



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

*Análisis estadístico de superficies rugosas aleatorias considerando  
la binarización de una función de brillo gaussiana*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE OCEAONÓLOGO

PRESENTA:

***HILDA LETICIA RAMÍREZ ZARAGOZA***

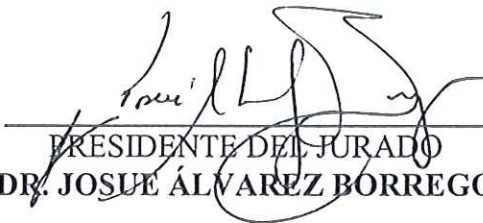
Ensenada; Baja California, Agosto de 2003

*ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SUPERFICIES RUGOSAS ALEATORIAS  
CONSIDERANDO LA BINARIZACIÓN DE UNA FUNCIÓN DE BRILLO  
GAUSSIANA*

TESIS  
QUE PRESENTA

HILDA LETICIA RAMÍREZ ZARAGOZA

APROBADA POR

  
PRESIDENTE DEL JURADO  
DR. JOSUÉ ÁLVAREZ BORREGO

  
SINODAL PROPIETARIO  
DR. RAFAEL HERNÁNDEZ WALLS

  
SINODAL PROPIETARIO  
DR. ADÁN MEJÍA TREJO

## RESUMEN

En estudios anteriores, se han realizado simulaciones numéricas para la generación de superficies rugosas aleatorias y el problema de obtener información de las propiedades estadísticas de superficies rugosas a partir de imágenes remotas, fue resuelto por Álvarez-Borrego en 1993, quien además valida sus resultados con resultados experimentales.

En el presente trabajo, para la parte experimental, se proporciona una descripción detallada del proceso de fabricación de superficies rugosas aleatorias, aunado a la realización de simulaciones generadas mediante una función analítica que describe el brillo producido cuando la luz proveniente de una fuente se refleja solo una vez en la superficie, se obtiene una imagen formada de regiones brillantes y oscuras que forman un patrón de brillo, el cual es codificado a dos niveles, asignando el valor de 1 a las regiones brillantes y 0 a las oscuras. Se trabajó con el ángulo que mejor se adecuaba a la geometría representada y con tres espectros diferentes (Gaussiano, Rect y Tri<sup>2</sup>), se obtiene una tendencia similar entre los datos teóricos y los del modelo, proporcionando así una eficacia del modelo. En el caso de la toma de imágenes, se recomienda un estudio minucioso de la posición del sol de acuerdo al lugar en donde se deseen las imágenes, dado que se presentan variaciones de luminosidad debido, ya sea a condiciones meteorológicas y a situación geográfica.

## AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California y a CICESE por las facilidades otorgadas para la presente investigación en el proyecto "Procesado de imágenes de partículas biogénicas y superficies marinas" referencia 6576.

Parte de éste trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) bajo el proyecto "Procesado automático de partículas biogénicas" referencia 36075-B.

Al Dr. Josué Álvarez Borrego por dirigir este trabajo, por sus sugerencias y comentarios, pero sobre todo por su paciencia.

Al Dr. Rafael Hernández Walls por detallar el trabajo, por sus acertados comentarios y su preocupación por el mismo, de igual manera por su paciencia.

Al Dr. Adán Mejía Trejo por sus comentarios, sugerencias, revisiones, paciencia, recomendaciones y apoyo para terminar este trabajo.

A la familia Ramírez Zaragoza por estar siempre ahí.

Al escuincle, por ser siempre mi cómplice.

A mi hermano y Edith, por su preocupación.

Al duende, por sus sonrisas y gritos.

Al Zon y a las familias Zaragoza por siempre recordarme y echarme porras.

A todos aquellos amigos y conocidos que me rodearon todo este tiempo. A los amigos que están a la distancia, pero no por eso dejan de ser grandes amigos. A ese "espíritu" aventurero y a ese maravilloso "mar".

A la familia Serrano López, mi querida familia ensenadense por su amistad, cariño y atenciones.

A quien me puso en este tiempo, espacio, momento y vida.

A todos aquellos que preguntaron ¿Para cuando?...al fin ahora.

## **DEDICATORIA**

**Con un cariño muy especial e ilimitado para**

**Mis "increíbles" papas.**

**Al escuincle, mi gran cómplice.**

**A la familia Ramírez Moreno y su duende.**

## INDICE

- INTRODUCCIÓN	1
- ANTECEDENTES	3
- OBJETIVOS	7
- METODOLOGÍA	8
Espectros utilizados	14
- RESULTADOS Y DISCUSIONES	19
Fabricación de Superficies y Procesos involucrados	19
Generación de Superficies	21
- CONCLUSIONES	30
- LITERATURA CITADA	31
- ÁPENDICE I	34
- ÁPENDICE II	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de la situación física del problema	9
Figura 2	Gráfica de la función Gaussiana y la función Rect	12
Figura 3	Esquema de los procesos aleatorios involucrados y su relación estadística	13
Figura 4	Gráfica de los tres procesos involucrados	21
Figura 5	Gráfica de la función Gauss	23
Figura 6	Gráfica de la función Rect	24
Figura 7	Gráfica de la función $\text{Tri}^2$	25
Figura 8	Carta solar cilíndrica	27
Figura 9	Posición del sol en diferentes latitudes	28

## INTRODUCCION

En la zona costera se presentan una serie de procesos físicos muy importantes y complejos; es ahí en donde se efectúan cambios drásticos en las condiciones que determinan el movimiento del océano, tal es el caso de la circulación superficial, que puede verse afectada por efectos como la marea, dirección y velocidad del viento, entre otros.

