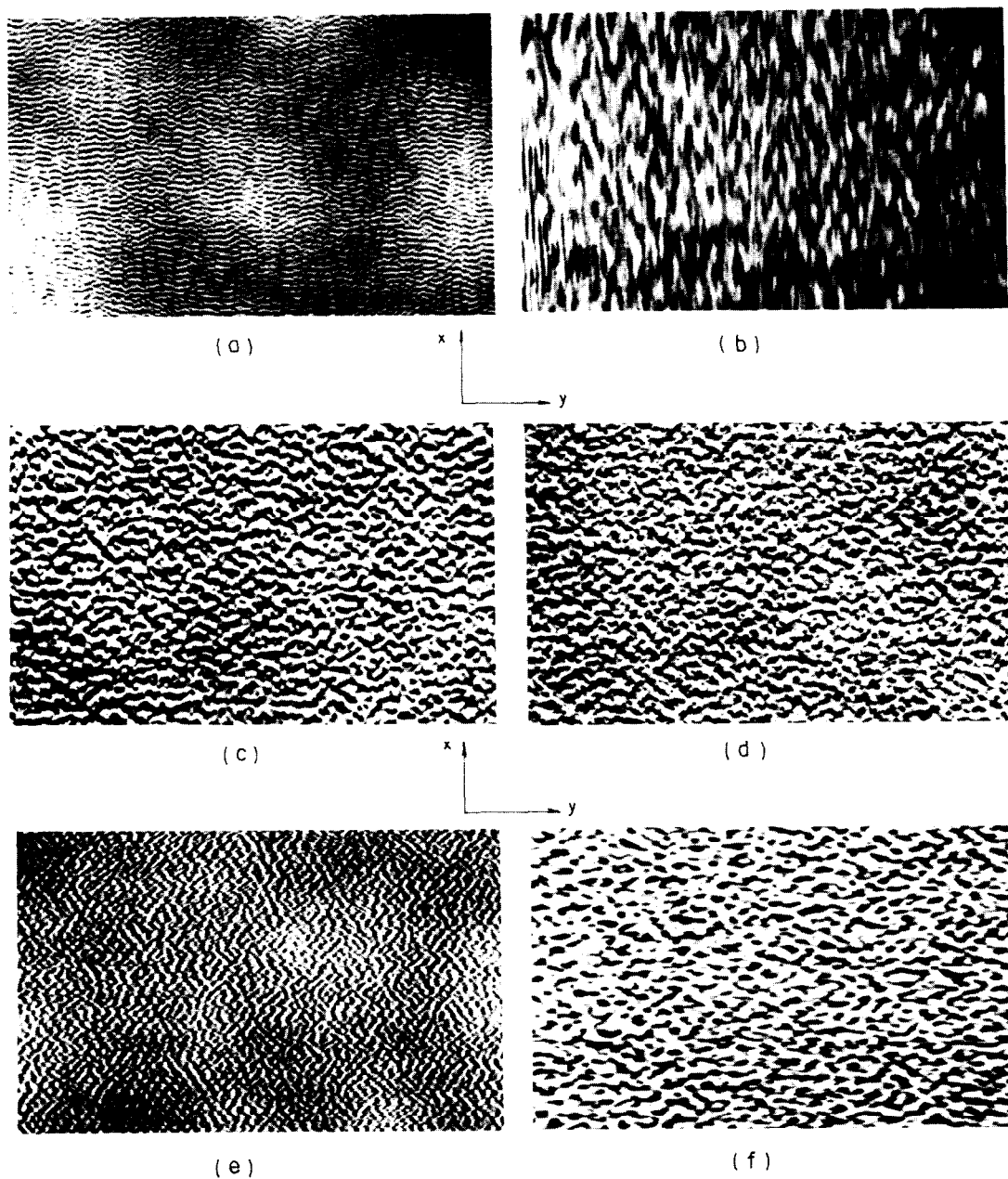


Figura 13. Imágenes de las superficies filtradas ópticamente, con las mismas bandas de frecuencias que en la Figura 10.

Figure 13. Images of the optically filtered surfaces, with the same frequency bands as in Figure 10.

