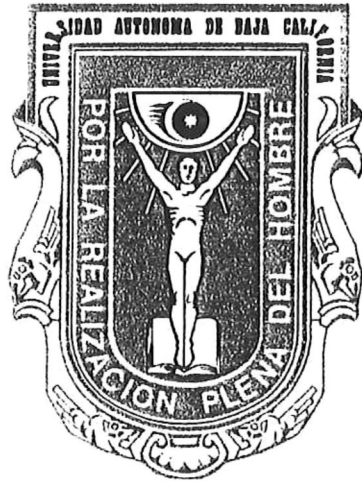


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DE
SUPERFICIES RUGOSAS ALEATORIAS
UNIDIMENSIONALES, MEDIANTE PERCEPCIÓN
REMOTA**



TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

OC. MARK MARÍN HERNÁNDEZ

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ESTADÍSTICAS DE
SUPERFICIES RUGOSAS ALEATORIAS UNIDIMENSIONALES,
MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA:

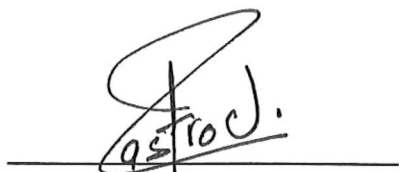
MARK MARÍN HERNÁNDEZ

APROBADA POR



PRESIDENTE DEL JURADO

Dr. JOSUÉ ÁLVAREZ BORREGO



SINODAL PROPIETARIO

M.C. RUBÉN CASTRO VALDEZ



SINODAL PROPIETARIO

M.C. ANTONIO TRUJILLO ORTIZ

RESUMEN

Para medir el oleaje se han desarrollado varios métodos como el uso de sensores de presión, imágenes de radar y fotografías aéreas entre otros. En este trabajo se presenta la utilización del modelo unidimensional descrito por Álvarez-Borrego (1993) el cual sirve para obtener información de las propiedades estadísticas de superficies rugosas a partir de imágenes remotas. El modelo utilizado considera tres procesos aleatorios involucrados: el perfil, la pendiente y la imagen de la superficie, con los cuales se pueden obtener la estadística de la superficie. Para la utilización del modelo fueron creadas superficies rugosas aleatorias con estadísticas específicas utilizando dos espectros, gaussiano y de Pierson-Moskowitz simulando oleaje en una y varias escalas, respectivamente. Se describe la técnica para crear las superficies rugosas aleatorias sobre placas de vidrio cubiertas con fotorresina, las cuales son grabadas utilizando un sistema óptico. Posteriormente se describe la técnica para obtener los patrones de brillo de las superficies rugosas mediante otro sistema óptico. Finalmente, con ayuda del modelo, se obtienen las estadísticas de segundo orden de las alturas de la superficie y de las pendientes de la superficie.

Se presentan los resultados obtenidos de las desviaciones estándar de las pendientes y de las alturas de las superficies. Los resultados muestran que es posible obtener las propiedades estadísticas de las superficies a partir de los patrones de brillo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California, la Facultad de Ciencias Marinas y al CICESE por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría.

Al proyecto externo 1884P-T9507 Titulado “Determinación de propiedades estadísticas de la superficie del mar a partir de imágenes remotas”, apoyado por el CONACyT.

Al Dr. Josué Álvarez Borrego por dirigir, apoyar y detallar este trabajo hasta su culminación, el tiempo invertido y su amistad.

Al M.C. Rubén Castro Valdez y al M.C. Antonio Trujillo Ortiz por aceptar ser mis sinodales, por las revisiones y sugerencias hechas al trabajo.

A mis Amigos: Temo, Churro, X-men, Foco, Bolo, Pollo, Ricky, Erik, Adrian, Rodrigo, Ligeia, Miguel y Gerardo.

A mis compañeros de cubo: Rosa, Cesar, Olga y Ernestina.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. OBJETIVO GENERAL.....	8
III.1. Objetivos particulares.....	8
IV. METODOLOGÍA.....	9
IV.1. Descripción de la situación física.....	9
IV.2. Fabricación de las superficies.....	14
IV.2.1. Obtención numérica de las superficies con estadísticas conocidas... 14	14
IV.2.2. Grabado de las superficies numéricas en una película fotográfica... 17	17
IV.2.3. Depósitos de fotorresina sobre sustratos de vidrio..... 18	18
IV.2.4. Grabado de la superficie en la fotorresina..... 20	20
IV.2.5. Revelado de los sustratos..... 23	23
IV.2.6. Aluminización de la fotorresina..... 23	23
IV.3. Obtención de patrones de brillo..... 25	25
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	27
V.1. Generación de las superficies..... 27	27
V.1.1. Espectro Gaussiano..... 27	27
V.1.2. Espectro Pierson-Moskowitz..... 42	42
V.2. Obtención de las estadísticas de las superficies..... 54	54
VI. CONCLUSIONES.....	69
VII. LITERATURA CITADA.....	70

Lista de figuras

Figura 1.	Esquema de la situación física.....	10
Figura 2.	Diagrama de la relaciones estadísticas de los tres procesos aleatorios involucrados.....	13
Figura 3.	Espesores de la fotorresina empleada en el experimento para diferentes velocidades.....	19
Figura 4.	Sistema rotatorio para realizar los depósitos.....	20
Figura 5.	Sistema óptico para la fabricación de la superficie.....	22
Figura 6.	Sustratos con fotorresina (izquierda) y con cubierta de aluminio (derecha).....	23
Figura 7.	Sistema óptico para la obtención de imágenes.....	26
Figura 8.	Vista tridimensional de la superficie.....	28
Figura 9.	Vista aérea de la superficie generada numéricamente.....	29
Figura 10.	Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.....	31
Figura 11.	Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.....	32
Figura 12.	Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.....	33
Figura 13.	Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).....	35
Figura 14.	Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).....	36

Lista de Figuras (continuación)

Figura 15.	Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).....	37
Figura 16.	Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.....	39
Figura 17.	Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.....	40
Figura 18.	Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.....	41
Figura 19.	Alturas de la superficie: a) generada numéricamente, b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.....	43
Figura 20.	Alturas de la superficie: a) generada numéricamente, b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.....	44
Figura 21.	Alturas de la superficie: a) generada numéricamente, b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.....	45
Figura 22.	Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).....	47
Figura 23.	Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).....	48
Figura 24.	Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).....	49

Lista de Figuras (continuación)

Figura 25.	Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.....	51
Figura 26.	Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.....	52
Figura 27.	Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.....	53
Figura 28.	Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra desviación estándar de pendientes y desviación estándar de alturas de la superficie.....	60
Figura 29.	Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra desviación estándar de pendientes y desviación estándar de alturas de la superficie.....	61
Figura 30.	Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra desviación estándar de pendientes y desviación estándar de alturas de la superficie.....	62
Figura 31.	Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra desviación estándar de pendientes y desviación estándar de alturas de la superficie.....	65
Figura 32.	Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra desviación estándar de pendientes y desviación estándar de alturas de la superficie.....	66
Figura 33.	Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra desviación estándar de pendientes y desviación estándar de alturas de la superficie.....	67

Lista de Tablas

Tabla I.	Longitudes de correlación de alturas de superficies con espectro Gaussiano.....	57
Tabla II.	Desviaciones estándar de las superficies con espectro Gaussiano.....	58
Tabla III.	Desviaciones estándar de las superficies con espectro Pierson-Moskowitz.....	63

I. INTRODUCCIÓN

El oleaje es uno de los procesos físicos más importantes dentro de la oceanografía, el cual es producido en su mayoría por el esfuerzo del viento que actúa sobre una área determinada. El oleaje juega un papel importante en la zona costera, ya que es el responsable de la modificación de la línea de costa, erosionando o depositando material sobre ella, de ahí la relevancia de entender su comportamiento.

Para medir el oleaje se han desarrollado varios métodos como el uso de sensores de presión, imágenes de radar y fotografías aéreas entre otros. Estos estudios nos ayudan a entender los mecanismos de generación de las olas, la propagación y predicción de las mismas y los intercambios de energía entre masas de agua, también sirven de apoyo a estudios para la construcción de puertos y protecciones costeras.

El uso de métodos ópticos para el estudio de la superficie marina se inició a fines del siglo pasado. La irradiancia de la luz reflejada sobre la superficie del mar fue el primer parámetro óptico que se midió. Después se comenzó a medir la irradiancia espectral a varias profundidades, la cual, aunada a otras variables oceanográficas, ayuda a determinar la productividad orgánica primaria del océano. A mediados de este siglo se empezaron a utilizar las imágenes de radar y las fotografías aéreas las cuales presentan ciertas ventajas sobre otros métodos, por ejemplo: se pueden hacer mediciones en escala temporal y/o espacial, se pueden usar tanto para estudios de oleaje en aguas profundas como en someras, el procesamiento de los datos es más rápido y sencillo y tienen un menor costo en comparación con los otros métodos.

En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento de la reflexión de la luz en superficies rugosas unidimensionales de una y varias escalas utilizando la metodología desarrollada por Álvarez-Borrego (1993). Para calcular algunas propiedades estadísticas de las superficies a partir de las relaciones entre las intensidades de las reflexiones especulares de la superficie, las pendientes de la superficie y sus alturas.

II. ANTECEDENTES

El uso de fotografías aéreas para el estudio de las características de la superficie marina empezó con el desarrollo de sistemas fotográficos capaces de captar las olas. Estos estudios comenzaron a principios de los años cincuenta con Barber (1954), quien fue el primero en usar un método óptico para el análisis del espectro direccional de la superficie marina llamado método holográfico. Este método utiliza un sistema óptico para obtener un espectro de dos dimensiones de las olas a partir de brillos y sombras en la película. Los espectros obtenidos sirvieron para determinar la dirección del oleaje.

Por otro lado, Cox y Munk (1954a, 1954b), también en ese mismo año, publicaron un método para calcular estadísticas de la distribución de las pendientes a partir de los patrones de brillo. Su método consistió primeramente en interpretar geoméricamente para cada punto la pendiente que debería tener éste para reflejar la luz del sol hacia el observador y después interpretar el promedio de los brillos de la superficie marina en la vecindad de este punto en términos de la frecuencia con la que esta pendiente particular ocurre. Dentro del experimento se tomaron fotografías aéreas y se midió la velocidad del viento al mismo tiempo. En una primera aproximación, encontraron que las pendientes tienen una distribución Gaussiana e isotrópica con respecto a la dirección; así como un incremento lineal en las medias cuadradas de las pendientes con la velocidad del viento. Tiempo después, Cox (1958) realizó mediciones de pendientes en olas capilares encontrando un comportamiento bastante complicado de la variancia de las pendientes en función de la velocidad del viento.

Posteriormente, Stitwell (1969) deriva una teoría lineal para el análisis espectral de las olas a partir del método descrito por Barber (1954). Realiza estudios en un sistema óptico para ver la relación que existe entre diferentes amplitudes de la luz después de pasar a través de este sistema, estableciendo una correspondencia entre los parámetros del mar y la densidad óptica que se obtiene sobre la película fotográfica. Concluyendo que la técnica puede ser aplicada para obtener el espectro de energía con una ambigüedad de 180° , aunque este problema puede ser resuelto mediante la observación de la superficie marina y del viento a la hora de tomar las fotografías. Además, la altitud de la cámara así como el campo de visión de la lente nos dictamina la mayor longitud de onda para la cual el espectro estimado es confiable, mientras que la resolución que tengamos en la película fotográfica nos va a restringir la menor longitud de onda que el método puede determinar.

Stilwell y Pilon (1994) publican una nueva metodología en la cual el espectro de las olas es deducido a partir de fotografías oblicuas. Sin embargo, este método desarrollado incluye numerosas suposiciones que influyen en la aplicabilidad de la técnica y la precisión de los espectros estimados. Entre las suposiciones hechas se consideran las pendientes muy pequeñas de las olas, la iluminación homogénea del cielo y un nivel insignificante de bruma.

Sugimori (1974), utiliza el método holográfico de Barber (1954) para obtener espectros de la superficie con fotografías tomadas verticalmente. Encuentra que el error instrumental en el espectro de potencia introducido en el análisis es cerca del 13%, y la resolución del método esta limitada a 30 líneas por milímetro, debido al movimiento de

la cámara por la vibración del avión. Menciona que la imagen de la superficie marina también puede usarse para conocer las pendientes de la superficie.

Kasevich (1975) extiende el análisis de primer orden del esparcimiento de la luz en la superficie marina de Stilwell (1969), para entender el mecanismo de transferencia del perfil de las olas a la imagen fotográfica. Cambia el análisis a uno de segundo orden y lo evalúa numéricamente para cielos claros y para cielos uniformemente nublados, encontrando que la luz reflejada a la lente de la cámara aérea está relacionada explícitamente con la orientación de la cámara, la altura, la distribución de la irradiancia, las componentes de las pendientes y la reflectividad de Fresnel de la superficie marina. Concluye que gracias a la teoría de segundo orden puede ser calculado el ángulo y la altura apropiada de la cámara, si el ángulo del sol y la máxima pendiente son conocidos. Menciona además que esta teoría puede usarse con fotografías y determinar el espectro direccional por medio del análisis óptico de Fourier.

Plass *et al.* (1978) calculan intensidades a tiempos promedios para patrones de brillo de sol en superficies marinas con viento. En este estudio se utiliza la distribución de pendientes de las olas dada por Cox y Munk (1954); también se toma en cuenta la curvatura del planeta. Se hicieron gráficas de intensidades para varios ángulos de elevación, altitud del observador y velocidad del viento, encontrando que la velocidad del viento y el ángulo de elevación influyen marcadamente la estructura del patrón de brillo, así como la variación de altura del observador.

Peppers y Ostrem (1978) describen una técnica general no lineal para determinar pendientes de olas a partir de fotografías del mar que es iluminada con luz solar difusa.

Esta técnica fue evaluada usando modelos matemáticos para varias irradiancias. A diferencia de la técnica desarrollada por Stilwell (1969) y Kasevich (1975), la de estos autores es mejor, ya que puede ser aplicada en un intervalo mayor de condiciones del cielo, así como para ángulos de pendientes mayores.

Álvarez-Borrego y Machado (1985) crean superficies marinas simuladas con el espectro de potencia de Pierson-Neuman. Los datos numéricos del modelo fueron expresados como densidades, grabándolas en una película fotográfica. Después utilizaron un sistema óptico coherente para obtener el espectro dimensional. Comparando lo obtenido con el espectro teórico Pierson-Neuman, obtuvieron la autocorrelación de la superficie marina simulada donde se observó un alto grado de correlación en dirección perpendicular al viento. Álvarez-Borrego (1985) presenta una discusión entre dos métodos para analizar la superficie del mar a partir de fotografías aéreas e imágenes SLAR, donde presenta las ventajas y desventajas de los dos métodos. Meillon-Menchaca (1995) aplica la técnica para obtener el espectro direccional del oleaje en una área determinada. Este estudio se realizó en la Bahía de Todos Santos, B.C., obteniendo como resultados la dirección predominante del oleaje y las longitudes de onda más frecuentes dentro de la bahía. Estos resultados concuerdan con algunos datos estadísticos que se tenían de la zona estudiada.

Álvarez-Borrego (1993) considera el obtener las propiedades estadísticas de superficies rugosas aleatorias. En este trabajo se aplica una función llamada “función de brillo”, utilizada para encontrar la relación entre la función de autocorrelación de las variaciones de la intensidad del patrón de brillo de la imagen con la función de

autocorrelación de las alturas de la superficie. Presenta ejemplos numéricos que muestran la validez del modelo para el caso de superficies uni y bidimensionales. Además, para el caso bidimensional isotrópico, presenta resultados experimentales, demostrando la aplicabilidad del modelo.

Marín-Hernández (1999), utiliza el mismo método desarrollado por Álvarez-Borrego (1993), pero utilizando una función de brillo diferente. En este caso se utiliza una función de brillo de forma Gaussiana en vez de la tipo rect o circ propuesta. Se encontró que los valores de variancia y correlación son muy pobres en comparación con las otras funciones de brillo, teniéndose problemas cuando se desea aplicar la técnica a situaciones físicas reales.

III. OBJETIVO GENERAL

- Obtención de parámetros estadísticos de segundo orden para superficies rugosas aleatorias.

III.1. OBJETIVOS PARTICULARES

- Creación de superficies rugosas con espectro Gaussiano.
- Creación de superficies rugosas con espectro Pierson-Moskowitz.
- Obtención de la desviación estándar de las pendientes y de las alturas de una superficie rugosa aleatoria a partir del patrón de brillo.

IV. METODOLOGÍA

IV.1. Descripción de la situación física

La situación física se muestra en la figura 1. La superficie es iluminada con una fuente gaussiana e incoherente y con una extensión angular σ con longitud de onda $\bar{\lambda}$. Su imagen es formada en D por un sistema óptico libre de aberración. En esta figura θ_s , representa el ángulo de incidencia que se define como el ángulo entre la dirección de incidencia de la luz y la normal a la superficie promedio; θ_d , representa el ángulo promedio que subtende el sistema óptico de detección con la normal a la superficie promedio y β es el diámetro aparente de la fuente. La luz que proviene de la fuente llega a la superficie y ésta es reflejada sólo una vez y dependiendo de las pendientes que tenga la superficie, la luz reflejada contribuirá o no a la imagen de la superficie. La imagen obtenida consistirá de regiones brillantes y oscuras que llamaremos “patrón de brillo”. Los patrones de brillo obtenidos en la imagen contienen información estadística de la superficie (Álvarez-Borrego, 1993). El análisis involucra tres procesos aleatorios: el perfil de la superficie, las pendientes de la superficie y la imagen.

Para obtener la información de la estadística de las variaciones de altura de la superficie rugosa, primero se definen ciertas variables. Las variaciones de altura están dadas por la función $\zeta(x)$, que en todos los casos representará un proceso aleatorio Gaussiano con una función de correlación $\sigma_\zeta^2 C_\zeta(\tau) = \langle \zeta(x + \tau)\zeta(x) \rangle$ y una variancia

σ_ζ^2 . La pendiente de la superficie la representaremos como $\Pi(x)$, con su función de correlación $\sigma_\Pi^2 C_\Pi = \langle \Pi(x+\tau)\Pi(x) \rangle$ y su variancia σ_Π^2 .

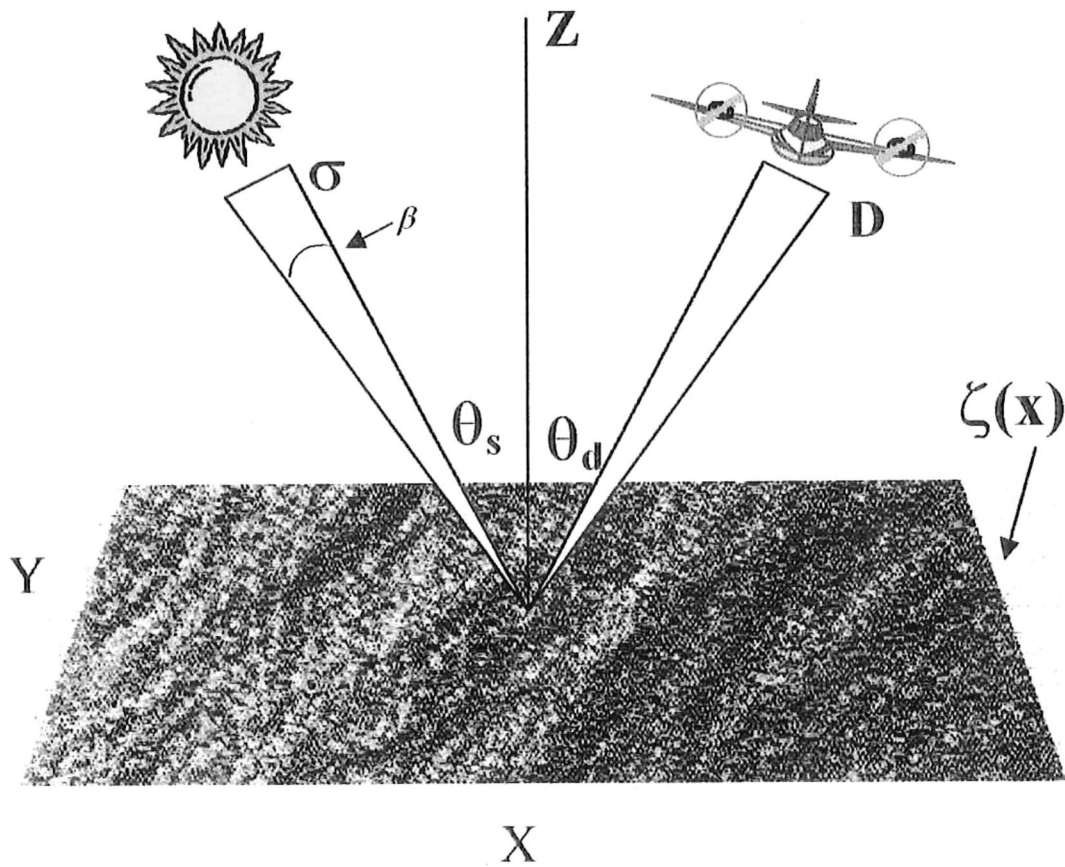


Figura 1. Esquema de la situación física.