A partir de la necesidad de conocer la complejidad de los movimientos de la superficie del mar, surgen diversos estudios para estimar los parámetros que presenta el oleaje; de manera cuantitativa, se han empleado fotografías aéreas, imágenes de radar, sensores de presión, entre otros.

Los primeros intentos por predecir las características del oleaje fueron en los años 40's en las playas de Normandía. Posteriormente estos estudios se utilizaron con fines bélicos durante la Segunda Guerra Mundial (Negrete-Regagnon, 1988).

El uso de los sensores remotos ha contribuido en los esfuerzos por conocer el comportamiento de la superficie marina.

El uso de sensores de presión, imágenes de radar y fotografías aéreas nos ayudan a entender los mecanismos de generación de olas y sirven de apoyo en estudios para obras marítimas, aunque se presentan diferencias en algunos métodos ya que, en el caso de los sensores de presión, los datos que se obtienen son puntuales, en tanto que los métodos ópticos generan mediciones en escala espacial, siendo su procesamiento rápido y sencillo, aunado a una disminución en costos.

La información contenida en una fotografía de una superficie rugosa puede ser procesada por dos métodos, uno es mediante la digitalización de la imagen y el arreglo numérico resultante se procesa por algoritmos de computación conocidos (Procesado Digital de Imágenes) y el otro es mediante el procesamiento de la imagen fotográfica (negativo) directamente en un sistema óptico coherente (Álvarez-Borrego y Machado 1985) y a esto se le conoce con el nombre de Procesado Óptico de Información (POI).

El POI permite la implementación de funciones matemáticas como multiplicación, transformadas de Fourier, convoluciones y correlaciones mediante un sistema óptico que

involucra láser, lentes y filtros.

Las señales en un sistema óptico son en forma de distribuciones de amplitud de luz en planos perpendiculares a los ejes ópticos. Las señales de entrada deben ser variaciones de transmisión óptica en un plano (negativo fotográfico). Por lo que una señal puede variar punto por punto en un plano y depende por tanto, de dos coordenadas y es justamente ésta característica bidimensional una ventaja sobre los sistemas electrónicos que están limitados a una sola coordenada (generalmente tiempo). Cabe mencionar que las fotografías pueden ser procesadas como un todo.

Al tener la simulación, la cual se generó mediante una función analítica que describe el brillo producido cuando la luz que proviene de la fuente se refleja sólo una vez en la superficie y después de aplicar diversos algoritmos complementarios, se obtiene una imagen formada de regiones brillantes y oscuras que forman un patrón de brillo. Este patrón de brillo, es codificado en dos niveles, en base al intervalo adecuado de intensidades posterior al análisis del histograma de las mismas, asignando valores de 1 a regiones brillantes y 0 a las oscuras.

Una vez obtenido el patrón de brillo, se puede conocer la estadística de alturas de la superficie.

## ANTECEDENTES

El primer parámetro óptico medido en la superficie del mar, fue la irradiancia de la luz, posteriormente se efectuaron mediciones de irradiancia espectral a diferentes profundidades.

En los años 30's se realizaron mediciones de transmitancia y dispersión de luz a diferentes profundidades, estas investigaciones ayudan a entender la distribución de las partículas y a su vez dan información sobre los flujos turbulentos debajo de la superficie del mar. En los 40's se realizaron los primeros intentos por predecir las características del oleaje, estos estudios se utilizaron con fines bélicos durante la Segunda Guerra Mundial.

Duntley (1950) realizó un estudio de ondas capilares midiéndolas *in situ* mediante un par de alambres sumergidos, encontró que las pendientes de las olas capilares, tanto las pendientes en dirección a la del viento ( $\zeta^u_{\pi}$ ) como la perpendicular a la dirección del viento ( $\zeta^c_{\pi}$ ), tienen una distribución normal y son estadísticamente independientes.

En 1954, Barber estimó la dirección de las olas a partir del patrón de difracción de una imagen de la superficie del mar; en tanto que Cox y Munk (1954a, 1954b), analizaron la estadística de las pendientes de la superficie del mar derivadas de las reflexiones especulares de la luz sobre la superficie, las cuales fueron grabadas en fotografías aéreas, encontraron que la distribución de pendientes es Gaussiana.

Posteriormente, en 1956, Cartwright y Longuet-Higgins consideran la distribución estadística de las alturas de las crestas sobre la superficie marina, como un número infinito de ondas seno, lo que los llevó al análisis de las condiciones de mares desarrollados, con espectros de banda ancha (Silvester, 1974).

Cox, en 1958, realizó mediciones de pendientes de olas capilares en laboratorio, encontró un comportamiento complicado de la varianza de las pendientes, en función de la velocidad del viento. Posteriormente, Stilwell en 1969, utilizó un sistema óptico coherente para analizar una fotografía de la superficie del mar, derivó una ecuación que relaciona la intensidad de la luz proveniente de la fuente, con la intensidad de la película fotográfica utilizando algunas suposiciones.

Pierson en 1962, con estudios de espectros de energía en circuitos eléctricos, estimó el tipo de datos necesarios para generar una relación entre el viento y la altura de las olas. Simultáneamente Newman formulaba espectros de energía de oleaje a partir de observaciones, como función de los parámetros de velocidad y duración del viento, al igual que de fetch. Lo anterior, aunado a la suposición de una distribución gaussiana para las elevaciones del mar, permiten ir desarrollando la predicción de oleaje basada en procesos estocásticos.