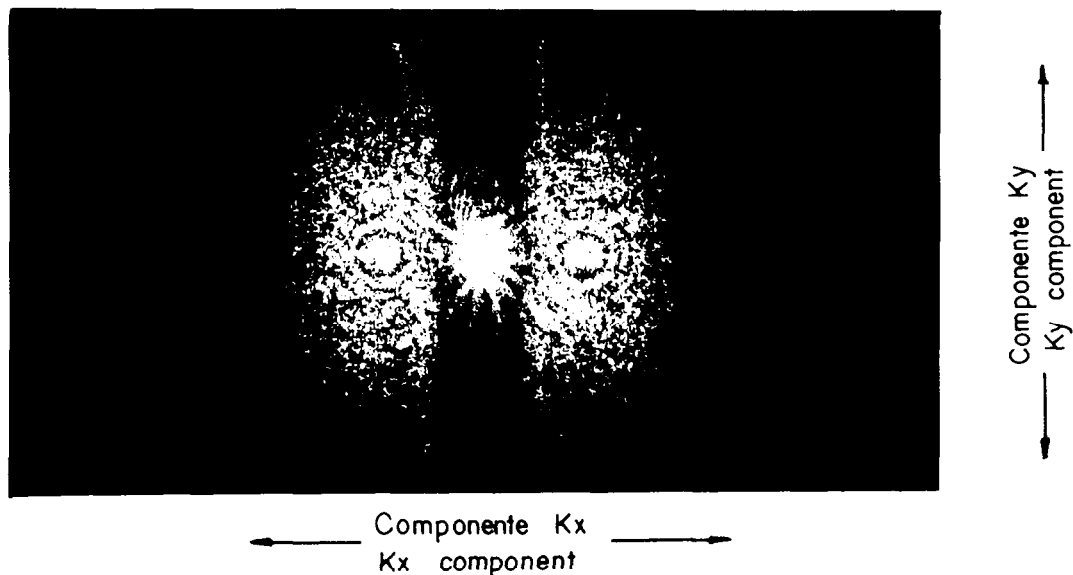


Figura 14. Espectro óptico de la imagen filtrada ópticamente, pasabanda en la dirección X .
Figure 14. Optical spectrum of the optically filtered image, passband in the X direction.

Se escribieron en película nueve imágenes juntas de la misma superficie, con la intención de incrementar la señal del espectro sobre el ruido de fondo en el sistema óptico. Sería adecuado colocar la transparencia con la imagen del mar dentro de una celda líquida (con aceite cuyo índice de refracción sea igual al del vidrio de las paredes de la celda), que incrementaría aún más la señal sobre el ruido. Esto último no se hizo en este trabajo.

Se observa en las Figuras 8 y 11 la gran similitud entre el espectro numérico y el óptico. El punto luminoso del centro del espectro óptico más los anillos a su alrededor forman el patrón de difracción de Airy. El diámetro de este orden cero de difracción (DC) está relacionado con el diámetro de la pupila de iluminación (Goodman, 1968). La línea vertical que cruza el centro del espectro está relacionada con la difracción provocada por el cuadrículado formado al unir las nueve imágenes.

El defecto mecánico del microdensitómetro y una posible falla en la calibración del mismo, provocaron bandas ruidosas en los

place the transparency with the image of the sea in a liquid cell (with oil whose refraction index would be the same to that of the glass walls of the cell), which would increase even more the signal to noise. The latter was not done in this work.

The similarity between the numerical and the optical spectra can be seen in Figures 8 and 11. The luminous point in the centre of the optical spectrum plus the rings around it form the Airy diffraction pattern. The diameter of this zero diffraction order (DC) is related to the diameter of the illumination pupil (Goodman, 1968). The vertical line which crosses the spectrum is related to the diffraction caused by the grid formed when the nine images are united.

The mechanical failure of the microdensitometer and a possible error in its calibration, created noisy bands in the optical spectra. These vertical bands get weaker as they move away from the DC in the K_x direction. It was observed that these bands tend to disappear when the diameter of the illumination pupil decreases (even though the signal of the spectrum decreases similarly).

espectros ópticos. Tales bandas verticales se atenúan alejándose del DC en la dirección K_x . Se observó que estas bandas tienden a desaparecer cuando se disminuye el diámetro de la pupila de iluminación (aunque la señal del espectro disminuye similarmente). Tales bandas son más notorias en los espectros ópticos de la Figura 12 por estar impresos en papel de alto contraste. Alvarez-Borrego y Machado (1985) no detectaron problemas de este tipo y además no se encontraron bandas semejantes en los espectros numéricos, por lo que se atribuyen a problemas asociados a la impresión con el microdensitómetro.