La función de correlación de las alturas de la superficie $C_\zeta(\tau)$ está relacionada con la función de correlación de las pendientes $C_\Pi(\tau)$, de acuerdo a Papoulis (1981):

$$\sigma_\zeta^2 C_\Pi(\tau) = -\frac{d^2 \sigma_\zeta^2 C_\zeta(\tau)}{d\tau^2}. \quad (1)$$

Por otro lado, las pendientes de la superficie $\Pi(x)$ son un proceso aleatorio Gaussiano, por lo que la función de densidad de probabilidad conjunta de las pendientes para dos distintas posiciones x_1 y x_2 está dada, según Daveport y Root (1958) como:

$$p(\Pi_1, \Pi_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_\Pi^2[1 - C_\Pi^2(\tau)]^{1/2}} \exp\left[-\frac{\Pi_1^2 + \Pi_2^2 - 2C_\Pi(\tau)\Pi_1\Pi_2}{2\sigma_\Pi^2[1 - C_\Pi^2(\tau)]}\right], \quad (2)$$

donde, Π_1 y Π_2 corresponden a $\Pi(x_1)$ y $\Pi(x_2)$ respectivamente y $\tau = x_1 - x_2$.

La imagen $i(x)$, formada en el plano D (Fig.1), es un proceso aleatorio no estacionario determinado por $\Pi(x)$ y la geometría del problema. El proceso $i(x)$ no es estacionario, a pesar de que los procesos $\zeta(x)$ y $\Pi(x)$ sean estacionarios, debido a que las propiedades estadísticas de $i(x)$ son función de su posición en x .

Sin embargo, esta no estacionaridad se puede evitar si consideramos un plano de observación lejano y restringimos el campo de visión. Para este caso y sólo con las

consideraciones anteriores, tendremos la función de correlación del proceso $i(x)$ asociado a la imagen como $\sigma_i^2 C_i(\tau) = \langle i(x+\tau)i(x) \rangle$ y variancia σ_i^2 .

El patrón de brillo, regiones brillantes y oscuras que forman la imagen, está determinado por la superficie misma y por la “función de brillo”, que se calcula de las posiciones y los diámetros aparentes de la fuente y el detector. Dicha función opera sobre las pendientes y la definiremos como $B(\Pi(x))$ y con la que podemos encontrar la ubicación espacial y la extensión de los brillos. Así la autocorrelación de la imagen $\sigma_\zeta^2 C_i(\tau)$, puede escribirse como:

$$\sigma_\zeta^2 C_i = \langle B(\Pi_1)B(\Pi_2) \rangle \quad (3)$$

o

$$\sigma_\zeta^2 C_i(\tau) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B(\Pi_1)B(\Pi_2)}{2\pi\sigma_\Pi^2[1-C_\Pi^2(\tau)]^{1/2}} \exp\left[-\frac{\Pi_1^2 + \Pi_2^2 - 2C_\Pi(\tau)\Pi_1\Pi_2}{2\sigma_\Pi^2[1-C_\Pi^2(\tau)]}\right] d\Pi_1 d\Pi_2. \quad (4)$$

Con la evaluación de esta integral se obtiene la relación entre los valores que adquieren las funciones de correlación $\sigma_\zeta^2 C_i(\tau)$ y $\sigma_\zeta^2 C_\Pi(\tau)$.

En la figura 2 se muestran las relaciones estadísticas de los tres procesos aleatorios involucrados: el perfil de la superficie, las pendientes de la superficie y la imagen que está formada por los patrones de brillo.

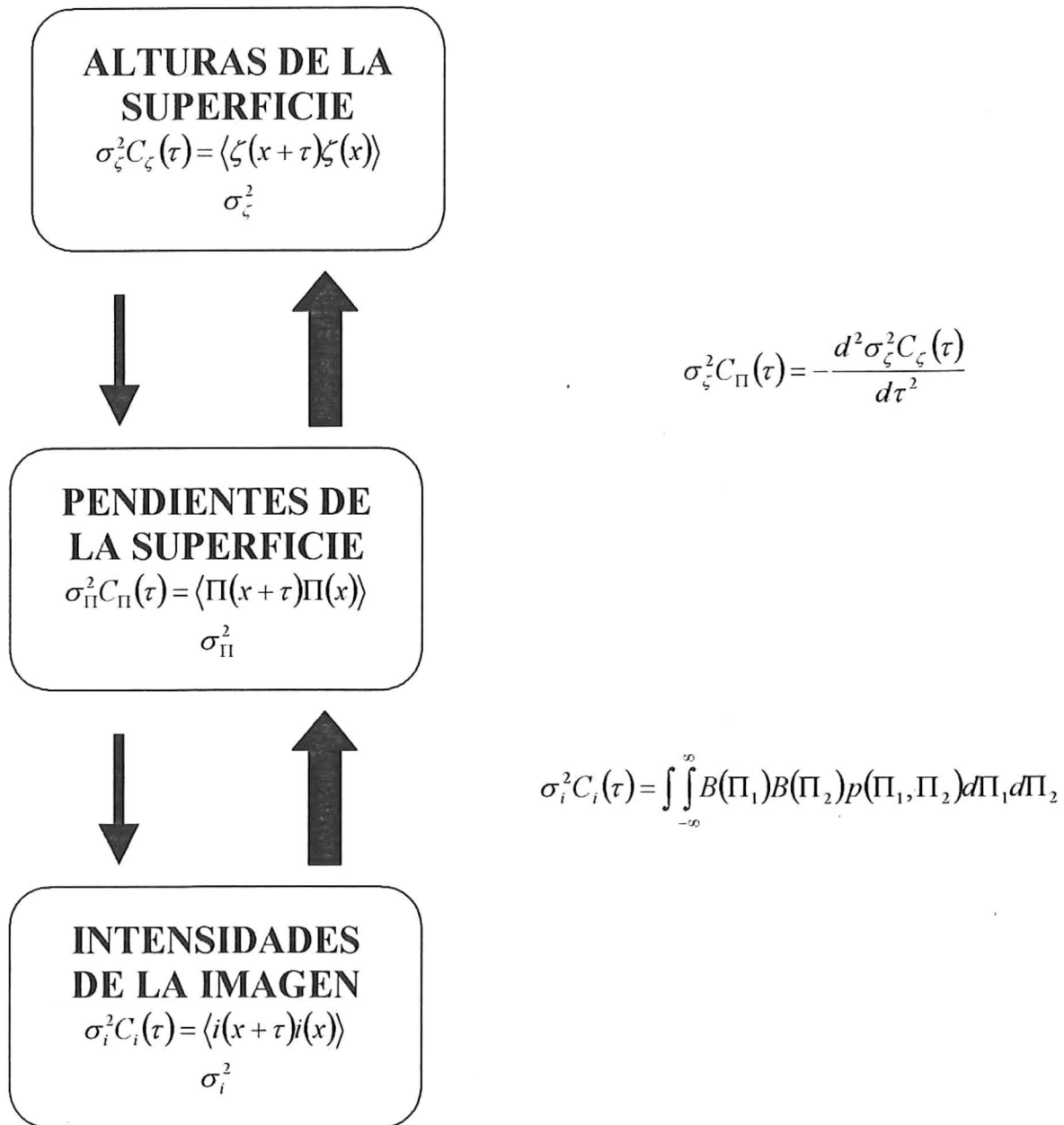


Figura 2. Diagrama de las relaciones estadísticas de los tres procesos aleatorios involucrados.

IV.2. Fabricación de las superficies

En la fabricación de las superficies rugosas aleatorias intervienen varios procesos: a) obtención numérica de las superficies con estadísticas conocidas; b) grabado de las superficies numéricas en una película fotográfica mediante la sustitución de los valores de altura por valores de grises de 0 a 255 dentro del intervalo lineal de la película; c) realizar depósitos de fotorresina sobre sustratos de vidrio; d) grabado de la superficie aleatoria contenida en la película en la fotorresina mediante un sistema óptico 4F; e) revelado de los sustratos con la fotorresina y f) aluminización de la fotorresina para obtener mayor reflectabilidad de la luz.

IV.2.1. Obtención numérica de las superficies con estadísticas conocidas

Para la obtención numérica de las superficies con estadísticas conocidas se utilizó la técnica de Montecarlo (Thorsos, 1988). Se generaron superficies unidimensionales de una y varias escalas con espectro Gaussiano y con espectro Pierson-Moskowitz, respectivamente, de los que se obtienen series de datos de altura y de pendientes.

Para el caso unidimensional de una sola escala se utilizó un espectro Gaussiano que puede escribirse como:

$$S(K_x) = l\sqrt{\pi}\sigma_\zeta^2 \exp\left[-\frac{K_x^2 l^2}{4}\right], \quad (5)$$

donde el parámetro l es la longitud de correlación, K_x es el numero de onda y S es la densidad espectral de potencia. Su función de correlación está dada por:

$$C_{\zeta}(\tau) = \sigma_{\zeta}^2 \exp\left[-\frac{\tau^2}{l^2}\right], \quad (6)$$

donde τ es la variable que denota el corrimiento entre dos puntos de la superficie.

La función de densidad espectral, así como su función de correlación están relacionadas mediante las dos siguientes ecuaciones:

$$S(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x) \exp[-iux] dx, \quad (7)$$

y

$$C(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(u) \exp[iux] du. \quad (8)$$

Donde además podemos definir la función de densidad espectral $S(u)$ como:

$$S(u) = \langle |\hat{\zeta}(u)|^2 \rangle, \quad (9)$$

donde,

$$\hat{\zeta}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} \zeta(x) \exp[-iux] dx. \quad (10)$$

Para el caso unidimensional de varias escalas, la generación numérica de la superficie fue creada con el espectro de Pierson-Moskowitz (Pierson y Moskowitz, 1964) que está dado por:

$$S(w) = \frac{a_0 g^2}{w^5} \exp \left[-b_0 \left(\frac{g}{wU} \right)^4 \right]. \quad (11)$$

Donde $a_0 = 8.10 \times 10^{-3}$, $b_0 = 0.74$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, U es la velocidad del viento definida a 19.5 m sobre la superficie promedio y w representa la frecuencia de las olas.

Para la generación de la superficie rugosa se debe expresar el espectro en función de su número de onda K , escribiendo la ecuación anterior a partir de una expresión bidimensional del espectro en forma direccional como:

$$A^2(w, \theta) = \frac{1}{\pi} S(w) \cos^2 \theta \quad \text{para } w_1 < w < \infty \text{ y } -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad (12)$$

donde w_1 representa el límite inferior de las frecuencias, que depende del tiempo de duración del viento sobre cierta área del mar. El espectro definido por la ecuación puede ser escrito como una función de las componentes (K_x , K_y) del número de onda en el siguiente cambio de variables

$$w^2 = gK, \quad K = (K_x^2 + K_y^2)^{1/2}, \quad \theta = \tan^{-1}(K_y / K_x), \quad (13)$$

la primera expresión que está del lado izquierdo es una relación de dispersión obtenida de la teoría lineal del oleaje para aguas profundas, relacionando la frecuencia temporal con la frecuencia espacial.

El jacobiano de la transformación esta dado por

$$J[(w, \theta)/(K_x, K_y)] = [g^{1/2} / 2] K^{-3/2}, \quad (14)$$

quedando la expresión del espectro como:

$$S(K) = J[(w, \theta)/(K_x, K_y)] A^2(w, \theta), \quad (15)$$

o

$$S(K) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{a_0}{2K^4} \right] \exp \left[-\frac{b_0 g^2}{K^2 U^4} \right] \cos^2 \theta. \quad (16)$$

VI.2.2. Grabado de las superficies numéricas en una película fotográfica

Una vez generadas numéricamente las superficies rugosas a partir de los espectros Gaussiano y Pierson-Moskowitz, se obtuvieron valores de alturas de la superficie las cuales se graficaron de manera que se obtuviera una imagen de vista aérea de la superficie generada. Posteriormente, se guardaron las imágenes de la superficies en archivos en formato JPG y luego se grabaron en una película fotográfica con la ayuda de un grabador de película (Montage) el cual graba la imagen obtenida en la computadora sobre película fotográfica de 35 mm. Se utilizó película blanco y negro (T-MAX 100).

El grabador de película graba con una resolución de 4096 x 2731 píxeles sobre el área correspondiente a un cuadro de película (36x24mm). Una vez grabadas las imágenes en la película fotográfica se procedió al revelado siguiendo la técnica para revelado a blanco y negro con revelador D76.

IV.2.3. Depósitos de fotorresina sobre sustratos de vidrio

Para los depósitos de la fotorresina en sustratos de vidrio es importante que el sustrato (cristal circular plano y completamente liso, de 2 pulgadas de diámetro por 1/8 pulgadas de espesor) esté preparado, es decir, que no contenga partículas de polvo. Una vez tenido esto, se procede a realizar el depósito de fotorresina. Se trabaja bajo luz amarilla, ya que la fotorresina es sensible a la luz blanca que contiene la longitud de onda “violeta”. Se utilizó una fotorresina marca Microposit 1818 (Fig.3).

Una vez que el sustrato está limpio, el proceso de depositación de la capa de fotorresina es el siguiente:

Se fija el sustrato a un sistema rotatorio (Fig.4), que al girar, expande de manera uniforme la fotorresina por sobre toda la superficie del sustrato. El sistema rotatorio se hace funcionar a 2,000 rpm con una velocidad de 50 cms^{-1} , durante aproximadamente 20 segundos, tiempo en el cual se va depositando lentamente la fotorresina con una jeringa, procurando que el depósito se realice justo en el centro del sustrato para obtener una capa uniforme. Una vez que el sistema rotatorio deje de girar, se retira el sustrato cubierto con fotorresina evitando lo mas posible el contacto con el ambiente, protegiéndolo de partículas diminutas de polvo. Se deja secar y posteriormente se procede al horneado, pudiendo realizarse en una mufla convencional (horno de

laboratorio), cuidando de mantener una temperatura constante de 45°C durante 15 min. Dependiendo del grosor de la capa de fotorresina que se requiera, se pueden realizar mas depósitos encima repitiendo los pasos anteriores.

Antes de pasar al proceso de exposición los sustratos están fríos, almacenados y etiquetados perfectamente.

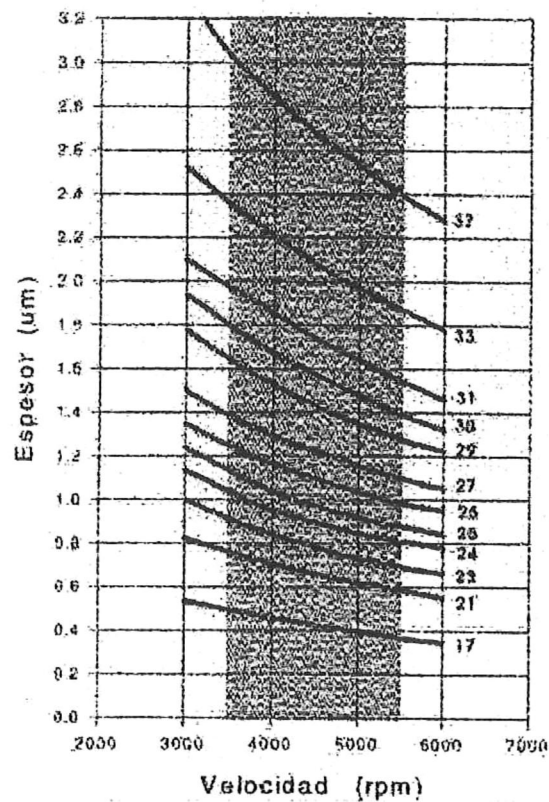


Figura 3. Espesores de la fotorresina empleada en el experimento para diferentes velocidades.

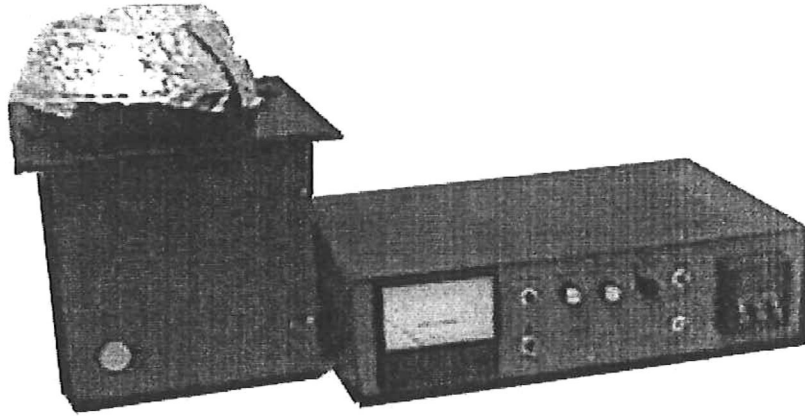


Figura 4. Sistema rotatorio para realizar los depósitos.

IV.2.4. Grabado de la superficie en la fotorresina.

La técnica de exposición utilizada en este trabajo para la realización de las superficies rugosas es una variación de una técnica descrita por Gray (1978), la variación consistió en el cambio del sistema óptico para la obtención de la superficie. La técnica consiste en grabar un relieve sobre una placa de vidrio cubierta con fotorresina al hacer incidir sobre ésta un haz de luz. La fotorresina es un material sensible a la luz azul o ultravioleta, que trabaja similar a una película fotográfica, por lo que al ser revelada se obtiene un relieve sobre la placa.

El sistema óptico 4F (Fig.5) funciona de la siguiente manera: un haz de luz proveniente de un láser de He-Cd (Liconix 4240 con longitud de onda de $0.442 \mu\text{m}$) pasa a través de un filtro espacial que actúa limpiando y expandiendo el haz de luz, después sobre una lente colimadora (L1), que tiene la función de transformar las ondas esféricas en ondas planas, pasando después sobre la película fotográfica, continuando con las lente L2 que hace la transformada de Fourier de la imagen y la lente L3 que hace transformada inversa de Fourier, para finalmente incidir sobre la placa cubierta con fotorresina. Este sistema óptico 4F proyecta la imagen de la película fotográfica sobre la placa de fotorresina con una escala de 1:1.

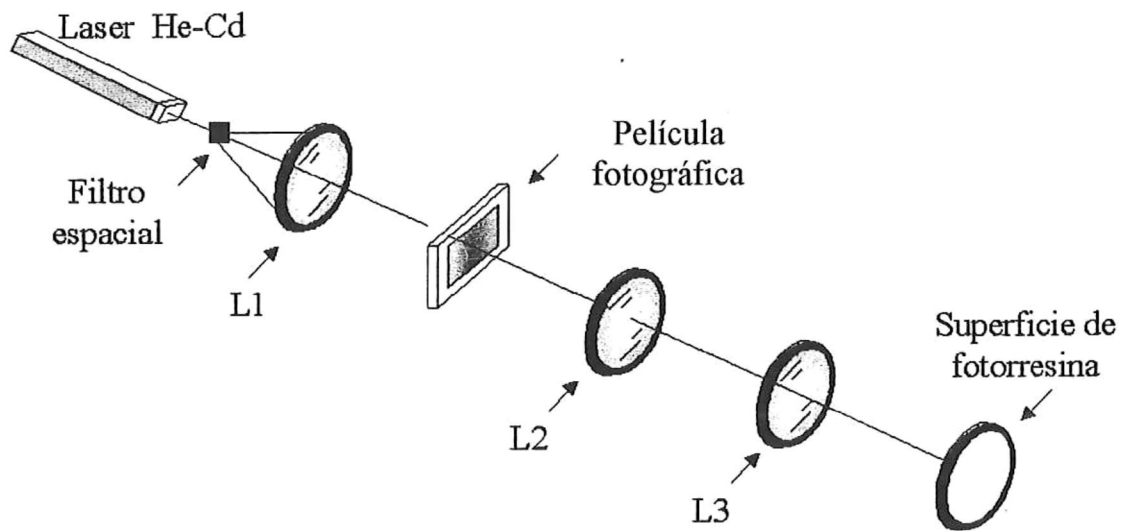


Figura 5. Sistema óptico para la fabricación de la superficie.

IV.2.5. Revelado de los sustratos.

Una vez expuestas los sustratos con fotorresina en el sistema óptico, se procede a su revelado colocando los sustratos en un recipiente con revelador Microposit MF-319, manteniendo el sustrato con la capa de fotorresina hacia arriba se agita el recipiente suavemente por espacio de tres minutos, seguido de un enjuague bajo un chorro de agua constante, mientras se les quita la capa de pintura negra con una navaja, después se introducen en agua destilada y se dejan reposar durante tres minutos para su fijación, seguido de su secado con aire a temperatura media.

IV.2.6. Aluminización de la fotorresina.

Una vez que se tienen las placas reveladas se procede a aluminizarlas, se aplica un depósito de una película delgada de aluminio, utilizando la técnica de evaporación descrita por Salazar M. (1989) en un sistema Edwards 306. Esto con el fin de que la superficie grabada tenga reflectancia (Fig.6).