Seguido de esto, se desarrolla el método P-N-J (Pierson-Newmann-Johnson) de predicción de oleaje basado en las formas espectrales de éste y posteriormente el espectro de densidad de energía teórica, conocido como espectro direccional de Neumann.

Pierson y Moskowitz utilizaron información de registro de oleaje y cartas sinópticas para probar la teoría de similaridad propuesta por Kataigorodoski en 1961. De esta forma la variable de la velocidad del viento es adimensionalizada y se obtiene la forma espectral quasi-universal. La ecuación de la forma espectral que se obtuvo después de varias pruebas estadísticas y que está en función de la velocidad del viento se conoce como el espectro teórico de Pierson-Moskowitz.

En 1971, Kasevich, continuó con el trabajo de Stilwell, consideró términos de segundo orden de la ecuación y concluyó que hay una relación entre la orientación y la altura de la cámara, con la distribución de irradiancia.

Investigaciones realizadas por Stilwell (1974) y Sugimori (1975), donde utilizan fotografías de la superficie del mar, obtienen un espectro óptico dibimensional, aunque estos espectros están mas relacionados con las pendientes de las elevaciones que con las alturas del oleaje mismo. Lo anterior es debido a que las variaciones de intensidad de luz que llega a la cámara fotográfica, es causada por la reflexión en las pendientes de la ola.

Plass, *et. al.* (1977), puntualizaron que la velocidad del viento y el ángulo de elevación de la cámara, influyen en las reflexiones especulares de la luz sobre la superficie del mar.

Peppers y Ostren (1978), proponen un modelo para determinar las pendientes de las ondas a partir de fotografías.

Chapman e Irani (1981) reportan errores involucrados al estimar el espectro de pendientes de la superficie del mar mediante fotografías y afirman que no es posible considerar una relación lineal entre el espectro de pendiente de onda y el espectro de la imagen obtenida en un sistema óptico coherente o digital.

El problema común a todos los trabajos mencionados es que, los varios modelos propuestos no pudieron ser validados con datos experimentales. Esto es debido a que se tiene muy poca información de la superficie marina estudiada.

En 1985, Álvarez-Borrego y Machado, implementaron un modelo numérico en computadora en el cual generaron superficies marinas de espectro teórico Pierson-Neumann y asociaron valores de intensidad de luz a valores de elevaciones. Realizaron un análisis cualitativo de su espectro óptico.

En 1986, Preisendorfer y Mobley, realizaron simulaciones numéricas de superficies del mar, incluyendo reflexiones de luz solar directa y difusa, obtuvieron imágenes con el patrón de brillo incluido.

Negrete-Regagnon y Álvarez Borrego en 1989, utilizan simulaciones de superficie marina grabada en película, aplican y comparan técnicas de procesado digital y óptico de imágenes, con un filtraje espacial de frecuencias (filtros espaciales para un sistema óptico de transformada doble de Fourier), para caracterizar las respuestas de sistema óptico. Obtienen resultados similares.

Posteriormente en 1990, Valenzuela-Rodríguez y Álvarez-Borrego utilizaron el espectro Roll-Fisher para la generación de una superficie del mar y analizaron el comportamiento de la curva de autocorrelación en la dirección del viento y perpendicular a ella.

Álvarez-Borrego (1993), utiliza el teorema de van Cittert-Zernike para obtener una función de brillo bidimensional descrita por una función circular 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, considera la pendiente de la superficie y la óptica geométrica. Obtiene una relación numérica entre la

correlación de altura de la superficie y la autocorrelación de las variaciones de intensidad en la imagen fotográfica.

Álvarez-Borrego y Martínez-García (1995), describen el proceso de la fabricación de superficies rugosas aleatorias. Comparan resultados teóricos con resultados experimentales de la fabricación de superficies y ambos resultados concuerdan.

Marín-Hernández, en 1997, emplea la metodología descrita por Álvarez-Borrego (1993) con una función Gaussiana y encontró que es posible obtener una relación analítica en las ecuaciones, pese a que los valores obtenidos en las distintas geometrías, fueron muy pobres y además, se encontró con el problema de rango de valores de grises en la imagen al utilizar la función de brillo Gaussiana.

En 2000, Marín-Hernández utiliza 2 espectros, el gaussiano y el de Pierson-Moskowitz para simulación de oleaje en una y varias escalas respectivamente y obtiene estadísticas de segundo orden de las alturas de la superficie y de las pendientes de la superficie y concluyen que es posible obtener las propiedades estadísticas de la superficie a partir de los patrones de brillo.

La dinámica de la superficie marina es muy importante, ya que nos permite determinar su influencia sobre la capa superficial de mezcla y la línea de costa.

La relevancia de éste trabajo es la de contribuir en el conocimiento del estudio de oleaje mediante el procesamiento de imágenes remotas de la superficie del mar. Esto es de importancia, ya que las aplicaciones de este tipo de técnicas son indiscutibles.

## OBJETIVOS

### GENERAL

El objetivo de este trabajo es comprobar si al binarizar las imágenes remotas simuladas por computadora mediante una función de brillo Gaussiana, es posible determinar las estadísticas de primer y segundo orden de superficies de una escala.

### PARTICULARES

- Generar superficies unidimensionales de una escala que contengan distintos espectros: Gaussiano, Rect y Tri<sup>2</sup>.
- Obtener las funciones de correlación de las alturas de las superficies rugosas a partir de las funciones de correlación de las variaciones de intensidad de la imagen.