Las coordenadas teóricas para x_f y y_f mostradas en la Tabla I fueron verificadas cuidadosamente en la película fotográfica que contenía el espectro óptico. Esto fue más fácil de hacer en los espectros ópticos de los mares filtrados numéricamente, ya que se conocían bien las bandas de frecuencia (número de onda) presentes.

Los resultados presentados en la Figura 12 muestran que el filtrado numérico llevado a cabo fue bueno. La selección de las bandas de frecuencia fue arbitrario. Existe una gran semejanza entre los resultados ópticos y numéricos.

El filtrado de imágenes es correcto por ambos métodos, no obstante el método óptico es mucho más rápido (por ser en tiempo real) y maniobrable que el numérico. Sin embargo, este último es más preciso en cuanto al control de las frecuencias involucradas.

En el filtrado óptico es más notorio el tamaño y la dirección de las ondas presentes, al haber pérdida de resolución al atenuarse las pequeñas variaciones de intensidad de la imagen debido al suavizado que produce la convolución entre la imagen que transmite la óptica geométrica y la función de respuesta al impulso del sistema óptico (Goodman, 1968).

Cuando el oleaje se estudia a partir de fotografías aéreas, la interpretación consiste en conocer la energía y dirección asociada a las diferentes ondas presentes en el área estudiada. Este análisis espectral direccional puede hacerse por cualquiera de los métodos descritos en este trabajo.

These bands are seen better in the optical spectra of Figure 12 as they are printed on high contrast paper. Alvarez-Borrego and Machado (1985) did not detect problems of this type and they did not find similar bands in the numerical spectra. Thus, they are attributed to problems with the microdensitometer.

The theoretical coordinates for x_f and y_f shown in Table I were carefully checked on the photographic film that contained the optical spectrum. This was easier to do in the optical spectra of seas filtered numerically, since the frequency bands (wave numbers) present were well known.

The results presented in Figure 12 show that the numerical filtering done was good. The frequency bands were selected at random. There is a great similarity between the optical and numerical results.

The filtering of images is correct for both methods but the optical method is much faster (as it is in real time) and easier to handle than the numerical one. However, the latter is more precise with respect to the control of the frequencies involved.

In the optical filtering the size and direction of the waves present are more obvious, since there is a loss of resolution when the small intensity variations of the image become attenuated due to smoothing produced by the convolution between the image transmitted by the geometric optics and the response function to the impulse of the optical system (Goodman, 1968).

When waves are studied from aerial photographs, the interpretation consists in obtaining the energy and direction associated with the different waves present in the area studied. This directional spectral analysis can be done using either of the two methods described herein.

Digital image processing requires a complex technology in order to be carried out. In the first place a digitizer is needed to sample and quantify the image and convert it into a numerical array which could then be processed in a computer. The size of the pixel used and the resolution of grey tones of the instrument

El procesado digital de imágenes requiere de una compleja tecnología para ser llevada a cabo. En primer lugar es necesario un digitizador para muestrear y cuantificar la imagen y convertirla en un arreglo numérico adecuado para ser procesado en una computadora. El tamaño del pixel usado y la resolución de grises del aparato son factores determinantes de un buen procesado digital. Una discusión amplia de los efectos de muestreo, truncación, interpolación, convolución y transformada de Fourier aplicadas a imágenes digitales puede leerse en Castleman (1979).

El método de procesado óptico permite evitar los problemas asociados a la discretización de las imágenes y es mucho más rápido que el procedimiento numérico. Sin embargo, existen algunos problemas menores tales como las limitaciones de resolución de la película, atenuación de algunas frecuencias, problemas con la toma de fotografías y problemas con aberraciones presentes en el sistema óptico y resolución del mismo. Estos problemas son discutidos ampliamente en Alvarez-Borrego *et al.* (1989) y una discusión sobre los problemas asociados a la toma de fotografías reales de la superficie marina puede encontrarse en Alvarez-Borrego (1985).

CONCLUSIONES

El cálculo de los parámetros estadísticos, la distribución de elevaciones y el análisis espectral llevado a cabo nos permiten concluir que el modelo de simulación es aceptable.

La impresión de las imágenes con el microdensitómetro fue ligeramente defectuosa, debido a los problemas con el funcionamiento de éste. El ruido causado por esto puede distinguirse al no encontrarse el equivalente en los espectros numéricos.