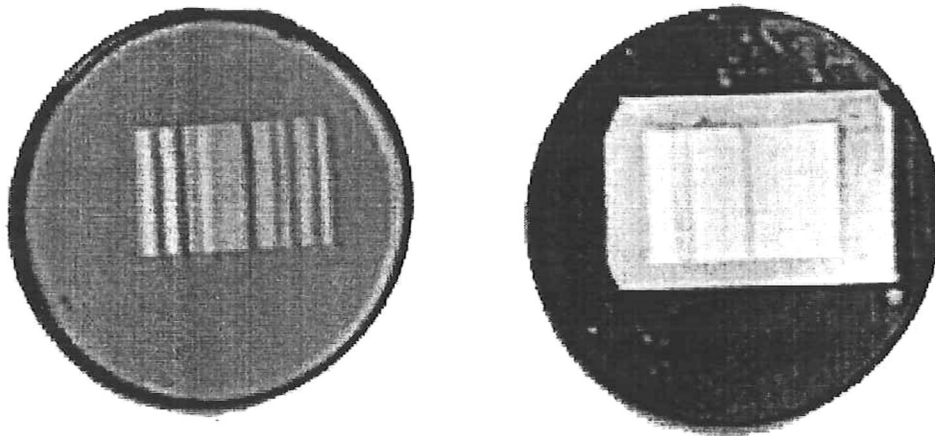


Figura 6. Sustratos con fotorresina (izquierda) y con cubierta de aluminio (derecha).

Se emplea una técnica de evaporación térmica al vacío, que es aplicable a casi todos los materiales. El proceso consta de 3 etapas:

1. Transición de una fase condensada del material, la cual puede ser sólida o líquida a un estado gaseoso.
2. Desplazamiento del vapor, desde su fuente hasta el sustrato donde se va a depositar. En este caso es el sustrato grabado con una cierta rugosidad.
3. Condensación del vapor sobre el sustrato formando la película.

En la primera etapa el material a depositar es calentado hasta lograr su transición al estado gaseoso. Cabe resaltar que cada material tiene una temperatura particular de fusión y requiere de un recipiente adecuado a la forma física del material a emplear.

Para lograr el desplazamiento del vapor hasta el sustrato, es necesario que la distancia que puede recorrer la molécula de vapor sin sufrir colisiones sea mayor que la distancia física entre el recipiente donde se encuentra el material y el sustrato donde se depositará.

IV.3. Obtención de patrones de brillo

Para la obtención de los patrones de brillo de las superficies generadas se montó otro sistema óptico (Fig.7), el cual simula una situación física real. Un haz de luz blanca se hace pasar por una abertura que controla el tamaño de σ , seguido de un difusor. El haz de luz incide sobre la superficie a un ángulo θ_s y dependiendo de la distribución de pendientes que tenga, será reflejada hacia el detector CCD. La cámara CCD tiene una resolución de $11\mu \times 11\mu$. Las imágenes son digitalizadas y capturadas en una computadora con la ayuda del software Scion Image para su posterior procesamiento.

Una vez obtenidas las imágenes se procede a binarizarlas pasando de imágenes con niveles de grises a solo tener ceros y unos en la imagen, quitando lo que podría ser la reflexión difusa. Se obtienen los patrones de brillo, de donde se obtendrán las estadísticas de primer y segundo orden.

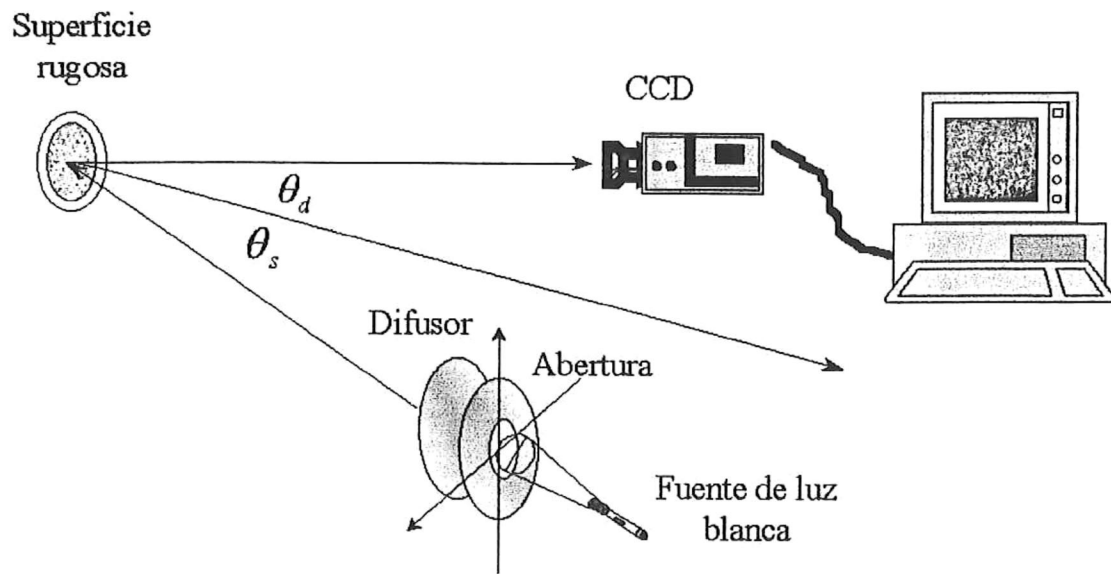


Figura 7. Sistema óptico para la obtención de imágenes.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

V.1. Generación de las superficies

V.1.1. Espectro Gaussiano

Se crearon superficies rugosas unidimensionales de una escala numéricamente con las ecuaciones descritas en la sección anterior. Cada superficie fue generada con 16,384 puntos. La longitud de correlación utilizada fue de 100 cm, con una desviación estándar de altura de la superficie σ_z de 14 cm, un intervalo de muestreo de 2 cm, el parámetro β correspondiente al diámetro aparente del sol fue de 0.68° .

Se generaron varias superficies con el espectro Gaussiano con diferente semilla aleatoria en cada una de ellas. De las series de datos obtenidas se obtuvieron series más pequeñas cada una de 4096 puntos, esto es debido a que el grabador de película Montage tiene un máximo de resolución de 4096 pixeles en el grabado de la película.

Las series de datos de 4096 puntos se realizaron de tres maneras diferentes. En la primera se seleccionaron solo 1365 datos de la serie de 16,384 puntos y se repitió cada valor tres veces con lo que se obtuvo la serie de 4096 puntos. La segunda se seleccionaron 2048 datos los cuales se repitieron dos veces para obtener los 4096. En la última se seleccionaron los 4096 datos directamente de la serie de 16,384 puntos.

Con las series de datos de 4096 puntos y utilizando el software Matlab[®] se generaron superficies tridimensionales (Fig.8), para después representar las alturas de las superficies en niveles de gris que van de 0 a 255, siendo el cero el valor mas pequeño y el 255 el más alto, una vez que se tenían en niveles de gris se rotó la superficie de

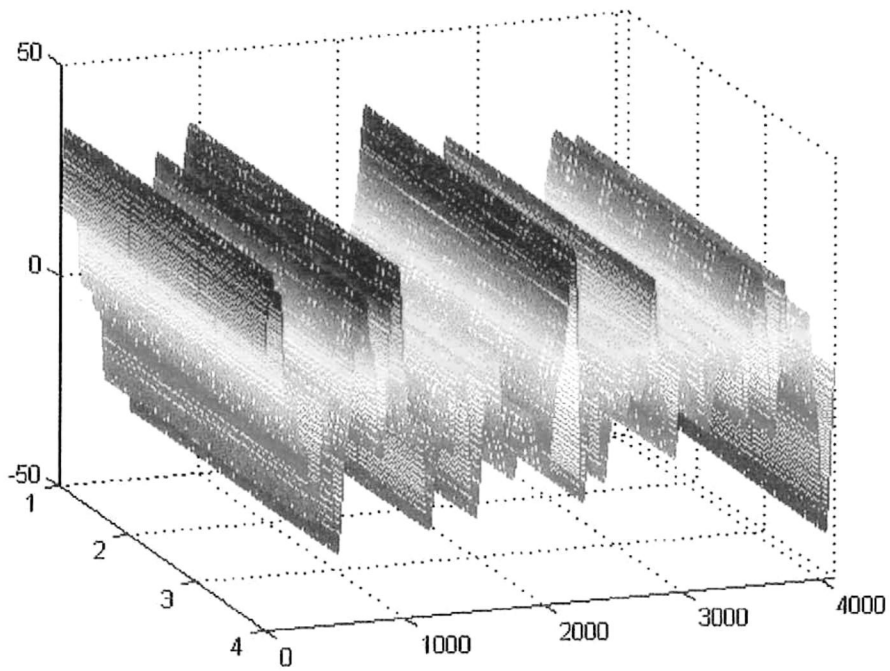


Figura 8. Vista tridimensional de la superficie.

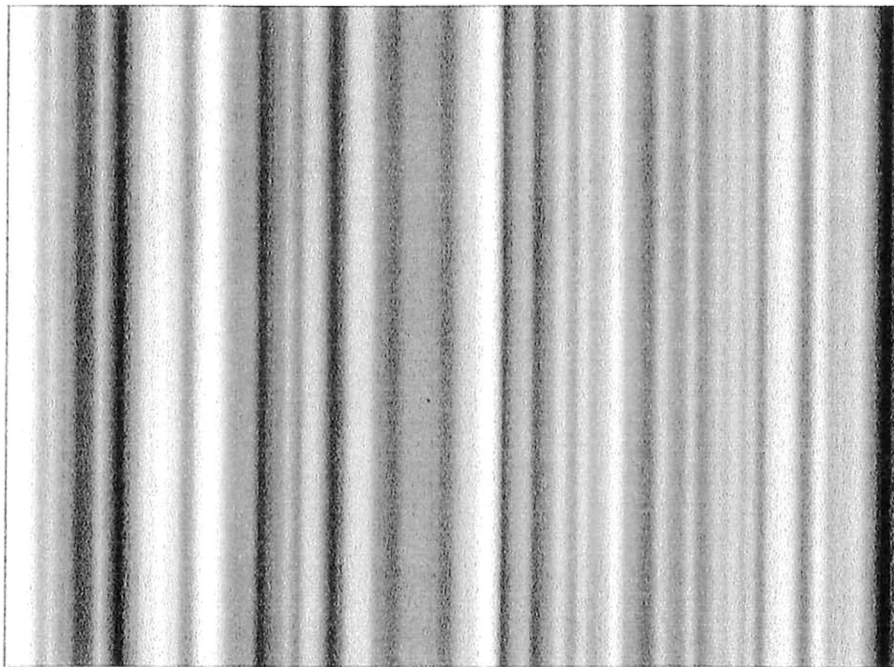


Figura 9. Vista aérea de la superficie generada numéricamente.

manera que se tuviera una vista aérea de esta. La figura 9 muestra una superficie ya rotada y en niveles de gris, lista para ser grabada en la película fotográfica.

Una vez que se grabaron las imágenes de las superficies en la película fotográfica se revelaron y montaron. Se utilizó el sistema óptico para la generación de las superficies rugosas sobre los sustratos de fotorresina (Fig.7). En esta parte del trabajo, puesto que la técnica utilizada es nueva, se realizaron diferentes pruebas de grabado, modificando el tiempo de exposición como el número de capas de fotorresina que tenía el sustrato, obteniendo finalmente un tiempo de exposición de 2 horas y 4 capas de fotorresina para lograr la rugosidad específica.

Teniendo las placas de fotorresina ya grabadas se realizaron varios transectos sobre la superficie generada con ayuda de un perfilómetro mecánico DEKTAK3 ST, obteniéndose el perfil de alturas que quedó grabado en la fotorresina. Posteriormente, se aluminizó la superficie y se procedió nuevamente a realizar transectos con el perfilómetro para observar si la superficie conservaba la rugosidad grabada. Las figuras 10, 11 y 12 muestran los perfiles de alturas de tres superficies diferentes con espectro Gaussiano. Las figuras 10 y 11 tienen una serie de 2048 datos repetidos dos veces cada valor y la figura 12 la serie es de 4096 datos tomados de la serie generada numéricamente. En la parte superior está el perfil generado numéricamente con el espectro en la computadora; en medio, los datos obtenidos con el perfilómetro de la superficie grabada en la placa de fotorresina y en la parte inferior los datos de la superficie obtenidos con el perfilómetro después de ser aluminizada la superficie.

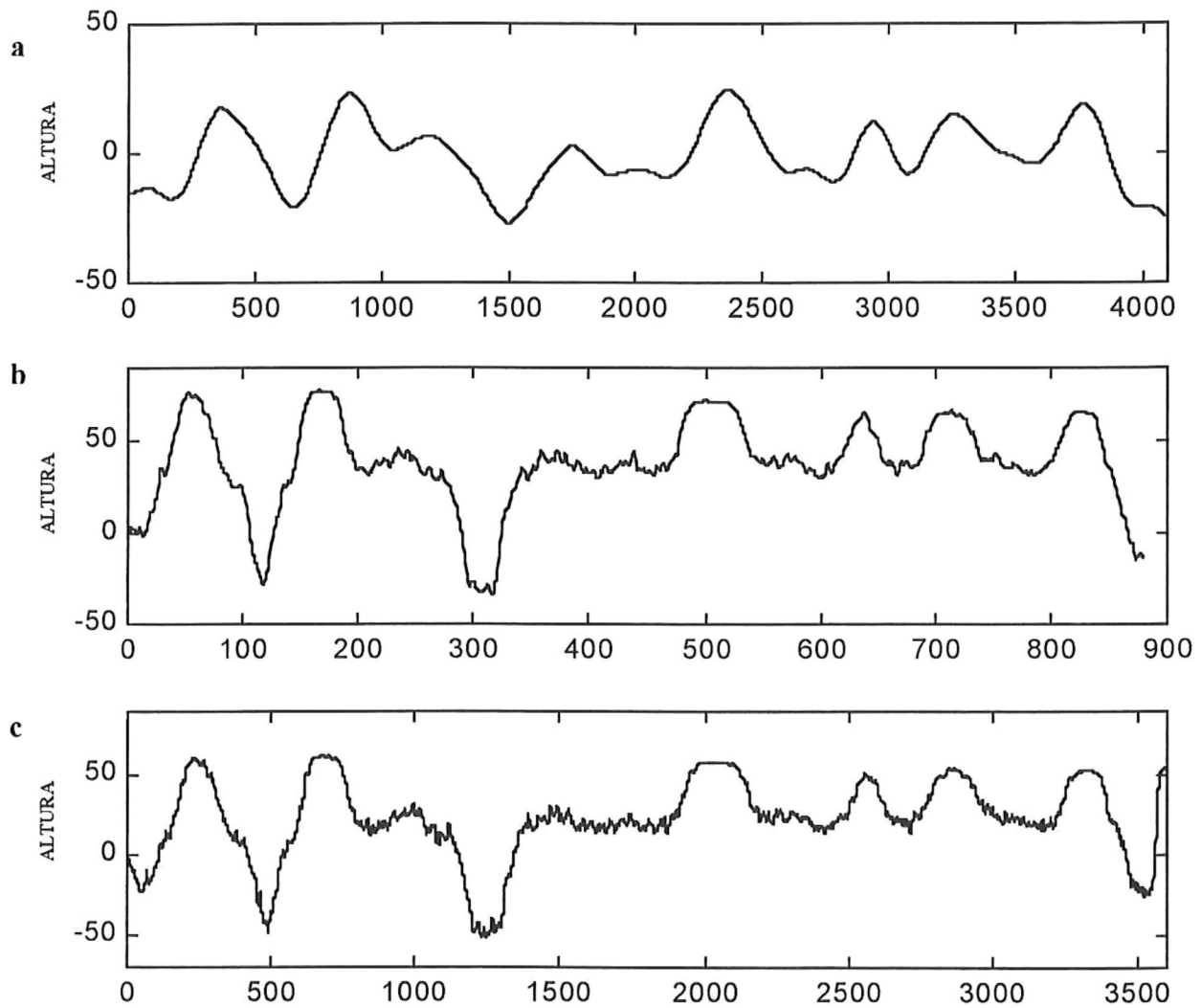


Figura 10. Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.

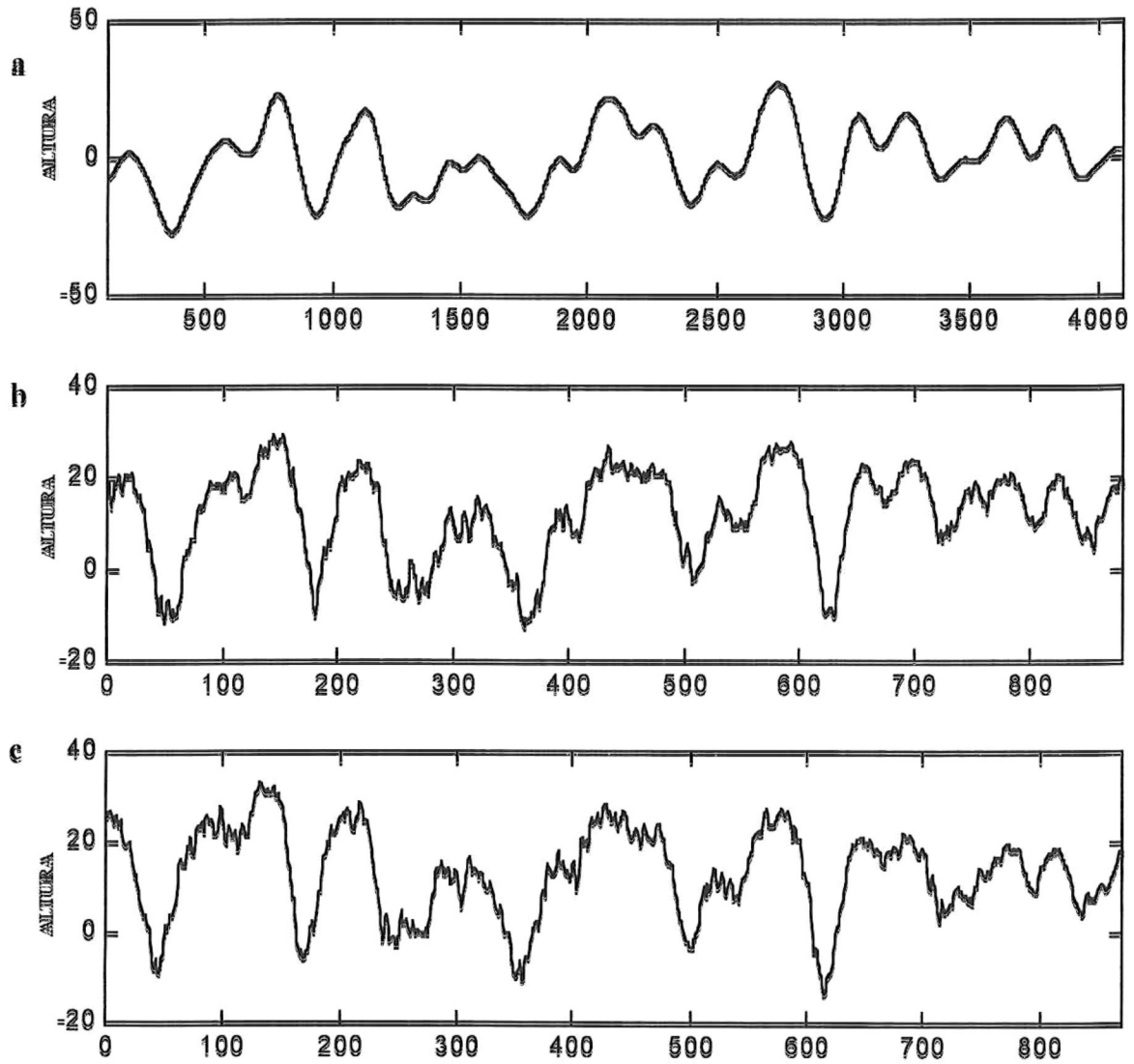


Figura 11. Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.

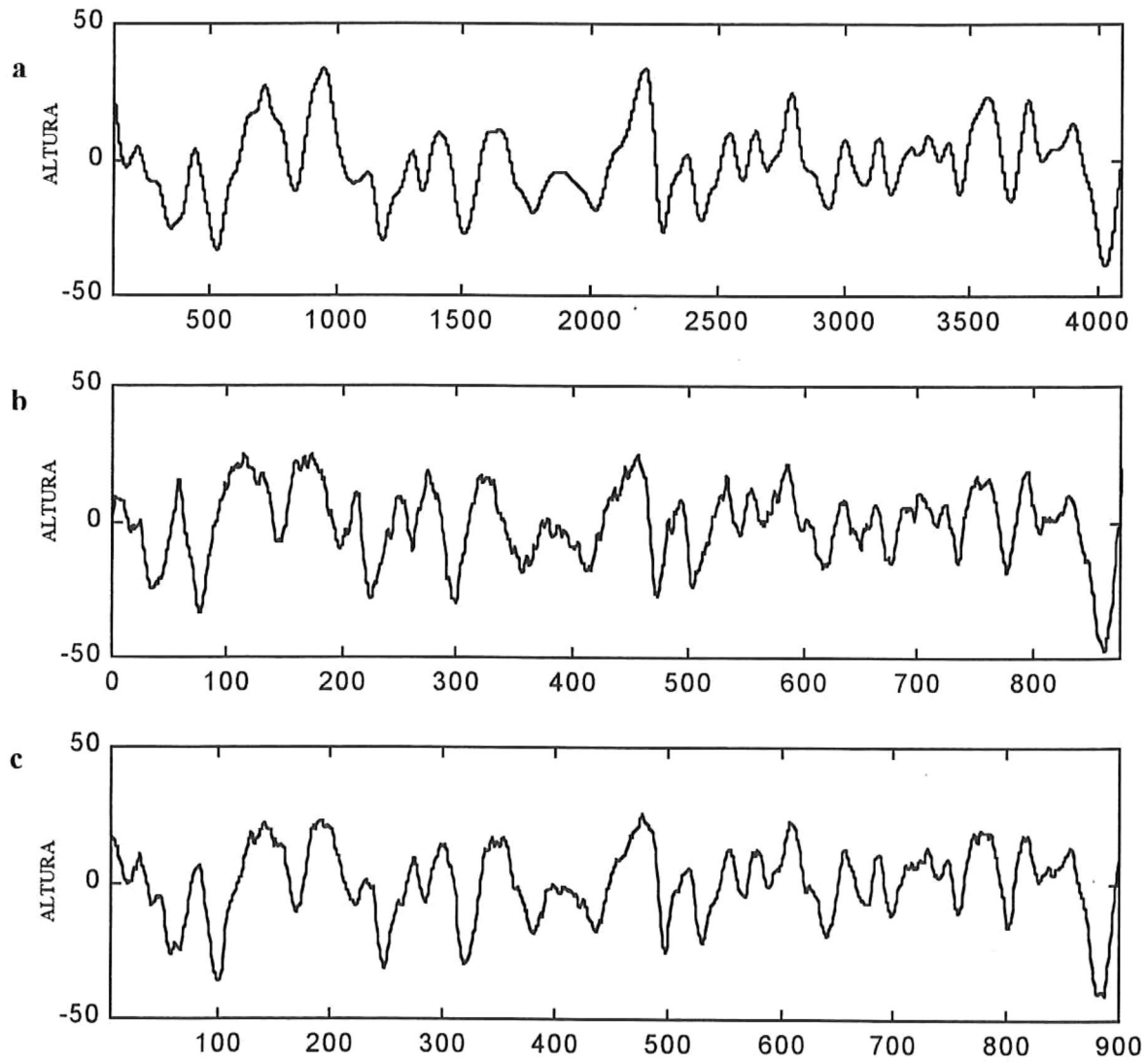


Figura 12. Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.