## METODOLOGÍA

Se presenta a continuación una descripción de la situación física del problema seguido de un esquema que lo representa. El proceso que se empleará en el presente trabajo es iluminar la superficie con una fuente parcialmente coherente y uniforme de extensión angular  $\sigma$  y de longitud de onda  $\lambda$  (Fig. 1).

La imagen se formará mediante un sistema óptico libre de aberraciones en el plano de la cámara.

Cabe mencionar que aquí están involucrados tres procesos aleatorios: el perfil, la pendiente y la imagen de la superficie. Se presentan las ecuaciones que relacionan en forma directa las funciones de correlación para los tres procesos antes mencionados.

Se define una función de brillo, la cual describe la formación de los patrones de brillo que constituyen la imagen y que relaciona las pendientes de la superficie con los patrones de brillo que forman la imagen.

El patrón de brillo obtenido, se codificará en una señal de dos niveles; con valores de unos y ceros, para puntos brillantes y oscuros respectivamente. La codificación se realizará a partir del valor  $e^{-1}$  de la función de brillo Gaussiana, el cual corresponde al ancho de la fuente de luz.

Para el caso unidimensional, es decir, cuando la superficie sólo tiene variaciones de altura en una dirección, estas variaciones estarán representadas por  $\zeta(x)$ , que representa una realización de un proceso aleatorio Gaussiano estacionario.

El patrón de brillo que forma la imagen está determinado por la superficie misma y por la función de brillo que se puede calcular de las posiciones y los diámetros aparentes de la fuente y el detector. La función de brillo opera sobre las pendientes y a través de ella, se puede encontrar la ubicación espacial y la extensión de los brillos.

El ángulo de incidencia,  $\theta_s$ , se define como el ángulo entre la dirección de incidencia de la luz y la normal a la superficie promedio;  $\theta_d$ , es el ángulo promedio que subtende el sistema óptico de detección con la normal a la superficie promedio y  $\beta$  es el diámetro aparente de la fuente.

La luz de la fuente es reflejada sólo una vez en la superficie y, dependiendo de la pendiente, esta luz, contribuirá o no a la imagen de la superficie, por lo tanto, la imagen está formada por regiones brillantes o oscuras, y éstas a su vez, forman, el patrón de brillo.

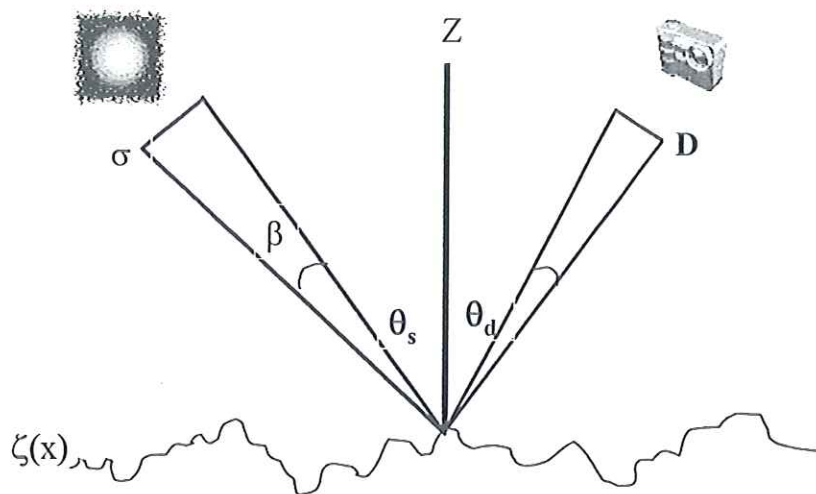


Fig. 1. Esquema de la situación física del problema.

Para obtener información de la estadística de las variaciones de altura de la superficie rugosa, deben primero definirse ciertas variables. La superficie sólo tiene variaciones de altura en una dirección y dichas variaciones están representadas por la función  $\zeta(x)$ . Supondremos a lo largo de este trabajo que  $\zeta(x)$  representa un proceso aleatorio Gaussiano estacionario con una función de correlación denotada por  $\sigma_\zeta^2 C_\zeta(\tau) = \langle \zeta(x+\tau)\zeta(x) \rangle$  y una varianza  $\sigma_\zeta^2$ .

La pendiente o derivada de la superficie, se representa por  $\Pi(x)$ . Esta tiene una función de correlación denotada por  $\sigma_\Pi^2 C_\Pi(\tau) = \langle \Pi(x+\tau)\Pi(x) \rangle$  y una varianza  $\sigma_\Pi^2$ .

Con las suposiciones anteriores, la relación entre la función de correlación del perfil,  $C_\zeta(\tau)$ , y la de su derivada,  $C_\Pi(\tau)$ , está dada por (Papoulis, 1981)

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

Además de lo anterior y de la teoría de procesos aleatorios, se tiene que el proceso aleatorio  $\Pi(x)$ , que representa las pendientes de la superficie, es un proceso aleatorio Gaussiano. Por lo tanto, la función de densidad de probabilidad conjunta de las pendientes para dos diferentes posiciones,  $x_1$  y  $x_2$ , está dada por (Davenport y Root, 1958).

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

donde,  $\Pi_1$  y  $\Pi_2$  corresponden respectivamente a  $\Pi(x_1)$  y  $\Pi(x_2)$ .