En las superficies estudiadas en este trabajo se encontraron ondas predominantes en la dirección en que sopla el viento (dirección X). Las longitudes de onda principales son de 13 a 52m. Sin embargo, el ancho del lóbulo espectral señala la presencia de pequeñas ondas propagándose en la dirección Y . Esto último es observable en los mares que fueron filtrados dejando pasar las altas frecuencias en Y . El modelo de simulación considera tales ondas viajando a 30° a cada

are decisive factors in a good digital processing. An ample discussion on the effects of sampling, truncation, interpolation, convolution and Fourier transform applied to digital images can be found in Castleman (1979).

Problems arising when dealing with discrete images can be avoided with the optical processing method which is much faster than the numerical procedure. However, there are some minor problems such as the limitations in the resolution of the film, attenuation of some frequencies, problems associated with taking the photographs and problems with aberrations present in the optical system and its resolution. These are discussed by Alvarez-Borrego *et al.* (1989) and a discussion on the problems associated with the taking of real photographs of the sea surface can be found in Alvarez-Borrego (1985).

CONCLUSIONS

The calculation of the statistical parameters, the distribution of elevations and the spectral analysis carried out allows us to conclude that the simulation model is acceptable.

The printing of the images with the microdensitometer was slightly defective due to instrumental problems. The noise caused by this can be distinguished on not finding the equivalent of the numerical spectra.

In the surfaces studied in this work, predominant waves were found in the direction of the wind (X direction). The main wavelengths are from 13 to 52m. However, the width of the spectral lobe indicates the presence of small waves propagating in the Y direction. This can be seen in the seas that were filtered letting the high frequencies in Y pass through. The simulation model considers waves travelling at 30° on each side of the direction of the wind (due to the directional function of the model $\cos^2\theta$) (Caruthers and Novarini, 1971).

In the present work, the capacity of a coherent optical system to obtain the energy spectrum of rough images has been verified by the numerical analysis of the same surfaces. The results were very similar. This can be

lado de la dirección del viento (debido a la función de direccionalidad del modelo $\cos^2\theta$) (Caruthers y Novarini, 1971).

En este trabajo, la capacidad de un sistema óptico coherente para obtener el espectro de energía de imágenes rugosas ha sido verificado por el análisis numérico de las mismas superficies, encontrándose una muy alta semejanza en los resultados. Esto último se aprecia con más facilidad en los espectros ópticos y numéricos de las imágenes filtradas numéricamente, donde las bandas de números de onda están bien diferenciadas.

La identificación de ondas y el filtrado de imágenes es más rápido por medios ópticos que numéricos. Es de mucha ayuda contar con una pantalla de televisión donde proyectar las imágenes y observar los cambios producidos al cambiar la forma de los filtros espaciales usados. Sin embargo, el filtrado numérico es más preciso por el control que se tiene sobre las frecuencias envueltas, pero requiere de pasos intermedios, algunos de los cuales pueden estar sujetos a ligeros problemas (como en este caso la impresión con el microdensitómetro).

Un importante problema al aplicar la metodología aquí descrita a imágenes reales de la superficie del mar, es que la información es básicamente cualitativa. En el proceso de digitalización de las imágenes, la selección de valores numéricos para asociarlos a valores de transmisión óptica es generalmente arbitraria. En forma semejante, la cuantificación espectral en el plano de Fourier del sistema óptico, o la cuantificación de los valores de elevación de las superficies filtradas ópticamente, es muy difícil de asociar con valores reales de densidad de energía o de altura de oleaje. Aunado a esto, aún permanece desconocida la relación altura-pendiente para un mar real.

Una manera de calibrar los procesos anteriores sería compararlos con los resultados obtenidos a través de registros de oleaje tomados *in situ* simultáneos a la toma de fotografías aéreas del área muestreada.

Se recomienda usar nuevos modelos de simulación de superficies, donde se incluyan condiciones de iluminación que permitan hacer una mejor aproximación a la situación física

better appreciated in the optical and numerical spectra of the numerically filtered images, where the wave number bands are clearly differentiated.

The identification of waves and the filtering of images is faster by optical than numerical methods. It is very helpful to have a television screen where the images can be projected and the changes produced on changing the form of the spatial filters used can be observed. However, numerical filtering is more precise because one has control over the frequencies involved, but it requires intermediate steps, some of which can be subject to slight problems (such as in this case the printing of the microdensitometer).