Como se puede observar, los perfiles de alturas de las superficies que se obtuvieron numéricamente si coinciden con las grabadas en la fotorresina aunque en estas últimas se tenga un poco de ruido, dado que se obtuvo una pequeña rugosidad sobre el perfil. También se puede observar que al añadir la capa de aluminio a la fotorresina no se alteró el perfil grabado en esta.

Los resultados obtenidos con el perfilómetro se emplearon para el cálculo de las correlaciones de las alturas y las pendientes, así como los histogramas de las alturas. A continuación se presentan las gráficas correspondientes a las correlaciones de alturas y pendientes para cada superficie, en color rojo tenemos la curva de correlación Gaussiana teórica, en azul la curva de correlación generada numéricamente y en verde la curva de correlación obtenida del perfilómetro.

En estos resultados se puede apreciar que las curvas de correlación de alturas en los dos últimos casos se comportan muy parecidas. De hecho, la curva numérica y la del perfilómetro son muy semejantes. Las superficies generadas con un número menor de valores de la serie original (2048 valores) figuras 13 y 14, tuvieron mayor error en las correlaciones de alturas, observándose que la superficie generada con los 4096 datos (Fig. 15) tenía un mejor ajuste a la estadística que se quería obtener. Por otro lado, en las curvas de correlación para las pendientes hay una mayor variación, a excepción de la tercera que sí muestra un comportamiento similar. En las otras dos el comportamiento de la curva del perfilómetro si difiere con las otras curvas, esto debido probablemente al ruido que se obtuvo en la superficie grabada, debido a que sobre el perfil grabado se

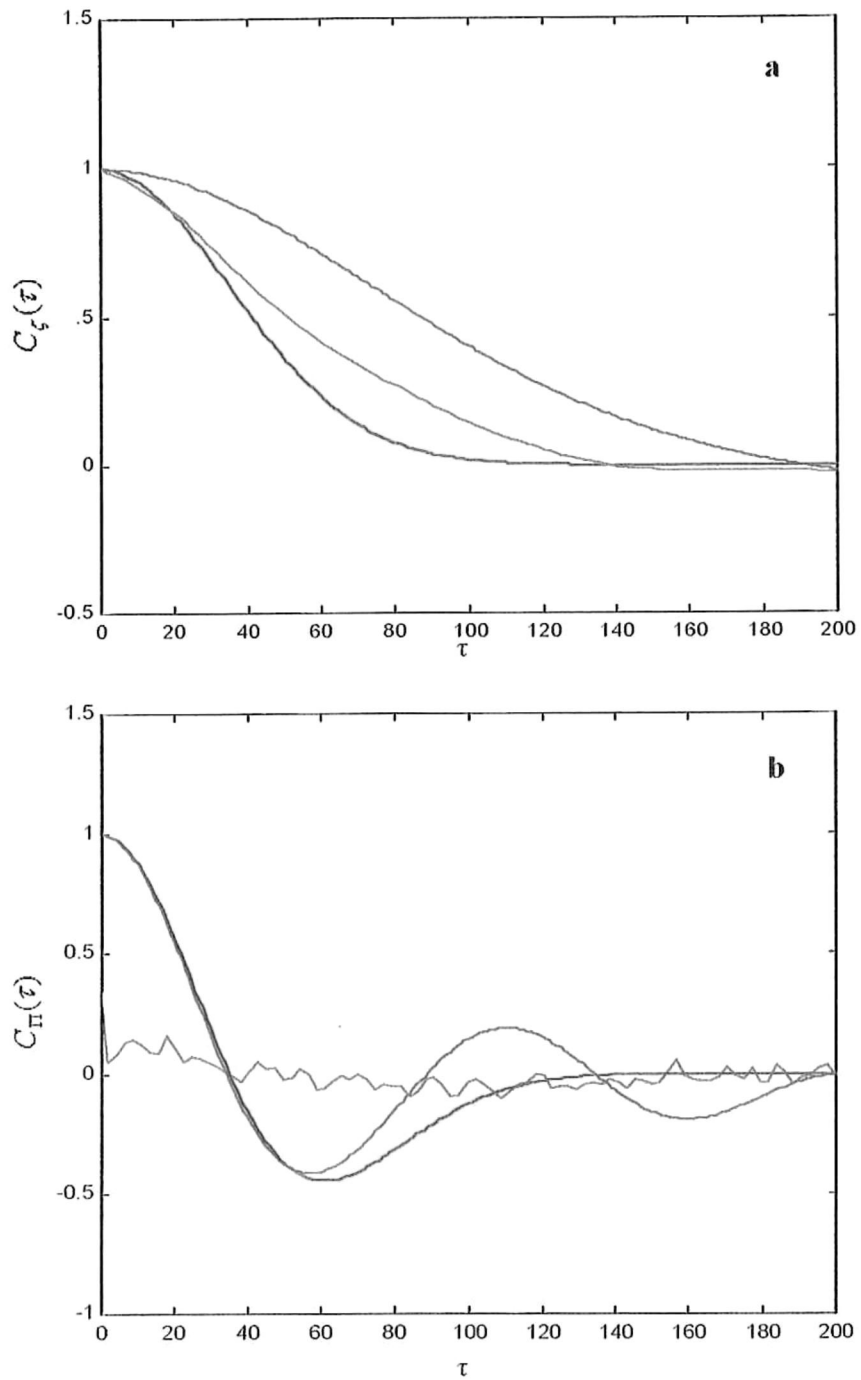


Figura 13. Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).

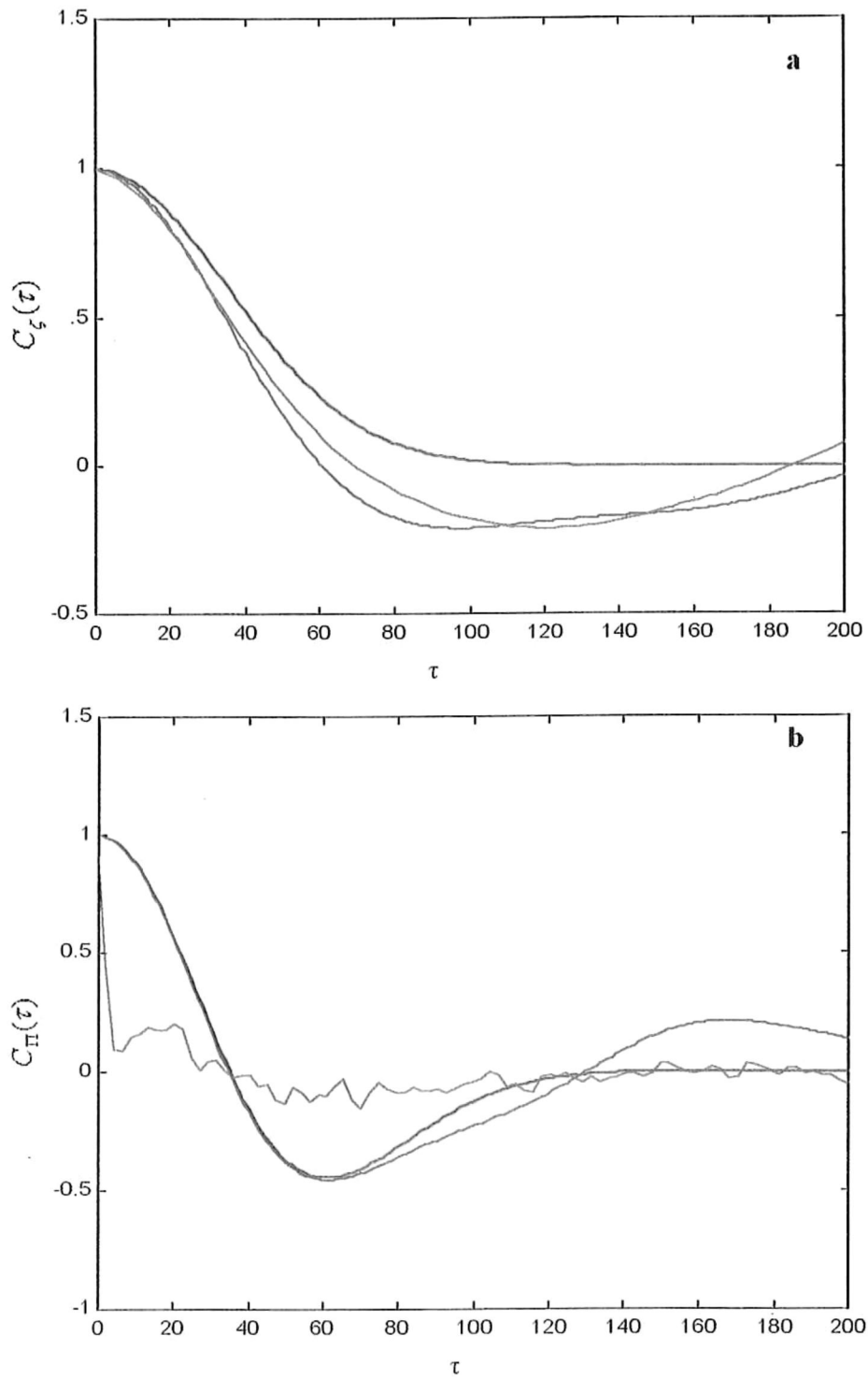


Figura 14. Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).

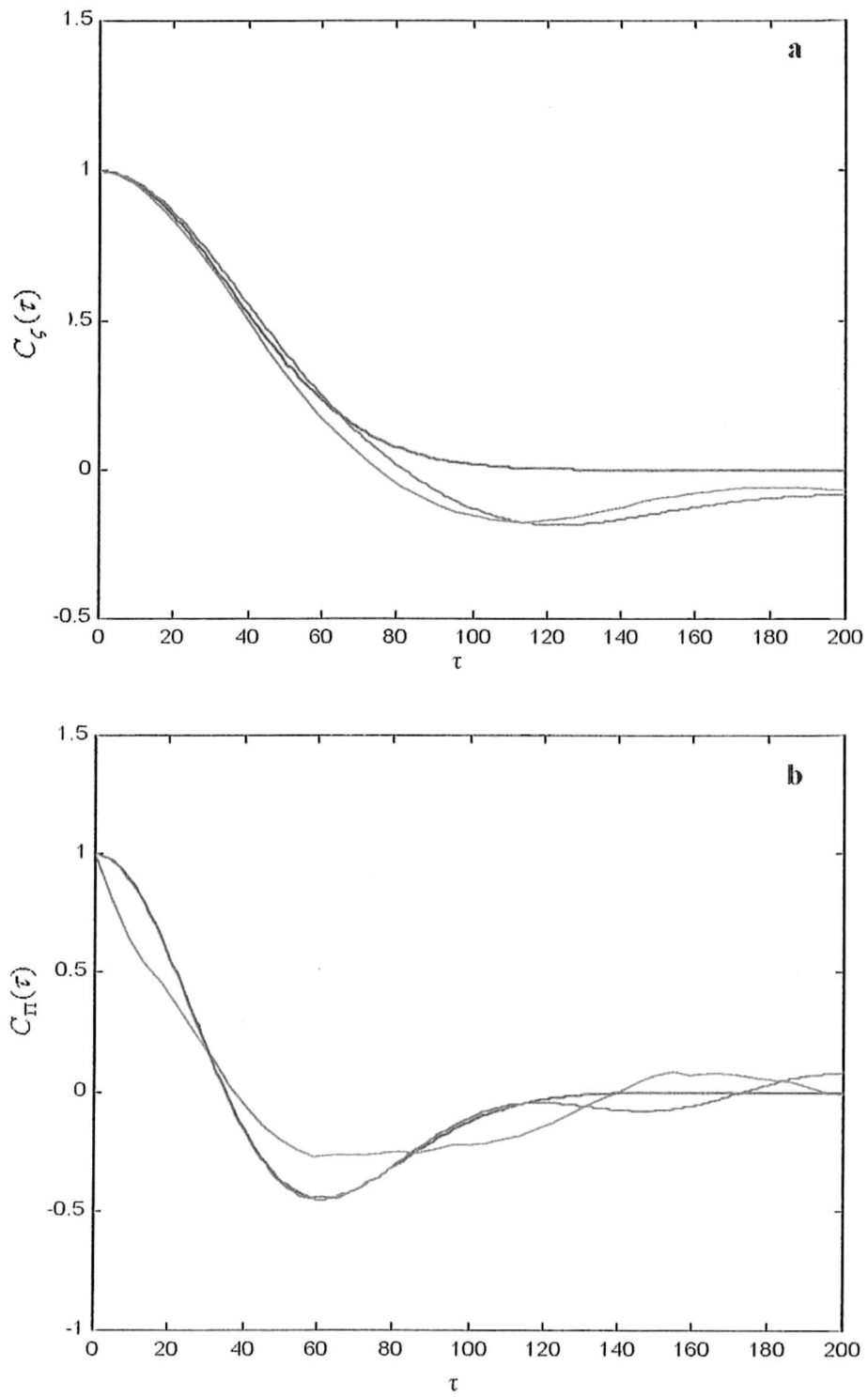


Figura 15. Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).

obtuvo una pequeña rugosidad, provocando una variación mayor en las pendientes de la superficie.

Ya que las superficies fueron generadas numéricamente con una distribución Gaussiana de alturas de la superficie, se realizaron histogramas normalizados de alturas de la superficie. Primero se realizaron histogramas de los datos obtenidos numéricamente para comprobar si los datos se comportaban de forma Gaussiana y después se realizaron histogramas normalizados de los datos de alturas de la superficie obtenidos por el perfilómetro, para ver si la estadística de la superficie grabada en la fotorresina contenía la misma estadística.

En las figuras 16, 17 y 18 están los histogramas que corresponden a las superficies anteriores, en la parte superior está el histograma de la superficie generada numéricamente y en la parte inferior el histograma de los datos obtenidos del perfil de la superficie en fotorresina. En cada caso está graficada la curva teórica.

Al comparar la curva teórica Gaussiana con el comportamiento de la distribución de alturas de la superficie de los datos obtenidos numéricamente, se observa que para los tres casos si sigue una distribución Gaussiana; pero esta distribución se pierde un poco en las superficies generadas. Esto debido al ruido que se tenía en el perfil, obteniendo una mayor variación de alturas. En la gráfica inferior de la figura 16 hay una mayor variación en la distribución de las alturas que podría esperarse debido a que esta superficie es la que tenía más variación en sus correlaciones. En la figura 17 la distribución de las alturas de la superficie en fotorresina también tiene una variación con

respecto a la numérica, sin embargo, para el caso de la figura 18, los histogramas se parecen mucho entre ellos no hay mucha variación.

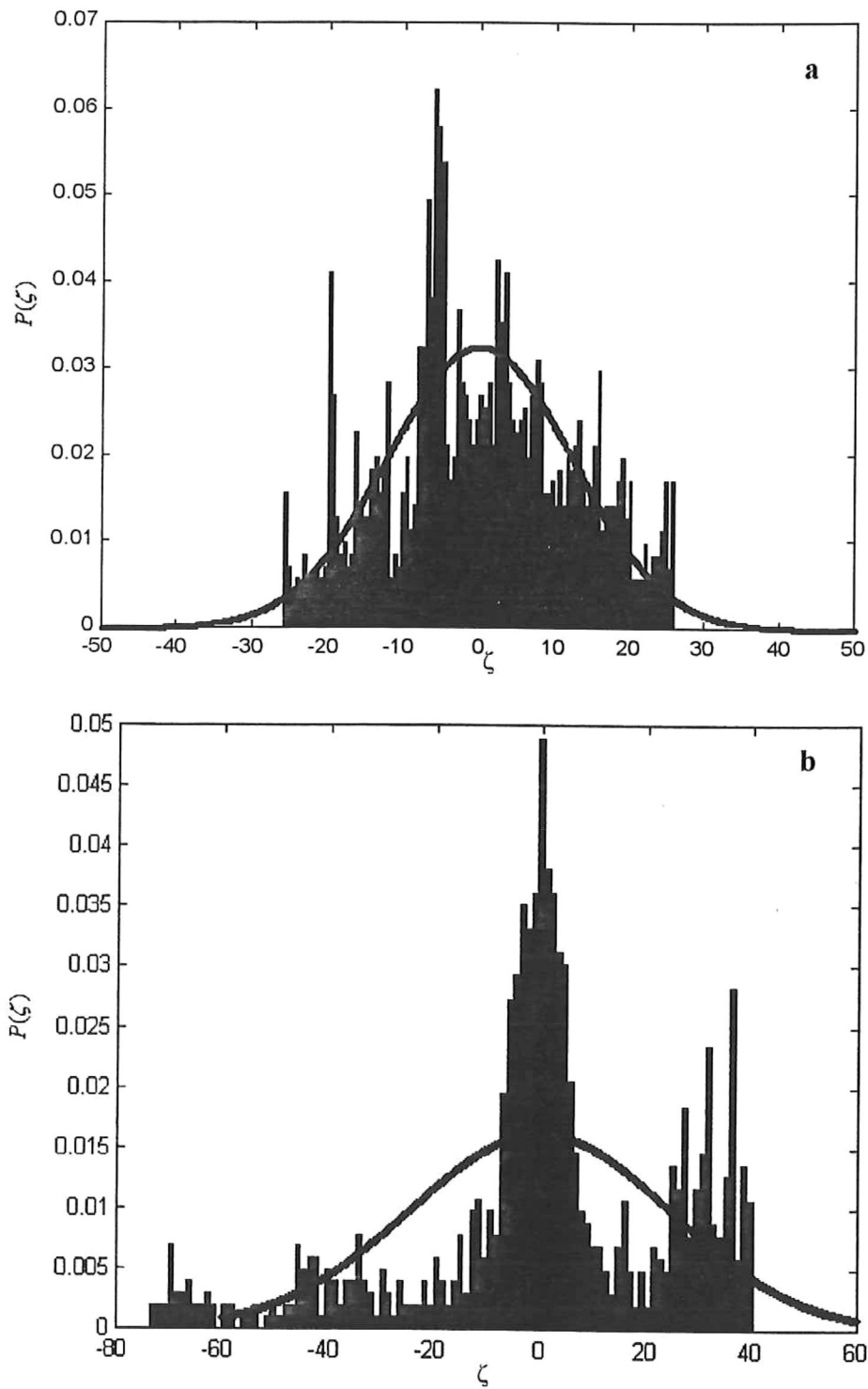


Figura 16. Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.