Como se mencionó anteriormente, nuestro análisis involucra tres procesos aleatorios: el perfil de la superficie,  $\zeta(x)$ , sus pendientes,  $\Pi(x)$ , y la imagen,  $i(x)$ . Cada proceso tiene una función y como se mostró anteriormente las tres funciones están relacionadas entre sí. Cabe mencionar que el proceso  $i(x)$  no es estacionario, y sus propiedades estadísticas son función de la posición  $x$ .

La no estacionaridad de  $i(x)$ , sin embargo puede evitarse si se considera un plano de observación lejano y se restringe el campo de visión, por lo que, para este caso y con las consideraciones anteriores, se tiene una 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 una varianza  $\sigma_i^2$ .

El patrón de brillo, que son las regiones brillantes y oscuras que se forman en la imagen, está determinado por la superficie misma y por la función de brillo. Esta se

calcula de las posiciones y los diámetros aparentes de la fuente y del detector. La función de brillo opera sobre las pendientes y se denotará por  $B[\Pi(x)]$ ; y a través de ella, se puede encontrar la ubicación espacial y la extensión de los brillos.

La relación entre la función de correlación de las alturas de la superficie,  $C_\zeta(\tau)$ , y la función de correlación de las pendientes de la superficie,  $C_\Pi(\tau)$ , está denotada por la ecuación (1) y la relación entre las pendientes de la superficie,  $C_\Pi(\tau)$ , y la función de correlación de la imagen,  $C_i(\tau)$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_\zeta^2 C_i(\tau) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{B(\Pi_1)B(\Pi_2)}{2\pi\sigma_n^2 [1 - C_\Pi^2(\tau)]^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{\Pi_1^2 + \Pi_2^2 - 2C_\Pi(\tau)\Pi_1\Pi_2}{2\sigma_n^2 [1 - C_\Pi^2(\tau)]}\right] d\Pi_1 d\Pi_2 \quad (3)$$

Al evaluar esta ecuación, se obtiene la relación entre los valores que adquiere la función de correlación de imagen ( $\sigma_\zeta^2 C_i(\tau)$ ) y de pendientes ( $\sigma_\zeta^2 C_\Pi(\tau)$ ).

La función de brillo ( $B(\Pi)$ ) se define de la siguiente manera: (Álvarez-Borrego, 1993, 1995)

$$B(\Pi) = \text{rect}\left(\frac{\Pi - \Pi_0}{(1 + \Pi_0^2)\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \quad (4)$$

En donde:

$$\Pi_0 = \tan\left(\frac{\theta_s - \theta_d}{2}\right) \quad \text{y} \quad \Pi = \tan(\alpha)$$

$\alpha$  es el ángulo entre el eje  $x$  y la superficie.

Para este trabajo, se utilizó una función de brillo Gaussiana que después se aplica al modelo para obtener la imagen, se binarizó de la figura 3, en donde se presenta una gráfica

de la función de brillo gaussiana empleada en el presente trabajo, respecto a la función rect empleada por Álvarez Borrego (1993).

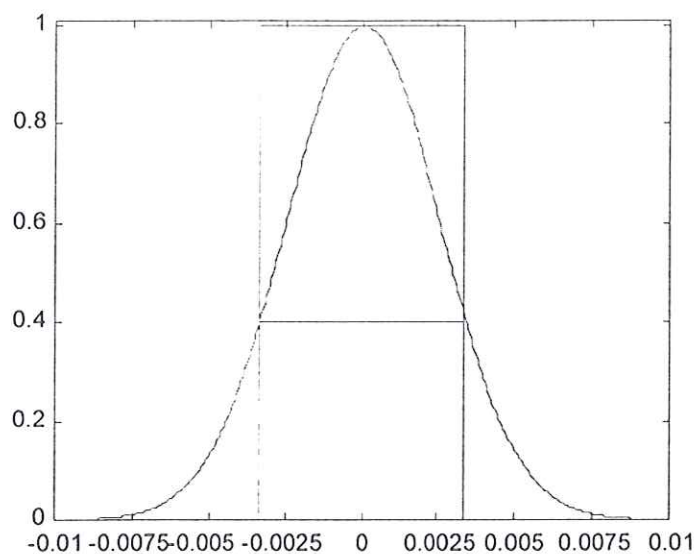


Fig. 2. Gráfica de la función Gaussiana y la función Rect.

Para llevar a cabo el proceso de inversión utilizando las dos expresiones antes descritas (ecuaciones 1 y 3), se deben cumplir ciertas condiciones. Entre otras, se requiere que exista una correspondencia uno a uno entre las cantidades involucradas.

Utilizando la expresión (1), los datos procesados se pueden integrar numéricamente dos veces, de tal manera que se obtenga información de la función de correlación de las alturas de la superficie,  $C_\zeta(\tau)$ , a partir de la función de correlación de las pendientes,  $C_\Pi(\tau)$ .

La ecuación 3, es una expresión mas complicada, de la cual no se puede obtener una relación analítica. En este caso es posible obtener por integración numérica una relación entre los valores  $C_i$  que toma la función de correlación de la imagen  $C_i(\tau)$  y los valores de  $C_\Pi$  que toma la función de correlación de las pendientes de la superficie,  $C_\Pi(\tau)$ .