An important problem on applying the methodology described herein to real images of the sea surface, is that the information is basically qualitative. In the process of digitization of the images, the choice of numerical values to be associated to optical transmission values is generally arbitrary. Likewise, the spectral quantification in the Fourier plane of the optical system or the quantification of the elevation values of the optically filtered surfaces, is very difficult to associate with real energy density values or wave height values. Furthermore, the height-slope relationship for a real sea is still unknown.

One way of calibrating these methods would be to compare them with data obtained through *in situ* measurements made simultaneously to aerial photography of the same area.

The use of new surface simulation models is recommended, where conditions of illumination are included which allow a better approximation to the real physical situation. The application of both methods of analysis to real photographs of the sea surface is also recommended, determining optimum conditions for the taking of photographs and carrying out a careful photometric study of the films used and of the optical system. The calibration should be done by comparing with data taken with a pressure sensor placed in the study area.

This type of research is at present being done, with which a better understanding of

real. Se recomienda además la aplicación de ambos métodos de análisis a fotografías reales de la superficie del mar, determinando condiciones óptimas para la toma de éstas y haciendo un cuidadoso estudio fotométrico de las películas usadas y del sistema óptico. La calibración debiera hacerse comparando con datos de un sensor de presión colocado en el área estudiada.

Actualmente se están desarrollando trabajos de investigación de este tipo, con lo cual se logrará mejorar nuestro conocimiento acerca de las complejas interacciones de las ondas de la superficie marina.

AGRADECIMIENTOS

Una versión más larga de este trabajo fue presentada por Pedro Negrete Regagnon como tesis de Oceanografía Física en la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California. Esto representa un segmento de un proyecto más grande que se desarrolla en el CICESE. Fue parcialmente financiado, bajo proyecto PCCNCNA-050000, por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.

LITERATURA CITADA

Alvarez Borrego, J. (1983). Análisis óptico de una imagen simulada de la superficie del mar. Tesis de Maestría, CICESE.

Alvarez Borrego, J. (1985). Discusión de dos métodos para analizar superficies marinas utilizando fotografías aéreas e imágenes SLAR. *Ciencias Marinas*, 11(2): 7-21.

Alvarez Borrego, J. (1987). Optical analysis of two simulated images of the sea surface. *Advances in image processing*. SPIE, Vol. 804, 31 March-3 April.

Alvarez Borrego, J. and Machado, M.A. (1985). Optical analysis of a simulated image of the sea surface. *Applied Optics*, 24(7).

Alvarez Borrego, J., Villagómez, R. y Villareal, E. (1989). Comparación de dos métodos para medir el espectro óptico de potencia. *Ciencias Marinas*, 15(2): 111-124.

Barber, N.E. (1954). Finding the direction of travel of sea waves. *Nature*, London, 154: 1048.

the complex interactions of the sea surface waves will be achieved.

ACKNOWLEDGEMENTS

A longer version of this work was presented by Pedro Negrete Regagnon as his thesis in physical oceanography in the Facultad de Ciencias Marinas of the Universidad Autónoma de Baja California. It is part of a long-term project being undertaken at the CICESE. This work was partially financed by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, project No. PCCNCNA-050000.

English translation by Christine Harris.

Caruthers, J.W. and Novarini, J.C. (1971). Numerical modeling of randomly rough surfaces with application to sea surfaces. Texas A. and M. Research Foundation. Reference 71-13-T.

Castleman, K.R. (1979). *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

Chelton, D. (1984). *Notas de un curso de series de tiempo*. Oregon State University.

Goodman, W.J. (1968). *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill Inc., USA.

Kinsman, B. (1965). *Wind Waves*. Dover Publications Inc., New York. Edición 1984.

Shulman, A.R. (1970). *Optical Data Processing*. John Wiley and Sons, Inc.

Stilwell, D. Jr. (1969). Directional energy spectra of the sea from photographs. *J. Geophys. Res.*, 74(8): 1974-1986 (April, 15).

Stilwell, D. Jr. and Pilon, R.O. (1974). Directional spectra of surface waves from photographs. *J. Geophys. Res.*, 79(9): 1277-1284 (March, 20).

Sugimori, Y. (1975). A study of the application of the holographic method to the determination of the directional spectrum of ocean waves. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 22(5): 339-350.