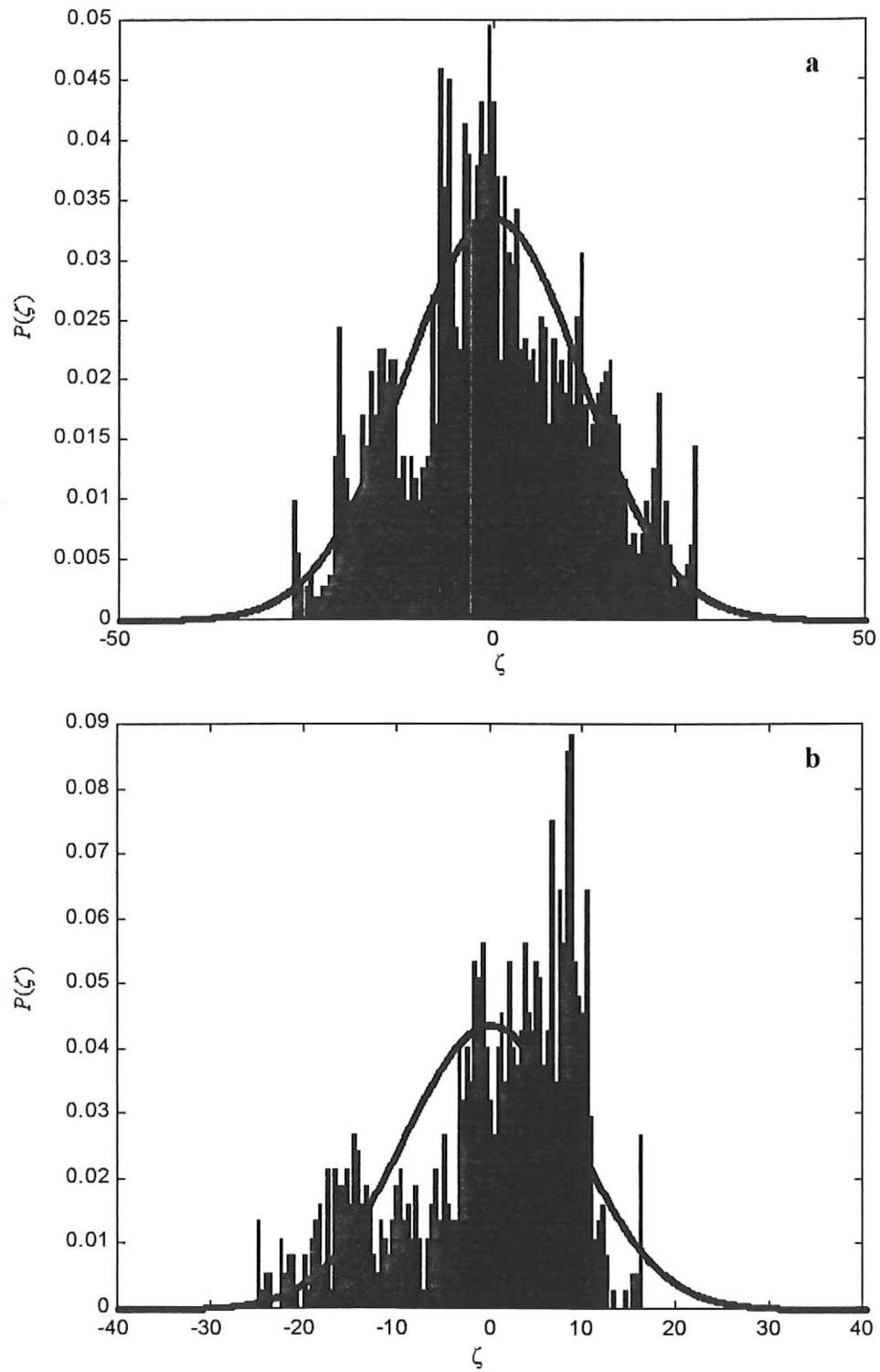


Figura 17. Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.

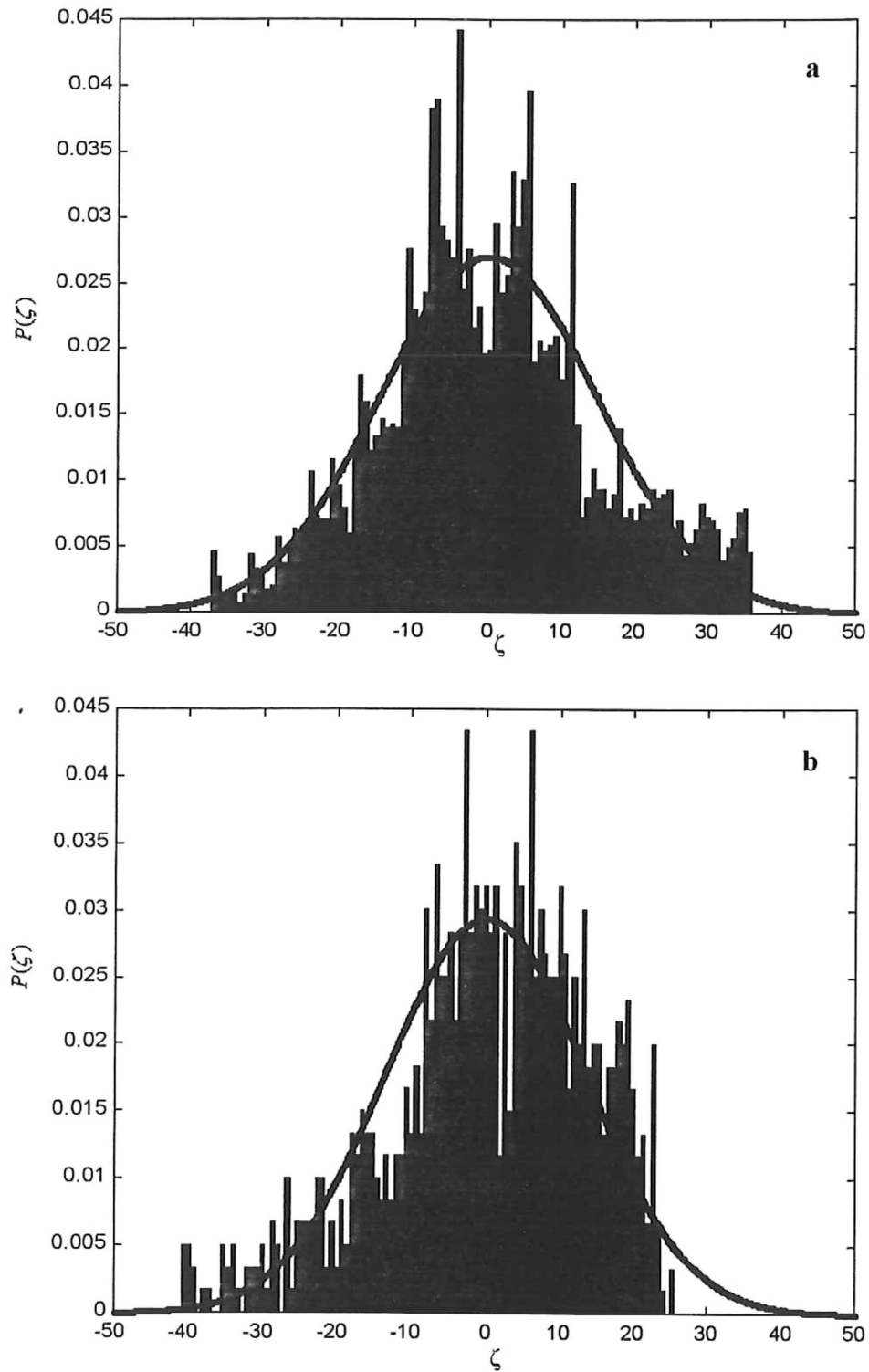


Figura 18. Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.

V.1.2. Espectro Pierson-Moskowitz

Para el caso de superficies rugosas de varias escalas con el espectro Pierson-Moskowitz, se realizaron varias superficies numéricamente de 8192 puntos cada una, con un intervalo de muestreo de 2 cm el perfil de la superficie fue generado con una velocidad de viento de $U = 10$ m/s, con desviación estándar σ_ζ de 14 y el parámetro correspondiente al diámetro aparente del sol β fue de 0.68° . Con este espectro también se generaron diferentes superficies utilizando una semilla aleatoria diferente. De las series de datos obtenidas se obtuvieron series más pequeñas, cada una de 4096 puntos, siguiendo el mismo criterio utilizado en las superficies con espectro Gaussiano.

Una vez obtenidas las series de datos de 4096 puntos, se procedió a crear una superficie tridimensional, pasarla a escalas de grises y rotarla, para posteriormente ser grabadas en película fotográfica.

En las figuras 19, 20 y 21 se presentan las gráficas correspondientes a las superficies generadas con el espectro Pierson-Moskowitz. Las figuras 19 y 20 son con series de datos de 2048 puntos repitiendo dos veces cada valor y la figura 21 tomando los 4096 datos de la serie generada numéricamente.

Se puede apreciar que como en el caso del espectro Gaussiano los perfiles grabados en la fotorresina antes y después de aplicar la capa de aluminio si concuerdan muy bien con el perfil creado numéricamente, aunque sigue habiendo ruido en los perfiles de los sustratos de fotorresina.

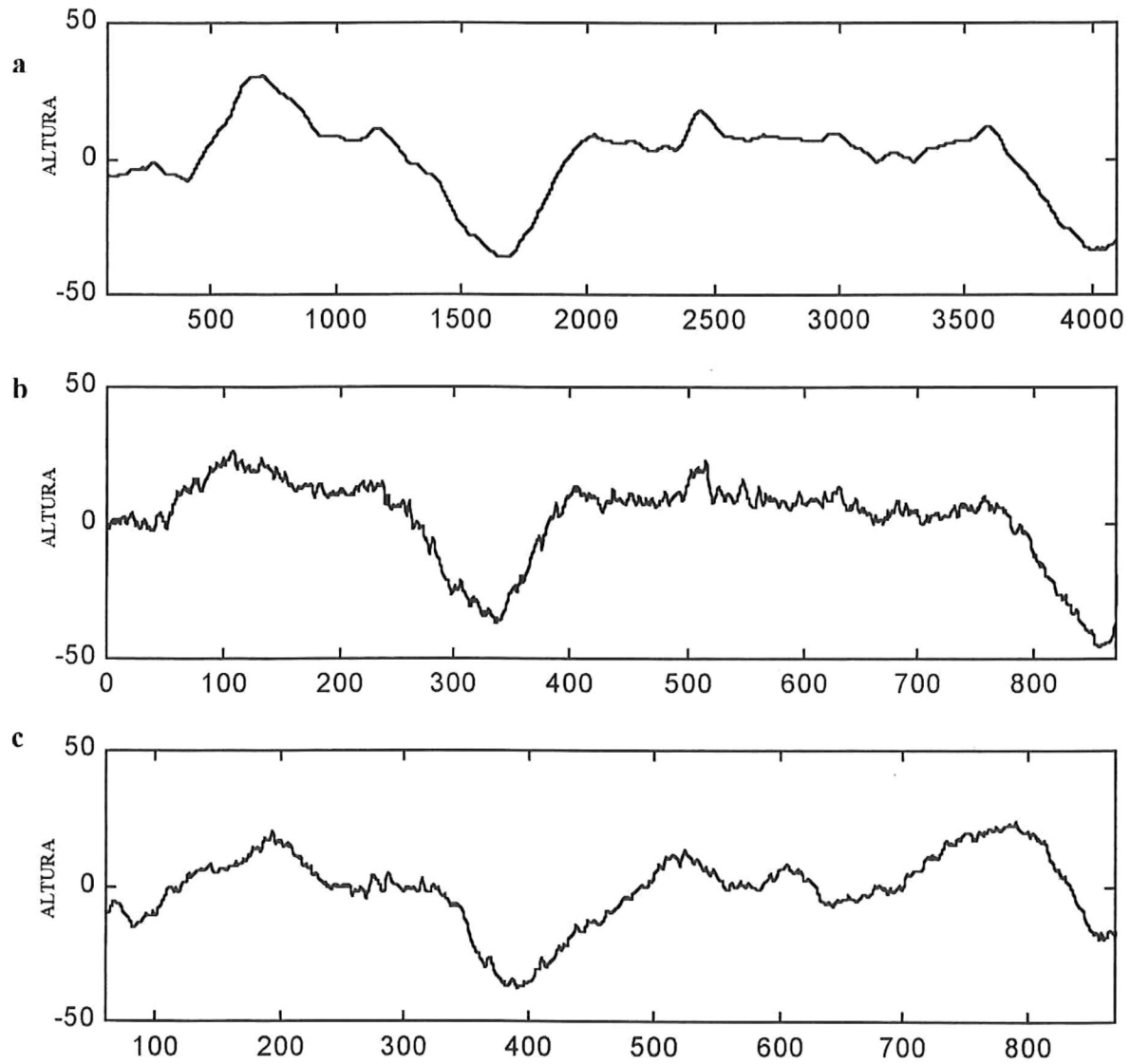


Figura 19. Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.

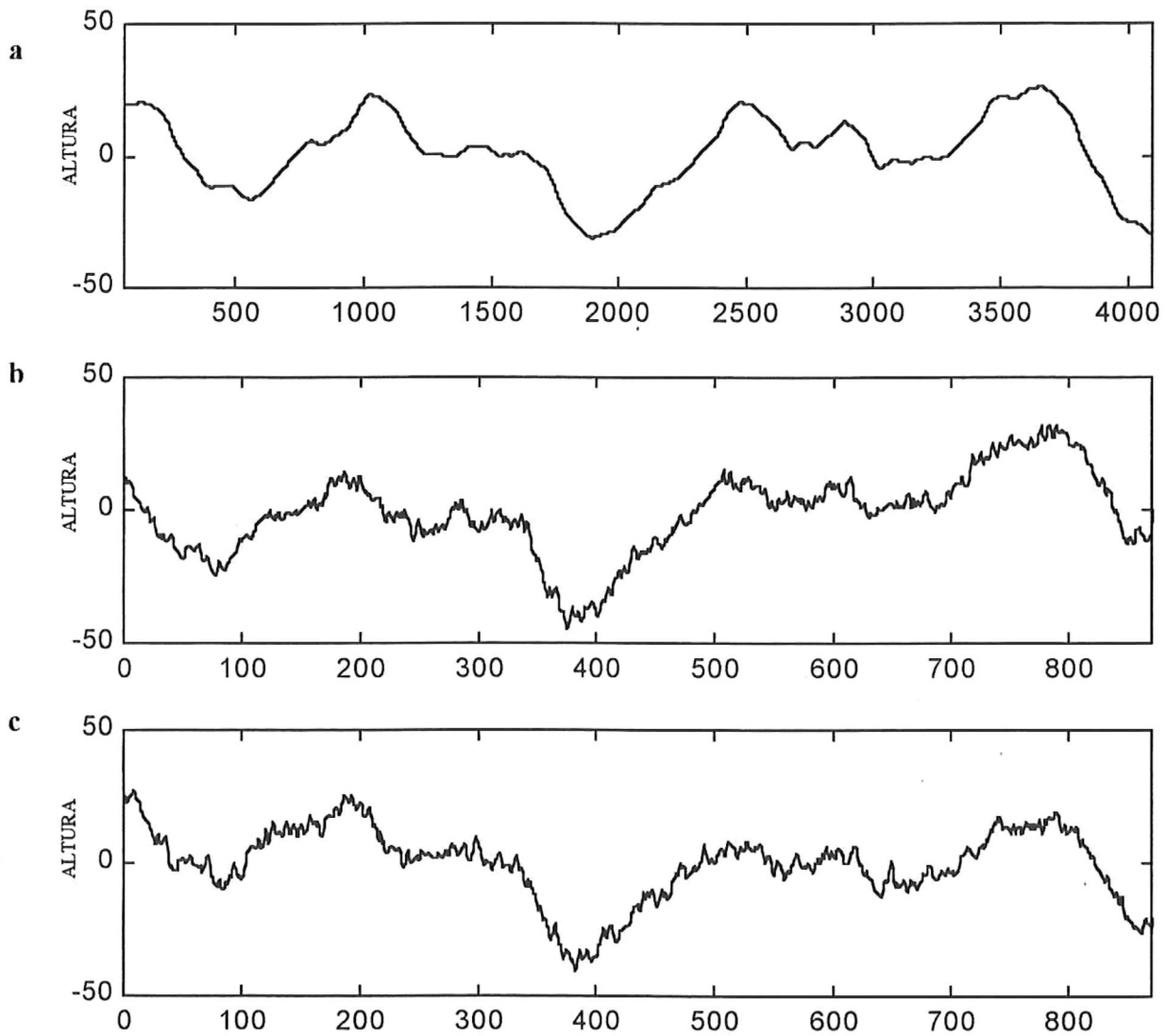


Figura 20. Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.

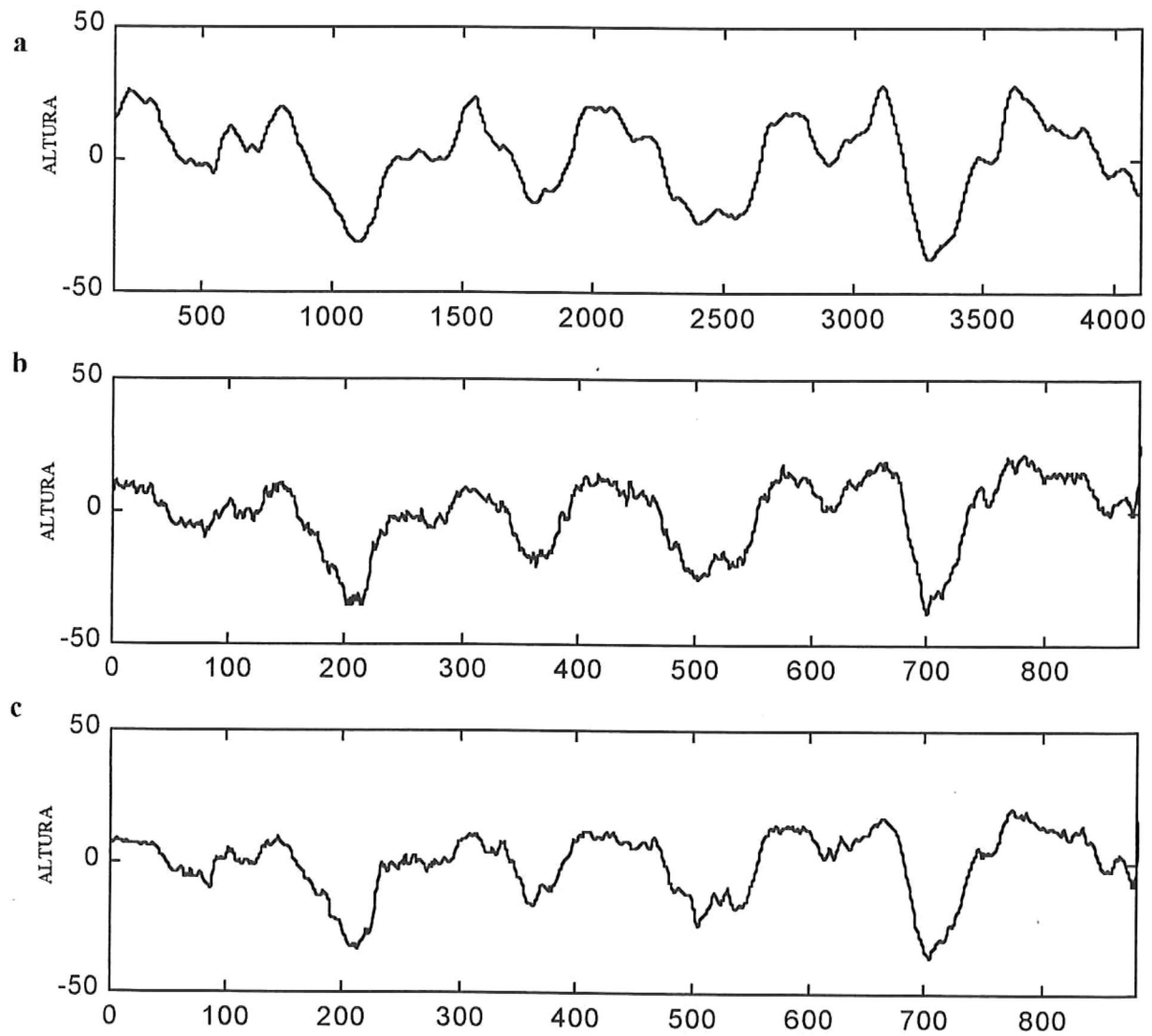


Figura 21. Alturas de la superficie: a) generada numéricamente; b) datos del perfilómetro de la superficie rugosa y c) datos del perfilómetro después de aluminizar la superficie.

Posteriormente, se procedió a calcular las correlaciones de las alturas y pendientes de las superficies. En las figuras 22, 23 y 24 se graficaron las curvas de correlación correspondientes a los perfiles anteriores. La gráfica en la parte superior de cada figura corresponde a la correlación de las alturas, y en la parte inferior la gráfica de las curvas de correlación de pendientes. Como en el caso Gaussiano, el color rojo corresponde a la curva teórica, el azul a la curva numérica, y el verde al perfilómetro.

Para el caso Pierson-Moskowitz se aprecia que si hay semejanza entre las curvas de correlación de alturas, siendo la figura 24 la más semejante, en este caso también la superficie creada con 4096 valores es la más similar a la numérica, en las curvas de correlación de pendientes, tenemos el mismo comportamiento ocurrido en el caso Gaussiano, donde debido a las pequeñas rugosidades tenemos una mayor variación de pendientes sobre la superficie para los tres casos.