Esquemáticamente los procesos involucrados pueden resumirse de la siguiente manera:

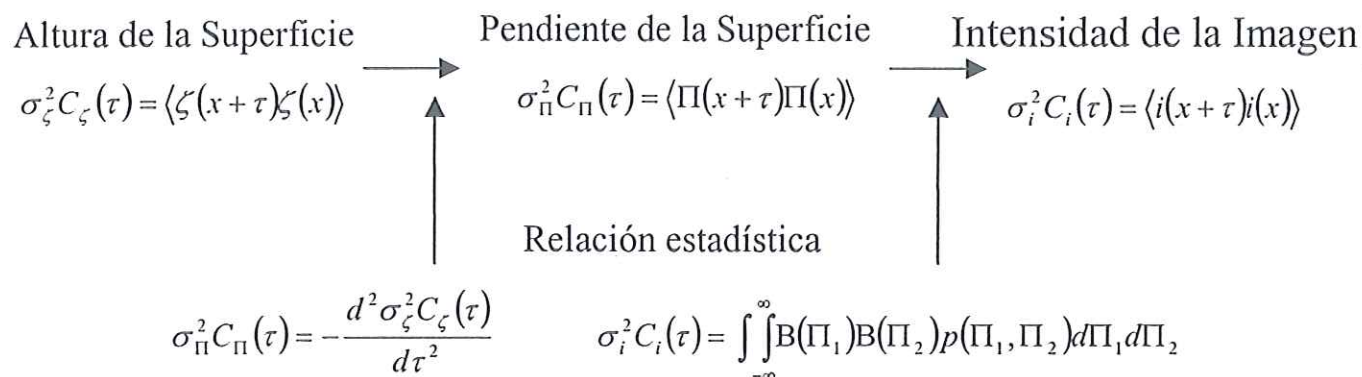


Fig. 3. Esquema de los procesos aleatorios involucrados y su relación estadística.

### Espectros utilizados

Para obtener superficies numéricas con estadística conocida, se utilizó la técnica de Montecarlo. Se generaron superficies unidimensionales mediante una función de brillo Gaussiano con diferentes espectros (Gaussiano, Rect y Tri<sup>2</sup>).

A continuación se presentan las diferentes definiciones de cada uno de los espectros empleados en el presente trabajo.

Sean  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  las ecuaciones de los espectros Gaussiano, Rect y Tri<sup>2</sup> respectivamente:

$$S_1(K_x) = l\sqrt{\pi}\sigma_\zeta^2 \exp\left(-\frac{K_x^2 l^2}{4}\right) \quad , \quad (5)$$

$$S_2(K_x) = l\sigma_\zeta^2 \text{rect}(lK_x) \quad , \quad (6)$$

$$S_3(K_x) = l\sqrt{\pi}\sigma_\zeta^2 \text{tri}^2(lK_x) \quad , \quad (7)$$

donde  $l$  es la longitud de correlación,  $K_x$  es el número de onda y  $S$  es la función de densidad espectral.

Para poder entender mas claramente la función tri<sup>2</sup>(x), se presenta en seguida la definición de la función tri(x) como:

$$\text{tri}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) = 0 \quad \text{para} \quad \left|\frac{x-x_0}{b}\right| \geq 1$$

$$\text{tri}\left(\frac{x-x_0}{b}\right) = 1 - \left|\frac{x-x_0}{b}\right| \quad \text{para} \quad \left|\frac{x-x_0}{b}\right| < 1$$

Las funciones de correlación correspondientes a cada uno de los espectros anteriores son:

$$C_{\zeta_1}(\tau) = \sigma_{\zeta}^2 \exp\left(-\frac{\tau^2}{l^2}\right) \quad (8)$$

$$C_{\zeta_2}(\tau) = \sigma_{\zeta}^2 \operatorname{sinc}\left(\frac{\tau}{l}\right) \quad (9)$$

$$C_{\zeta_3}(\tau) = \frac{3l^2\sigma_{\zeta}^2}{10\tau^2} \left[ 1.0 - \operatorname{sinc}\left(\frac{2\sqrt{5}\tau}{l\pi}\right) \right] \quad (10)$$

donde:

$\operatorname{sinc}(x) = [\sin(\pi x)] / \pi x$  y  $\tau$  es la variable que denota el corrimiento entre los puntos de la superficie.

Las funciones de densidad espectral y las funciones de correlación, están relacionadas respectivamente por el siguiente par de transformadas de Fourier:

$$S(u) = \int_{-\infty}^{\infty} C(x) \exp(-iux) dx \quad (11)$$

$$C(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(u) \exp(iux) dx$$

Ahora bien, la función de densidad espectral  $S(u)$  se puede definir como:

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

donde:

$$\hat{\zeta}(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(x) \exp(-iux) dx \quad (12)$$

Se utilizaron los espectros definidos en  $S_1(K_x)$ ,  $S_2(K_x)$  y  $S_3(K_x)$ , debido a que sus respectivas funciones de correlación son fáciles de obtener mediante una transformada de Fourier y así, las comparaciones entre los procesos de inversión, las simulaciones y las fórmulas analíticas pueden realizarse mas fácilmente.

El promedio de la imagen  $\mu_i$ , puede escribirse

$$\mu_1 = \langle i(x) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\Pi) p(\Pi) d\Pi \quad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior las expresiones  $B(\Pi)$  (función de brillo definida por la ecuación 4) y  $p(\Pi)$  (función de densidad de probabilidad en una dimensión se tiene que:

$$\mu_i = \langle i(x) \rangle = \frac{1}{\sigma_{\Pi} (2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect} \left( \frac{\Pi - \Pi_0}{(1 + \Pi_0^2)^{1/2}} \right) \exp \left( -\frac{\Pi^2}{2\sigma_{\Pi}^2} \right) d\Pi. \quad (14)$$