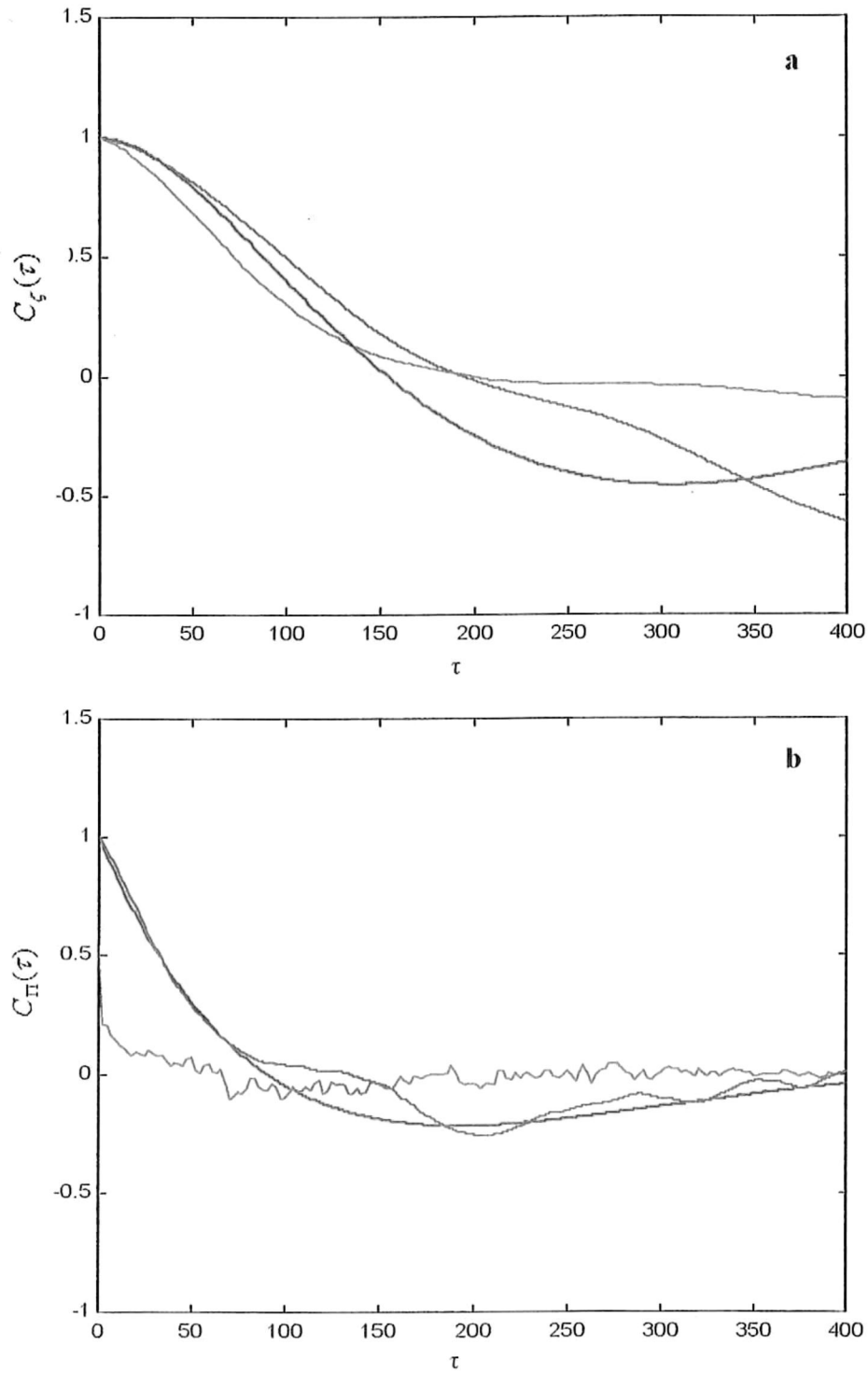


Figura 22. Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).

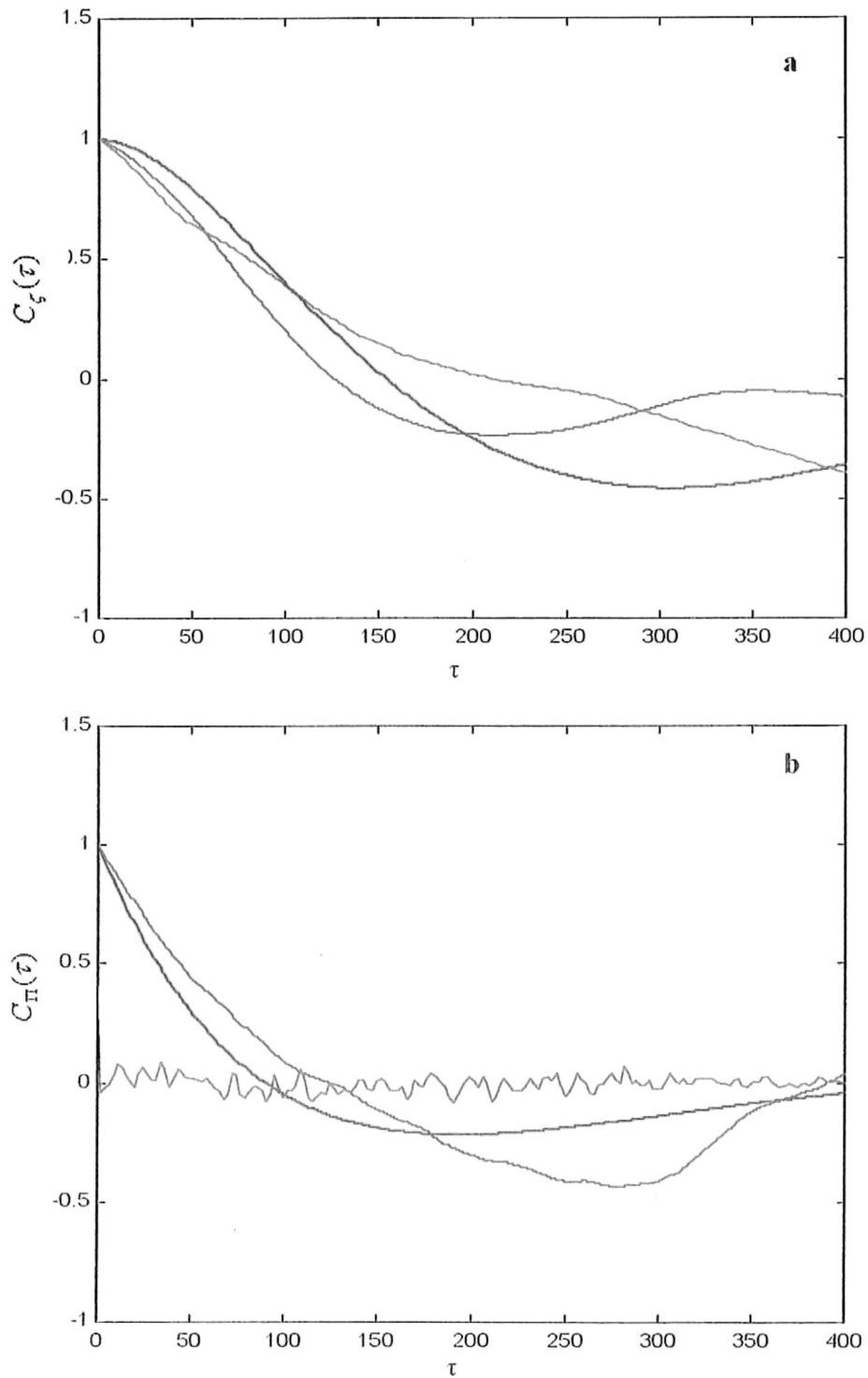


Figura 23. Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).

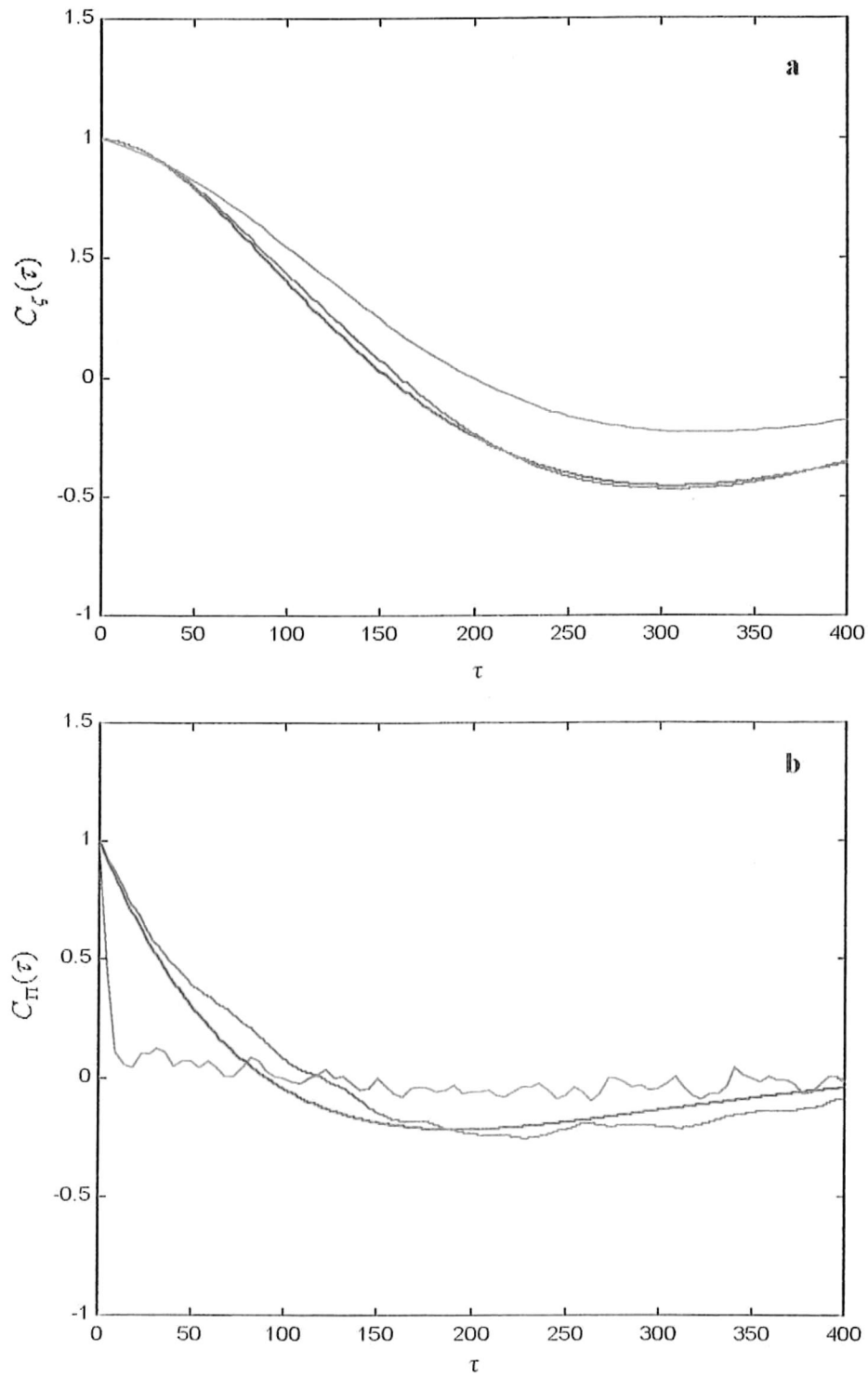


Figura 24. Función de correlación: a) de alturas y b) de pendientes, teórica (roja), numérica (azul) y perfilómetro (verde).

Las superficies generadas numéricamente con el espectro Pierson-Moskowitz tienen una distribución de alturas de la superficie Gaussiana. Para ver el comportamiento de los datos de alturas obtenidos numéricamente con la curva teórica, así como los datos de alturas de las superficies grabadas en fotorresina y su curva teórica, se graficaron los histogramas normalizados, en las figuras 25, 26 y 27 están los histogramas que corresponden a las superficies anteriores, en la parte superior es el histograma de la superficie generada numéricamente y la curva teórica Gaussiana y en la parte inferior el histograma de los datos obtenidos del perfil de la superficie en fotorresina con la curva teórica Gaussiana.

En las gráficas de la figura 25 se ve que la distribución de alturas de la superficie grabada en fotorresina se acerca más a la curva teórica Gaussiana que la distribución de alturas de la superficie obtenida numéricamente, tal vez debido al intervalo de datos de la serie que se tomó. En las gráficas de las figuras 26 sucede lo contrario donde hay más similitud entre la distribución de alturas para la superficie numérica, que para la grabada en fotorresina. En la figura 27 es donde existe mayor similitud tanto para la distribución de alturas numérica como las grabadas en fotorresina, debido probablemente a que se seleccionaron un mayor número de puntos para estas superficies

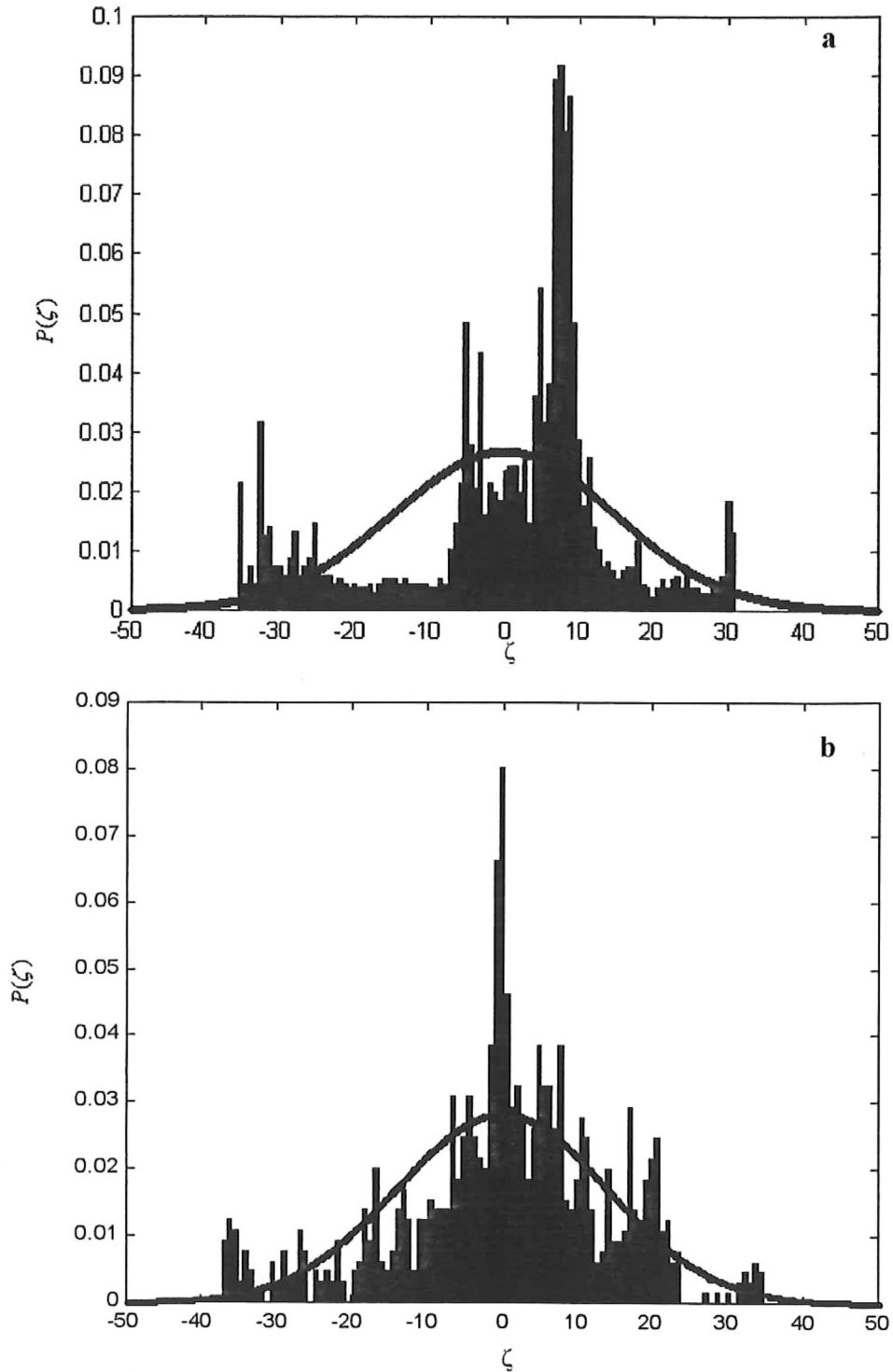


Figura 25. Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.

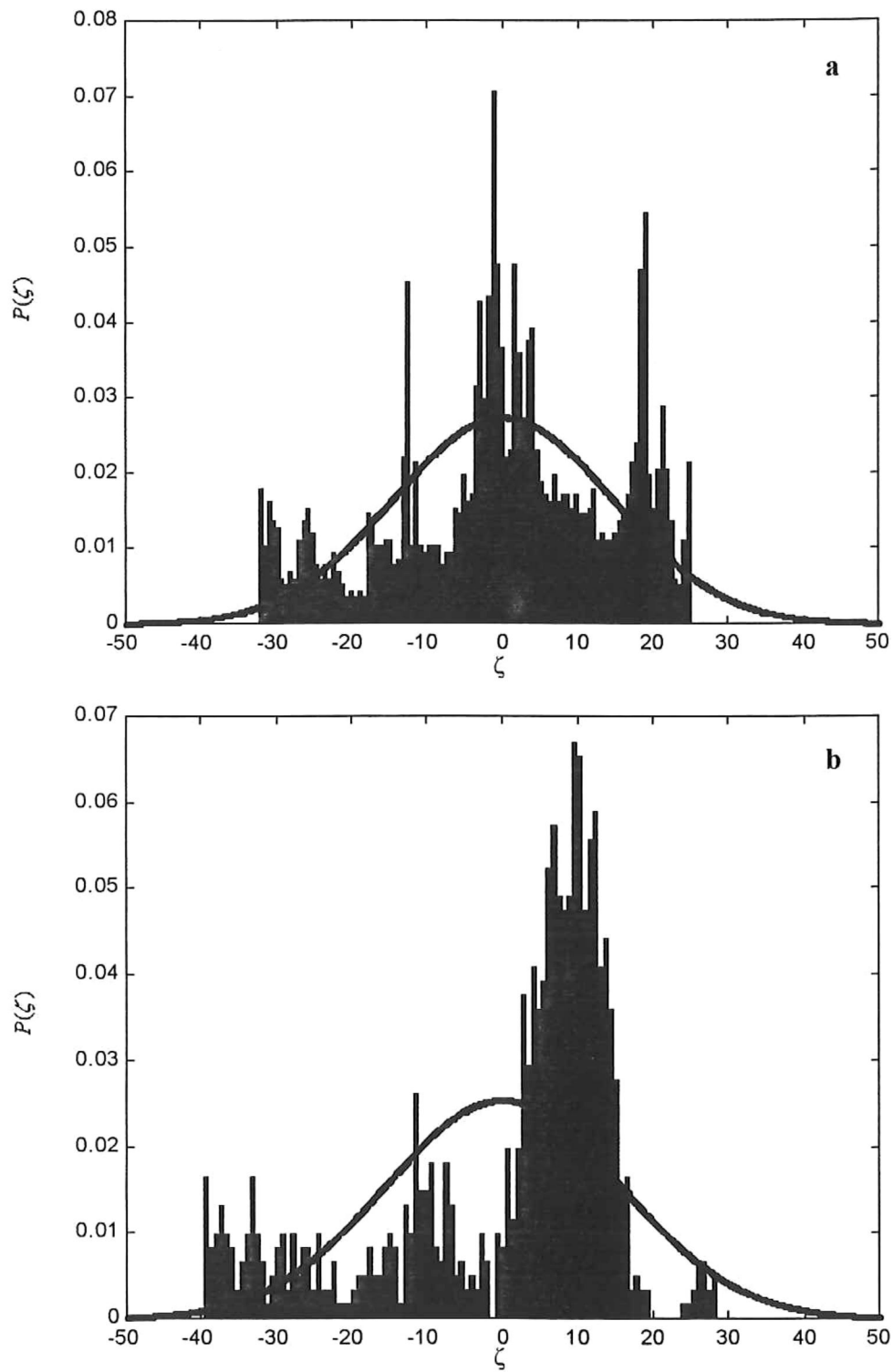


Figura 26. Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.

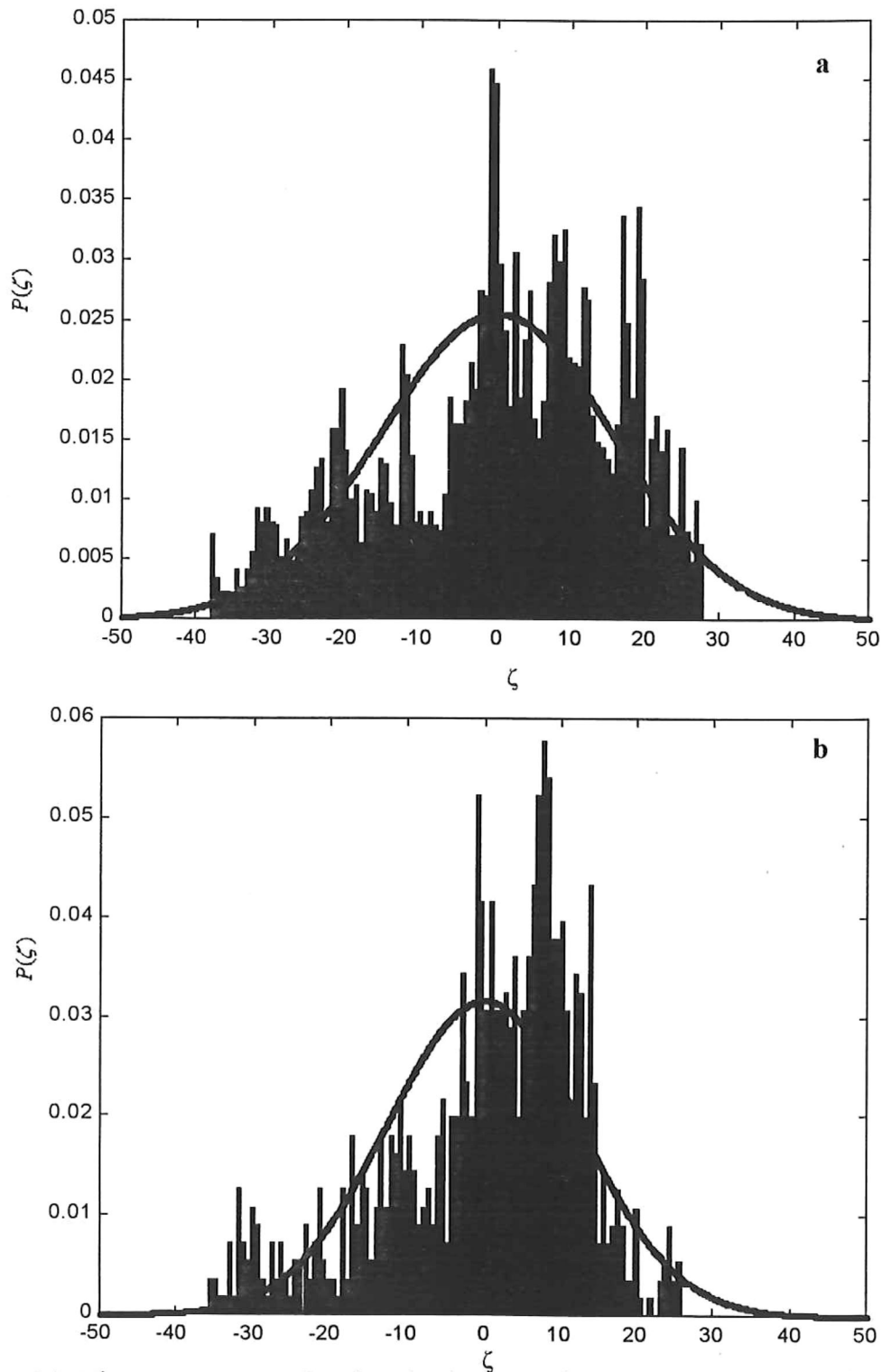


Figura 27. Histogramas normalizados de alturas de la superficie: a) superficie generada numéricamente y b) superficie generada en la fotorresina.

V.2. Obtención de las estadísticas de las superficies

Con las superficies grabadas en fotorresina se procedió a la obtención de las imágenes de los patrones de brillo de las superficies, esto con la ayuda del sistema óptico para la obtención de las imágenes (Fig.7). Una vez colocadas las superficies en el sistema óptico se tomaron imágenes con un CCD a ángulos de incidencia θ_s de 7° , 8° , 9° y 10° , manteniendo siempre el ángulo del sistema de detección θ_d a 0° en todos los casos.

Con las imágenes obtenidas del CCD se procedió a su análisis. Las imágenes que se obtienen con el CCD son en una escala de grises de 0 a 255 siendo el cero el correspondiente al negro y el 255 al blanco. En las imágenes obtenidas se esperaba obtener solo valores de ceros y unos. En otras palabras, solo los brillos correspondientes a aquellas pendientes que estén de acuerdo con la geometría del problema, pero esto no pasa así debido a que también hay reflexión difusa dentro de la imagen, debida a las rugosidades muy pequeñas que se encuentran sobre la superficie. Como el modelo utilizado en este trabajo no considera las reflexiones difusas, es necesario limpiar las imágenes cambiándolas de los niveles de gris a solo ceros y unos. Para esto, el criterio utilizado fue a partir de un histograma de los valores de los brillos donde se consideró que los valores más altos a una desviación estándar son iguales a uno y los restantes sean cero. De esta manera se elimina la reflexión difusa o parte de ella.

Con las imágenes binarizadas se pasó a obtener la variancia de las imágenes para, posteriormente, obtener la variancia o desviación estándar de las pendientes y las alturas de las superficies.

El promedio de la imagen μ_i , puede escribirse

$$\mu_i = \langle i(x) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\Pi) p(\Pi) d\Pi, \quad (17)$$

donde $B(\Pi)$ es la función de brillo unidimensional definida por

$$B(\Pi) = \text{rect} \left[\frac{\Pi - \Pi_0}{\left(1 + \Pi_0^2\right)^{\frac{\beta}{2}}} \right], \quad (18)$$

donde $\Pi_0 = \tan[(\theta_s - \theta_a)/2]$, $\Pi = \tan(\alpha)$, donde α es el ángulo entre el eje x y la superficie y $p(\Pi)$ es la función de densidad de probabilidad en una dimensión, donde es considerada una función Gaussiana a primera aproximación, sustituyendo la ecuación 17 las expresiones para $B(\Pi)$ y $p(\Pi)$, tenemos

$$\mu_i = \langle i(x) \rangle = \frac{1}{\sigma_{\Pi} (2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect} \left(\frac{\Pi - \Pi_0}{\left(1 + \Pi_0^2\right)^{\frac{\beta}{2}}} \right) \exp \left(-\frac{\Pi^2}{2\sigma_{\Pi}^2} \right) d\Pi. \quad (19)$$

Definiendo $a = \Pi_0 - \left(1 + \Pi_0^2\right)^{\frac{\beta}{4}}$ y $b = \Pi_0 + \left(1 + \Pi_0^2\right)^{\frac{\beta}{4}}$, podemos escribir

$$\mu_i = \langle i(x) \rangle = \text{erf} \left(\frac{b}{\sigma_{\Pi}} \right) - \text{erf} \left(\frac{a}{\sigma_{\Pi}} \right). \quad (20)$$

La variancia de las intensidades en la imagen, σ_i^2 , esta definida por

$$\sigma_i^2 = \langle i^2(x) \rangle - \langle i(x) \rangle^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [B(\Pi) - \mu_i]^2 p(\Pi) d\Pi. \quad (21)$$

pero $B(\Pi) = B^2(\Pi)$, entonces $\langle i^2(x) \rangle = \langle i(x) \rangle$ Por lo tanto

$$\sigma_i^2 = \langle i(x) \rangle - \langle i(x) \rangle^2 = \mu_i(1 - \mu_i), \quad (22)$$

y sustituyendo la expresión $\langle i(x) \rangle$ de la ecuación 20, en la ecuación 22, nos queda

$$\sigma_i^2 = \text{erf}\left(\frac{b}{\sigma_{\Pi}}\right) - \text{erf}\left(\frac{a}{\sigma_{\Pi}}\right) - \left[\text{erf}\left(\frac{b}{\sigma_{\Pi}}\right) - \text{erf}\left(\frac{a}{\sigma_{\Pi}}\right) \right]^2, \quad (23)$$

que es la relación requerida entre la variancia de las intensidades en la imagen, σ_i^2 , y la variancia de las pendientes de la superficie, σ_{Π}^2 .

La relación entre σ_{Π}^2 y σ_{ζ}^2 puede ser derivada de

$$C_{\Pi}(\tau) = -\frac{d^2 C_{\zeta}(\tau)}{d\tau^2}, \quad (24)$$

si conocemos la función de correlación de las alturas de la superficie. Aquí, $C_{\zeta}(\tau)$ es la función de correlación de las alturas de la superficie y $C_{\Pi}(\tau)$ es la función correlación de las pendientes de la superficie.

La relación entre la variancia de las pendientes y la variancia de las alturas de la superficie σ_{ζ}^2 contiene información en la escala lateral de las variaciones de alturas de la superficie. Para estos casos, es necesario conocer la longitud de correlación de las alturas de la superficie. Los valores obtenidos por el perfilómetro mecánico y con el modelo se

encuentran en la tabla I. El valor obtenido con el modelo fue calculado de la función de autocorrelación de las alturas de la superficie obtenida a través de la función de autocorrelación de las intensidades en la imagen.

Tabla I. Longitudes de correlación de alturas de superficies con espectro Gaussiano.

	Longitud de correlación		
	Teórico	Numérico	Perfilómetro
Sup11	100	104.78	132.87
Sup12	100	81.56	85.84
Sup15	100	103.66	95.38

En las gráficas 28,29 y 30 en la parte superior está la relación entre la variancia de intensidad de la imagen contra la desviación estándar de las pendientes y en la parte inferior la relación entre la variancia de intensidad de la imagen contra la desviación estándar de las alturas de las superficies analizadas para 7, 8, 9 y 10 grados. Los círculos rojos corresponden a los valores obtenidos de variancia de intensidad de la imagen de los patrones de brillo de cada imagen de las superficies grabadas.

Las superficies con el espectro Gaussiano fueron generadas con una desviación estándar de alturas de 14. Esta desviación varió un poco al tomarse una serie más pequeña de datos de la serie original, quedando las desviaciones para las superficies como se muestra en la tabla II.

Tabla II. Desviaciones estándar de las superficies con espectro Gaussiano.

Desviación estándar de alturas				
a 95% de confianza				
Superficie	Teórico	Numérico	Perfilómetro	Modelo
Sup11	14	12.29-12.83	13.53-14.84	4.57-5.26
Sup12	14	11.64-12.15	9.45-10.37	3.30-3.83
				9.0-9.66
Sup15	14	14.40-15.04	12.95-14.21	9.52-9.58

Desviación estándar de pendientes			
a 95% de confianza			
Superficie	Numérico	Perfilómetro	Modelo
Sup11	0.181-0.184	0.067-0.069	0.048-0.056
Sup12	0.187-0.196	0.034-0.037	0.056-0.066
			0.155-0.168
Sup15	0.190-0.198	0.062-0.068	0.157-0.156

Los valores de variancia de pendientes se obtienen de los valores de pendientes de la superficie a partir de los valores de altura de la superficie.

Para la primera superficie (Fig. 28) tenemos que para cada valor de variancia de intensidad de imagen se obtienen dos valores de desviación estándar de pendientes y de alturas de la superficie para saber cuál es el valor correcto que corresponde a cada valor de variancia de intensidad. Se tienen que analizar los valores que se obtuvieron para varios ángulos de incidencia y observar la correspondencia para seleccionar el valor. En este caso tenemos que para un ángulo de 10° el valor no está dentro de la curva, el valor

para el ángulo de 9° si se encuentra dentro de la curva pero se encuentra más alto que los otros dos por lo que se podría desechar debido a que se esperaría que la intensidad de la imagen fuera disminuyendo entre más grande sea el ángulo de incidencia de la luz. Quedándonos solo los valores de 7° y 8° , analizando las gráfica se observa que los valores que están más cerca son los que están a la izquierda en la gráfica, teniendo como resultado una desviación estándar de pendientes en un intervalo de 0.048-0.056 y la desviación estándar de alturas dentro de un intervalo entre los 4.57 y 5.26, los valores se encuentra por debajo del los esperado para esta superficie que serían para las pendientes 0.067-0.069 y para la alturas de 13.53-14.84.

En el siguiente caso (Fig. 29) tenemos el valor de 10° no queda sobre la curva y nuevamente el valor de 9° está arriba del valor de 8° , por lo que solo se toman en cuenta el valor de 7° y 8° , en este caso las distancias entre los dos puntos son muy similares por lo que tendríamos dos resultados de pendientes entre 0.056-0.066 y otro 0.155-0.168 . En este caso ninguno de los intervalos corresponde a el esperado que es 0.034-0.037, en las alturas los intervalos los intervalos están uno entre 3.30- 3.83 y otro entre 9.0-9.66, aquí uno de los intervalos si concuerda con el esperado que es 9.45-10.37.

En el tercer caso (Fig. 30) sí quedan todos los valores variancia de intensidad de la imagen sobre las curvas para esta superficie se tomaron como los datos adecuados los valores del lado derecho de la gráfica para los ángulos de 9 y 10° debido a que hay una menor distancia entre ellos, quedando la desviación estándar de pendientes entre 0.157-0.156 y la desviación estándar de alturas entre 9.52-9.58, el valor esperado de esta superficie para pendientes es 0.062-0.068 y para alturas de 12.95-14.21.

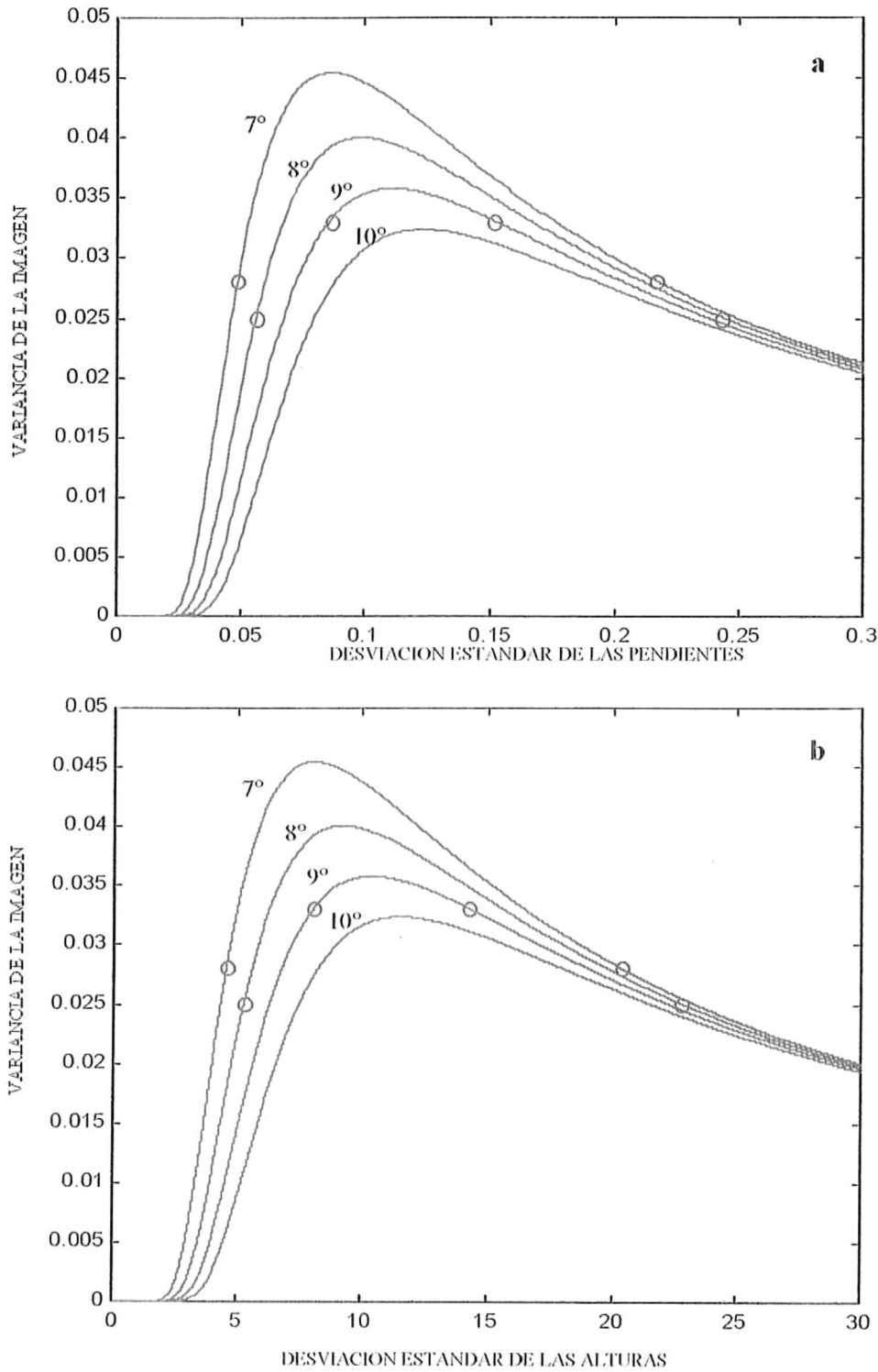


Figura 28. Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra a) desviación estándar de pendientes y b) desviación estándar de alturas de la superficie.

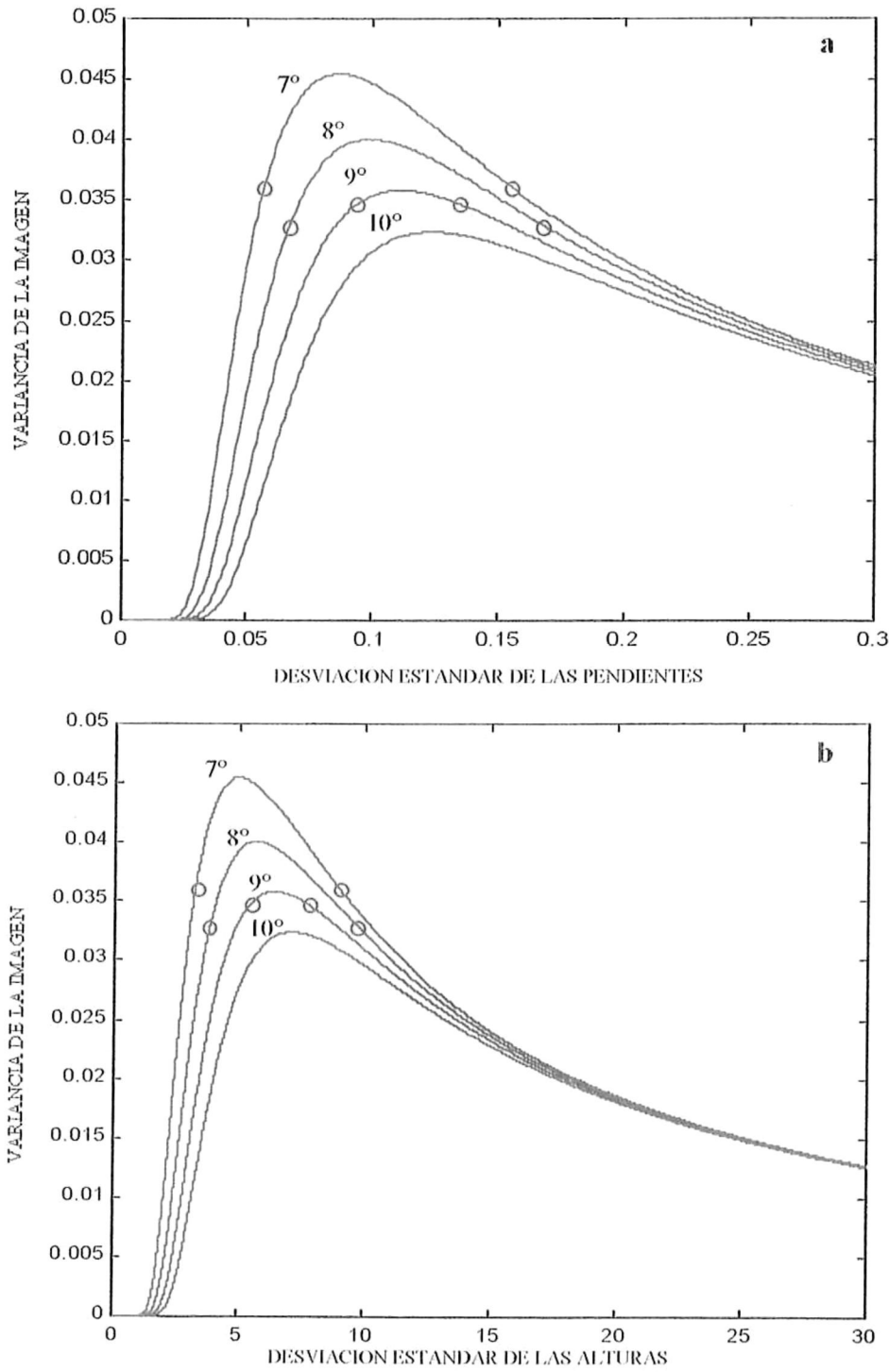


Figura 29. Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra a) desviación estándar de pendientes y b) desviación estándar de alturas de la superficie.