De lo anterior, se definirá, para simplificar:

$$a = \Pi_0 - (1 + \Pi_0^2)^{1/2} (\beta/4),$$

$$b = \Pi_0 + (1 + \Pi_0^2)^{1/2} (\beta/4).$$

La ecuación 14, puede entonces escribirse de la siguiente manera:

$$\mu_i = \langle i(x) \rangle = \frac{1}{2} \left[ \text{erf} \left( \frac{b}{\sqrt{2}\sigma_{\Pi}} \right) - \text{erf} \left( \frac{a}{\sqrt{2}\sigma_{\Pi}} \right) \right] \quad (15)$$

La función  $erf(x)$  se define como:

$$erf(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

La varianza de las intensidades en la imagen,  $\sigma_i^2$ , se define como:

$$\sigma_i^2 = \langle i^2(x) \rangle - \langle i(x) \rangle^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [B(\Pi) - \mu_i]^2 p(\Pi) d\Pi. \quad (16)$$

y considerando que  $B(\Pi) = B^2(\Pi)$ , entonces  $\langle i^2(x) \rangle = \langle i(x) \rangle$ . Entonces, la ecuación 16 puede escribirse de la siguiente manera:

$$\sigma_i^2 = \langle i(x) \rangle - \langle i(x) \rangle^2 = \mu_i(1 - \mu_i) \quad (17)$$

Ahora, sustituyendo la expresión  $\langle i(x) \rangle$  en la ecuación del promedio de la imagen (15) y a su vez en la ecuación anterior (17), se llega a la ecuación requerida entre la varianza de la imagen ( $\sigma_i^2$ ) y la varianza de las pendientes ( $\sigma_{\Pi}^2$ ), que es la que se muestra a continuación:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2} \left[ erf\left(\frac{b}{\sqrt{2}\sigma_{\Pi}}\right) - erf\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma_{\Pi}}\right) - \left[ \frac{1}{2} \left( erf\left(\frac{b}{\sqrt{2}\sigma_{\Pi}}\right) - erf\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma_{\Pi}}\right) \right) \right]^2 \right] \quad (18)$$

La relación entre  $\sigma_{\Pi}^2$  y  $\sigma_{\zeta}^2$  puede ser derivada de

$$C_{\Pi}(\tau) = -\frac{d^2 C_{\zeta}(\tau)}{d\tau^2} \quad (19)$$

si conocemos la función de correlación de las alturas de la superficie.  $C_{\zeta}(\tau)$  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.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### **Fabricación de Superficies y procesos involucrados.**

A continuación se describe brevemente el proceso de fabricación de superficies rugosas aleatorias.

En un sustrato (cristal circular plano y completamente liso) libre de partículas de polvo, se deposita una fotorresina, la cual es sensible a luz blanca, bajo ciertas condiciones y posteriormente se hornea para obtener así un sustrato con la fotorresina ya fija y ser utilizado en el proceso de exposición.

Para comenzar el proceso de exposición del sustrato, inicialmente se recubre la parte opuesta a la capa de fotorresina, con pintura negra, para evitar múltiples reflexiones de luz. Cabe mencionar que la técnica aquí empleada es una variación de la descrita por Gray (1978). Se monta un sistema óptico sencillo, el cual involucra un láser He-Cd, un difusor, la placa de fotorresina y ocasionalmente se utilizó un scan para variar automáticamente la posición del difusor y generar un patrón más aleatorio aún. Se hace incidir el haz de luz del láser sobre la placa cubierta con fotorresina y al cabo de cierto tiempo, se obtiene en la placa, un patrón de granulado el cual se detectará mas fácilmente una vez revelada la placa.

Una superficie con función de densidad de probabilidad Gaussiana de alturas puede obtenerse al exponer repetidamente la placa fotosensitiva a patrones de granulado estadísticamente independientes (Álvarez Borrego y Martínez García, 1995). En nuestro caso, las exposiciones fueron producidas con luz de un láser He-Cd (Liconix 4240 NB) con una longitud de onda de  $0.442 \mu\text{m}$ .

Se realizaron varios experimentos en los cuales los patrones de granulado se cambiaban regularmente para cada superficie, variando desde 2 min., hasta 28 min., en 10 ocasiones, hasta obtener una superficie con las características adecuadas.

Cabe mencionar que esta parte experimental es la mas larga e importante, ya que se requiere tener tiempos de exposiciones largos. También es importante considerar que, cada fotorresina actúa de manera particular dependiendo de sus características (Ramírez

Zaragoza y Álvarez Borrego, 1998), por lo cual es conveniente tener un buen registro del tiempo de exposición o hacer experimentos preliminares para determinar el tiempo de exposición adecuado con la finalidad de lograr una rugosidad específica. Es precisamente en esta etapa donde se invirtió más tiempo, ya que, inicialmente se tenía problemas con una no uniformidad del haz de luz, una vez detectado y corregido el problema, se realizaron experimentos variando la distancia entre el difusor y el sustrato, así como el tiempo de exposición, hasta que se logró una superficie con las estadísticas adecuadas.

En el proceso de revelado de la placa, se coloca ésta en un recipiente con una proporción ya definida del revelador, que debe ser el adecuado a la fotorresina que se empleó en el depósito, y agua destilada. Se agita durante determinado tiempo para enseguida enjuagar abundantemente con agua y finalmente dejarla por unos minutos en agua destilada para que fije completamente para después secarla a temperatura media.

Para terminar el proceso de fabricación, finalmente se procede a aluminizar el sustrato que ya ha tenido que haber pasado por todos los procesos mencionados anteriormente. Aquí, se deposita una película delgada de aluminio mediante una técnica de evaporación térmica al vacío, descrita por Salazar M. (1989) en un sistema Edwards 306, este proceso consta de 3 etapas hasta finalmente obtener un sustrato cubierto por una delgada capa de aluminio, el cual, altera las propiedades físicas y ópticas de la superficie rugosa.