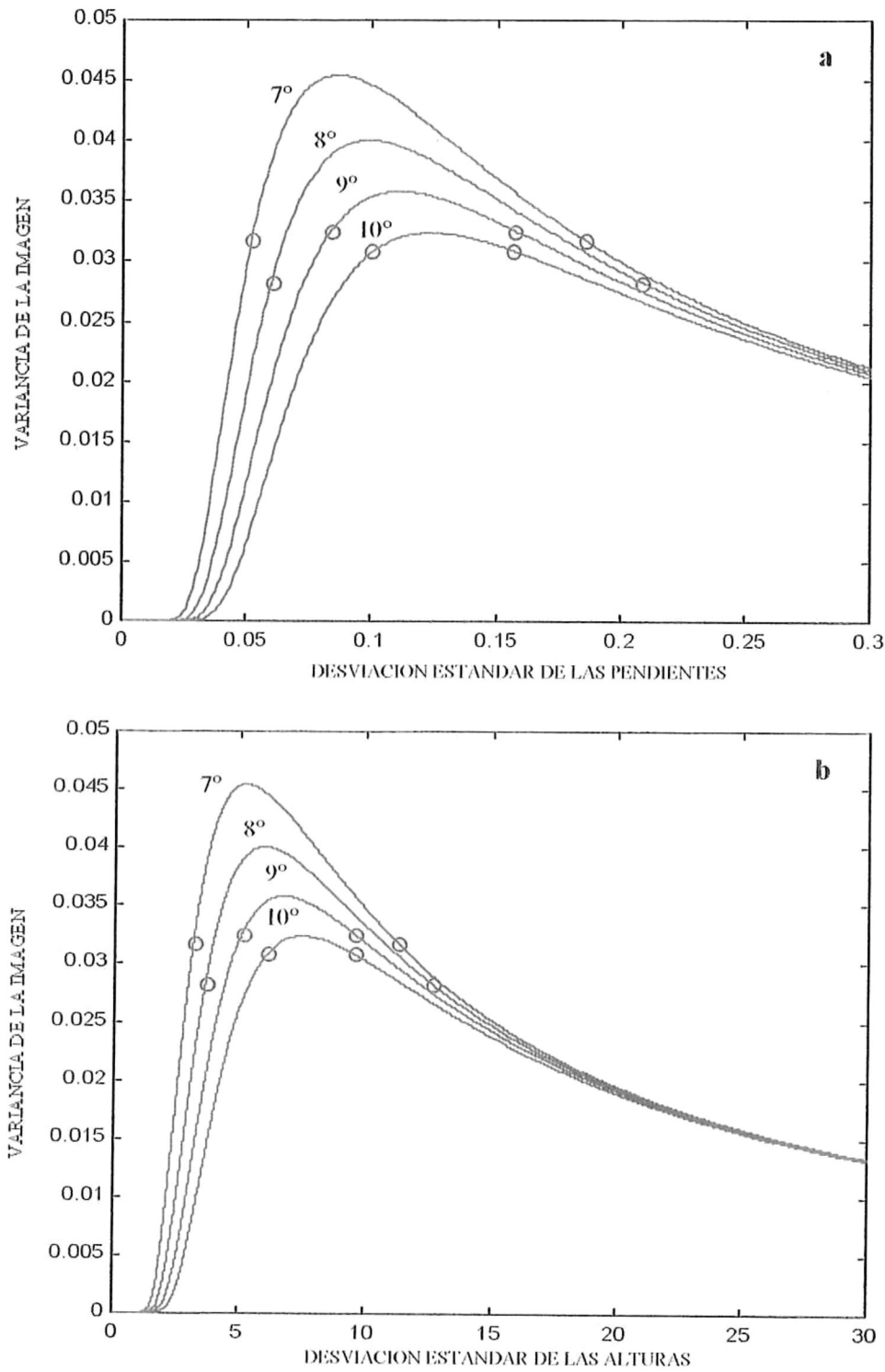


Figura 30. Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra a) desviación estándar de pendientes y b) desviación estándar de alturas de la superficie.

En la tabla III están los valores de desviación estándar de alturas con el que fueron creadas las superficies con el espectro Pierson-Moskowitz, así como los valores de desviación estándar de alturas y pendientes obtenidos numéricamente y con el perfilómetro.

Tabla III. Desviaciones estándar de las superficies con espectro Pierson-Moskowitz.

Desviación estándar de alturas				
a 95% de confianza				
Superficie	Teórico	Numérico	Perfilómetro	Modelo
Sup8	14	14.57-15.22	13.45-14.75	-----
Sup9	14	14.26-14.89	13.29-14.57	12.82-12.99
Sup11	14	15.25-16.01	12.05-13.22	6.50-9.39

Desviación estándar de pendientes			
a 95% de confianza			
Superficie	Numérico	Perfilómetro	Modelo
Sup8	0.093-0.099	0.043-0.047	-----
Sup9	0.104-0.109	0.061-0.068	0.096-0.097
Sup11	0.109-0.113	0.045-0.049	0.048-0.070

Las figuras 31, 32 y 33 corresponden a los resultados obtenidos para las relaciones entre la variancia de intensidad de la imagen, la desviación estándar de las pendientes superficie, la relación entre la variancia de intensidad de la imagen y la desviación estándar de las alturas de la superficies con el espectro Pierson-Moskowitz. En la figura 31, perteneciente a la primera superficie, solo concuerdan los valores de variancia de intensidad de la imagen en las curvas de 7° y 8°. Para las curvas de 9° y 10°

los valores no quedan dentro de las curvas, por lo que tenemos un problema, el valor correspondiente a 8° tiene un valor de variancia de intensidad mas alto que el valor para 7°, por lo que para esta superficie se puede decir que no hay suficientes elementos como para decidir entre uno u otro de los valores de desviación estándar de alturas.

En la segunda superficie concuerdan todos los valores dentro de las curvas. Tenemos que el valor de 7° es menor al de 8° y estos al de 9°, pero el de 10° es menor al de 9 por lo que se podría tomar los valores de 9 y 10 como los adecuados. Observando los valores, se puede apreciar que hay una distancia menor en los valores de la izquierda en las curvas, obteniéndose que la desviación estándar de las pendientes de la superficie queda entre 0.096-0.097 y la desviación estándar de las alturas está entre 12.82 – 12.99. El valor de desviación estándar esperado de las pendientes es 0.061-0.068 y el de las alturas es 13.29-14.57. En este caso el valor esperado de las alturas está muy cerca del intervalo obtenido, mientras que en las pendientes se encuentra un poco mas alejado.

En la figura 33, correspondiente a la tercera superficie, también concuerdan en las curvas todos los valores de variancia de intensidad. En este caso, el comportamiento de los valores es como se esperaría, donde a mayor grado la variancia de intensidad disminuye, observando que los valores de la izquierda se encuentran a una menor distancia que los de la derecha, por lo que para esta superficie tendríamos su desviación estándar de pendientes entre 0.048-0.070 y la desviación estándar de alturas se encuentra entre 6.50 – 9.39, el esperado para pendientes es 0.045-0.049 y para alturas 12.05-13.22. En esta caso las pendientes si quedan dentro del esperado y las alturas se encuentran cerca del intervalo.

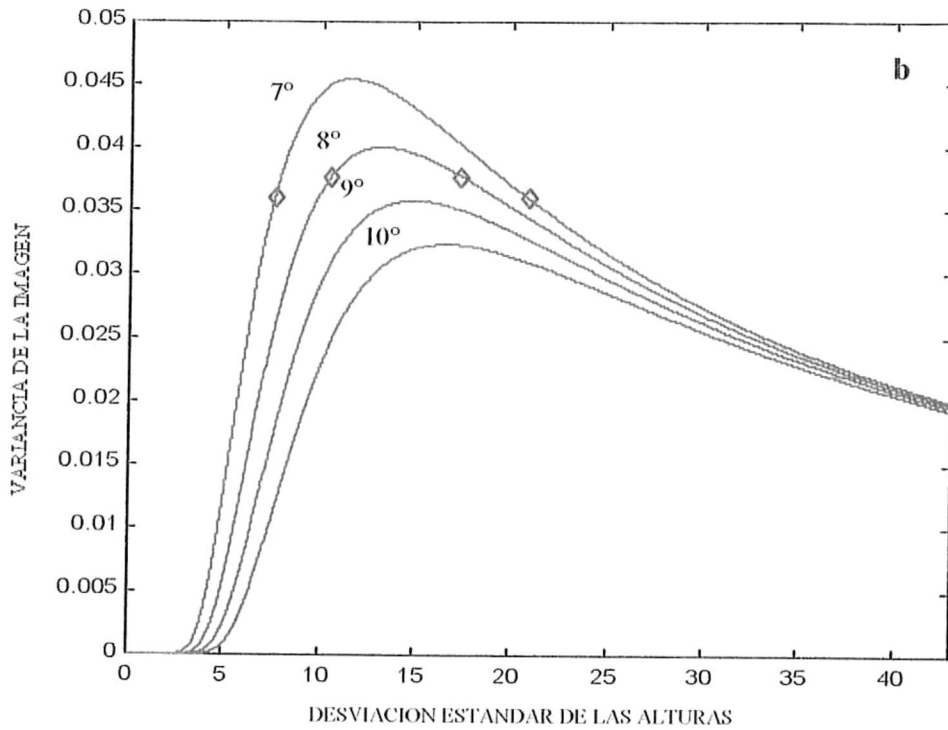
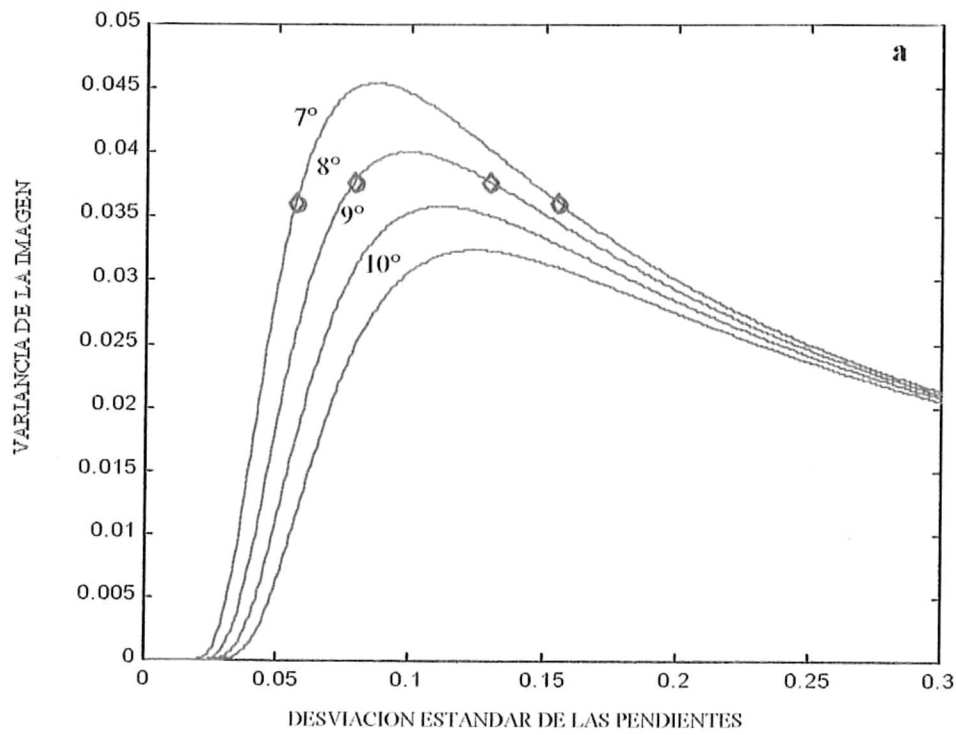


Figura 31. Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra a) desviación estándar de pendientes y b) desviación estándar de alturas de la superficie.

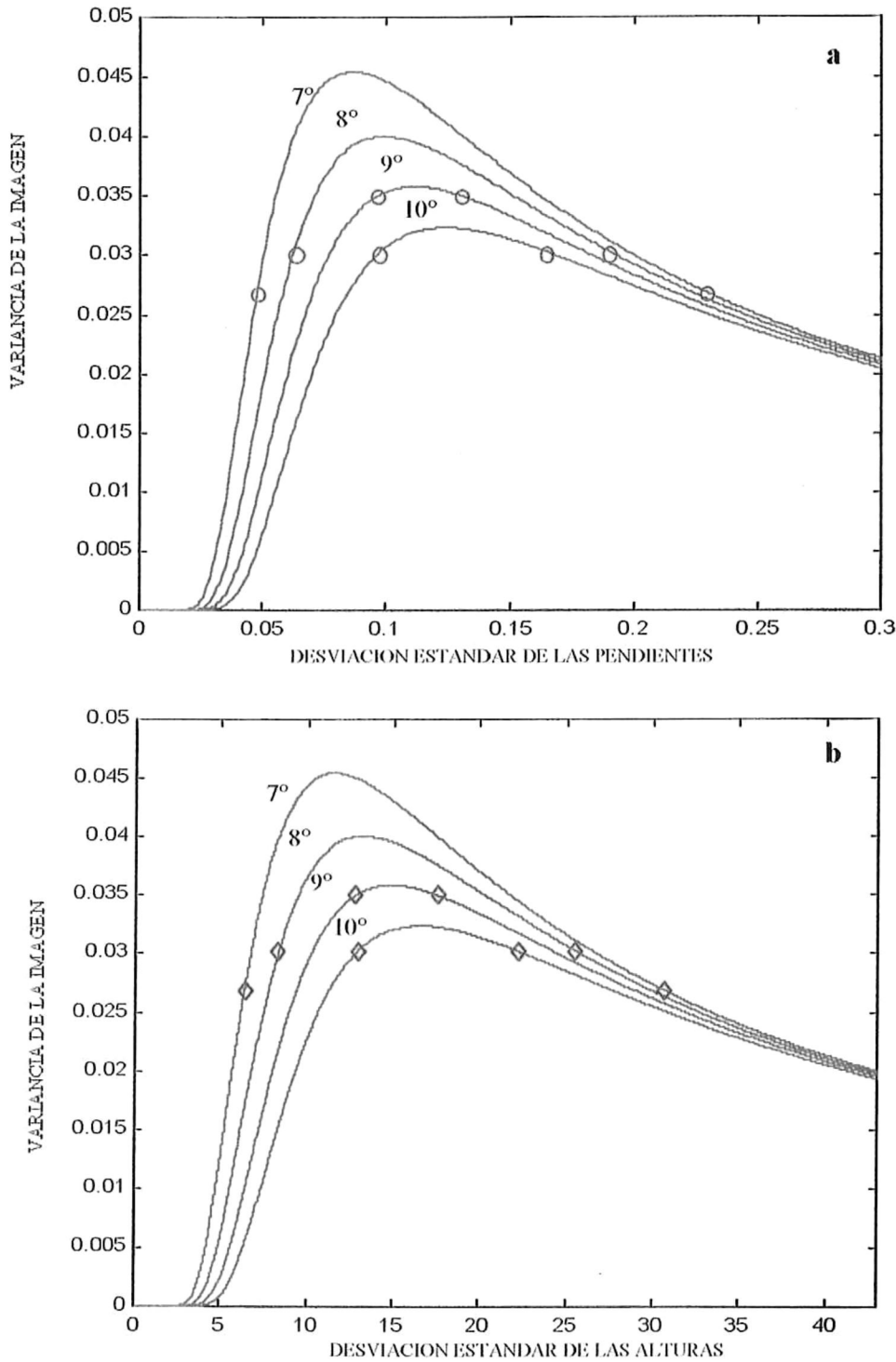


Figura 32. Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra a) desviación estándar de pendientes y b) desviación estándar de alturas de la superficie.

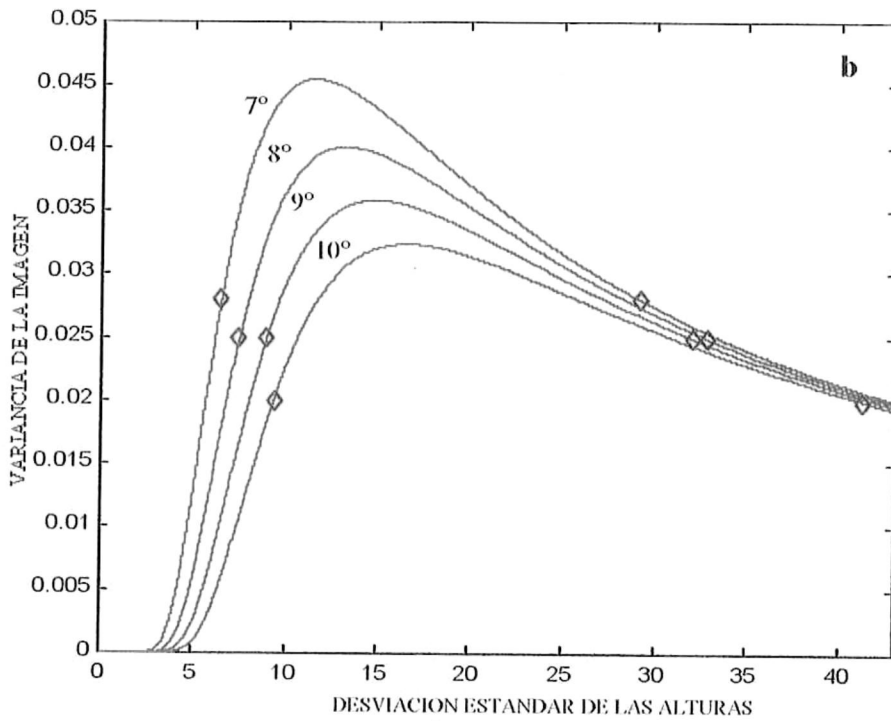


Figura 33. Relaciones entre variancia de la intensidad de la imagen contra a) desviación estándar de pendientes y b) desviación estándar de alturas de la superficie.

Los resultados obtenidos de desviaciones estándar de alturas de la superficies en los casos de espectro Gaussiano y espectro Pierson-Moskowitz tuvieron mejor concordancia con los valores esperados, a diferencia de los valores obtenidos de desviaciones estándar de pendientes de las superficies que no fueron tan semejantes a los esperados. Esto es debido a relación que existe entre las pendientes y las alturas (Ecuación 1), donde está involucrada una doble integral, pasando de la variancia de las pendientes a la variancia de las alturas, la doble integral sirve como un filtro, eliminando parte del ruido que se tenía en los valores de las pendientes.

VI. CONCLUSIONES

El método utilizado para la generación de las superficies grabadas en fotorresina, resultó ser eficiente para el caso espectro Gaussiano y el espectro Pierson-Moskowitz, llegándose a obtener un perfil similar al generado numéricamente. El único inconveniente fue que se obtuvo una pequeña rugosidad sobre el perfil, debido a la coherencia de la luz láser, por lo que sería recomendable poner un vidrio esmerilado en el sistema óptico que rompa la coherencia de la luz.

Las superficies generadas con un número mayor de valores de la serie original tuvieron un mejor ajuste a la estadística que se quería obtener.

El mayor problema que se tuvo fue que las pequeñas rugosidades en las superficies grabadas ocasionaron una gran variación en las correlaciones de pendientes de las superficies y estas a su vez nos generaron un patrón de brillo con mucho ruido.

Los parámetros estadísticos de las superficies generadas que se obtuvieron mediante el modelo tuvieron diferencias con los parámetros con los cuales fueron creadas las superficies, esto debido al error obtenido en la creación de las superficies y no a un error del modelo utilizado. Esto se puede apreciar porque aquellas superficies generadas que tenían menos ruido y son más similares a las numéricas, los parámetros obtenidos mediante el modelo son más similares a los generados.

VII. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Borrego, J. y M. A. Machado. 1985. Optical Analysis of simulated image of the sea surface, *Applied Optics*, 24(7) 1064-1072.
- Álvarez-Borrego, J. 1985. Discusión de dos métodos para analizar superficies marinas utilizando fotografías aéreas e imágenes SLAR, *Ciencias Marinas*, 11(2) 7-21.
- Álvarez-Borego, J. 1993. Determinación de propiedades estadísticas de superficies rugosas aleatorias a partir de imágenes remotas, Tesis Doctoral, CICESE, Ensenada B.C.
- Álvarez-Borrego, J. y A. Martínez. 1995. Statistics of rough surfaces via remote sensing An experiment, *Journal of Modern Optics*, 42(11) 2347-2355.
- Barber, N. F. 1949. A diffraction analysis of a photograph of the sea, *Nature*, 164, 485.
- Barber, N. F. 1954. Finding the direction of travel sea waves, *Nature*, 174, 1048-1050.
- Cox, C. y Munk, W. 1954. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter, *Journal of the Optical Society of America*, 44(11) 838-850.
- Cox, C. y Munk, W. 1954. Statistics of the sea surface derived from sen glitter, *Journal of Marine Research*, 13(2) 198-227.
- Cox, C. 1958. Measurements of slopes of high-frecuency wind waves, *Journal of Marine Research*, 16(2) 199-225.
- Kasevich, R.S. 1975. Direccional wave spectra-from daylight scattering, *Journal of Geophysics Research*, 80(33) 4535-4541.

- Marín-Hernández, M. y J. Álvarez-Borrego. 1999. First and second order statistics of rough random surfaces from remote sensing images considering a Gaussian glitter function, *Journal of Modern Optics*, 46(2) 211-226.
- Meillon-Menchaca O. 1995. Estudio del comportamiento especial del oleaje en la Bahía de Todos Santos B.C., mediante imágenes de superficies marinas, Tesis de Licenciatura, F.C.M.,UABC.
- Plass G.N. *et al.* 1997. Isophotes of sunlight glitter on a wind-ruffled sea, *Applied Optics*, 16(3) 643-653.
- Pepers, N. A. y J. S. Ostrem. 1978. Determination of wave slopes from photographs of the ocean surface: a new approach. *Applied Optics*, 17(21) 3450-3458.
- Pierson, W.J. y L. Moskowitz. 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*. 69(24) 5181-5190.
- Salazar M. D. 1989. Elaboración de películas delgadas en una evaporadora edwards 306, Reporte Técnico, CICESE, Departamento de Optica.
- Stilwell, D. Jr. 1969. Directional energy spectra of the spectra of the sea from photographs, *Journal of Geophysical Research*, 74(8) 1974-1986.
- Stilwell, D. Jr. y R. O. Pilon. 1974. Directional spectra of surface waves from photographs, *Journal of Geophysical Research*, 79(9) 1277-1284.
- Sugimori, Y. 1974. A study of the application of the holographic method to the determination of the directional spectrum of the ocean waves, *Deep-Sea Research*, 22, 339-350.

Thorsos, E.I. 1988. The validity of the Kirchoff approximation for rough surface scattering using a gaussian roughness spectrum, *Journal. Acoustic Society of America*, 83, 78-92.

Thorsos, E.I. 1990. Acoustic scattering from a Pierson-Moskowitz sea surface, *Journal Acoustic Society of America*, 88, 335-349.