Para la obtención de los patrones de brillo de las superficies generadas, es necesario montar otro sistema óptico en el cual se simule una situación real. Aquí, un haz de luz blanca es dirigido al sustrato ya aluminizado, para posteriormente capturar la imagen en un detector CCD para su posterior procesamiento. Dependiendo de la distribución de pendientes que se tenga en el sustrato, el haz de luz, será reflejado o no hacia el detector, y contribuirá o no a la formación del patrón de brillo.

La parte realizada en laboratorio, se reporta mas ampliamente en el anexo al final del trabajo.

### Generación de superficies

Se crearon superficies rugosas aleatorias unidimensionales numéricamente con las ecuaciones descritas en la sección anterior (ecuaciones 5, 6 y 7).

La longitud de correlación empleada para todos los casos fue de 100 cm, desviación estándar de altura ( $\sigma_z$ ) de 14 cm,  $\tau$  de 2, diámetro aparente del sol ( $\beta$ ) de  $0.68^\circ$ .

Para la generación de superficies rugosas aleatorias, se emplearon diferentes espectros, el gaussiano, el rect y el  $\text{tri}^2$  (definidos en la sección anterior).

Inicialmente, se realizaron experimentos para diferentes ángulos de incidencia ( $\theta_s$ ), variando desde  $1^\circ$  hasta  $30^\circ$ , dadas la sobresaturación de luz y en algunos casos la falta de brillos, se optó por utilizar un ángulo en el cual las condiciones fueran lo mas apropiadas posibles, siendo a los  $16^\circ$  y se mantuvo el ángulo de detección ( $\theta_d$ ) a  $0^\circ$ . Para generar las superficies, se utilizaron 16,384 datos en todos los casos.

Cabe mencionar que una de las condiciones necesarias para poder llevar a cabo el proceso de inversión entre los tres procesos involucrados (altura, pendiente e imagen), es que exista una correspondencia uno a uno entre los valores de estas tres funciones.

A continuación se presentan una gráfica de los tres procesos involucrados en la formación de la imagen.

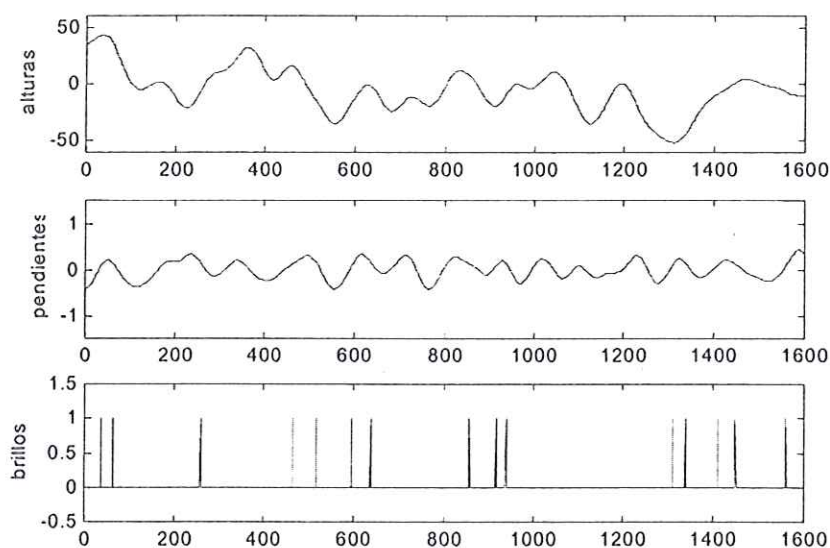


Fig. 4 Gráfica de los tres procesos involucrados.

Anteriormente se presentaron las relaciones que permiten obtener información acerca de las alturas de la superficie a partir de la imagen de la superficie.

Se presentan las graficas para cada uno de los espectros que se emplearon en la realización de este trabajo (Figs. 5, 6 y 7) en donde se pueden apreciar del lado izquierdo los tres procesos involucrados y del lado derecho, las graficas de las funciones de correlación teórica (línea cortada), del modelo (línea punteada) y la de los datos (línea continua).

En la figura 5, correspondiente al espectro Gaussiano, se observa que la gráfica de las funciones de correlación tanto teórica como de los datos, son muy parecidas, en el caso de la imagen. Para el caso de las alturas de la superficie y de las pendientes de la superficie, se observa una misma tendencia en los tres casos, aunque no son del todo iguales, es decir, no coinciden completamente, pero el comportamiento es similar. En el caso de las alturas generadas de manera teórica, se observa un decaimiento que tiende a cero muy homogéneo.

Tanto en la figura 6 como en la 7, se observan comportamientos similares en las gráficas de las funciones de correlación teórica y de los datos para cada uno de los tres procesos involucrados.

En la figura 6, se observa un comportamiento similar en las correlaciones para los tres casos, lo cual refleja un buen acoplamiento de lo teórico con el modelo y los datos. Se observa también para el caso teórico, que la correlación de brillos es muy buena, eso debido quizás al tipo de función que se está manejando.

La figura 7, por otro lado, se observan pequeñas variaciones en las correlaciones de pendientes de la superficie y alturas de la superficie en el caso del modelo, aunque la tendencia es similar, se tiene una pequeña variación con respecto al intervalo.

## Función Gaussiana

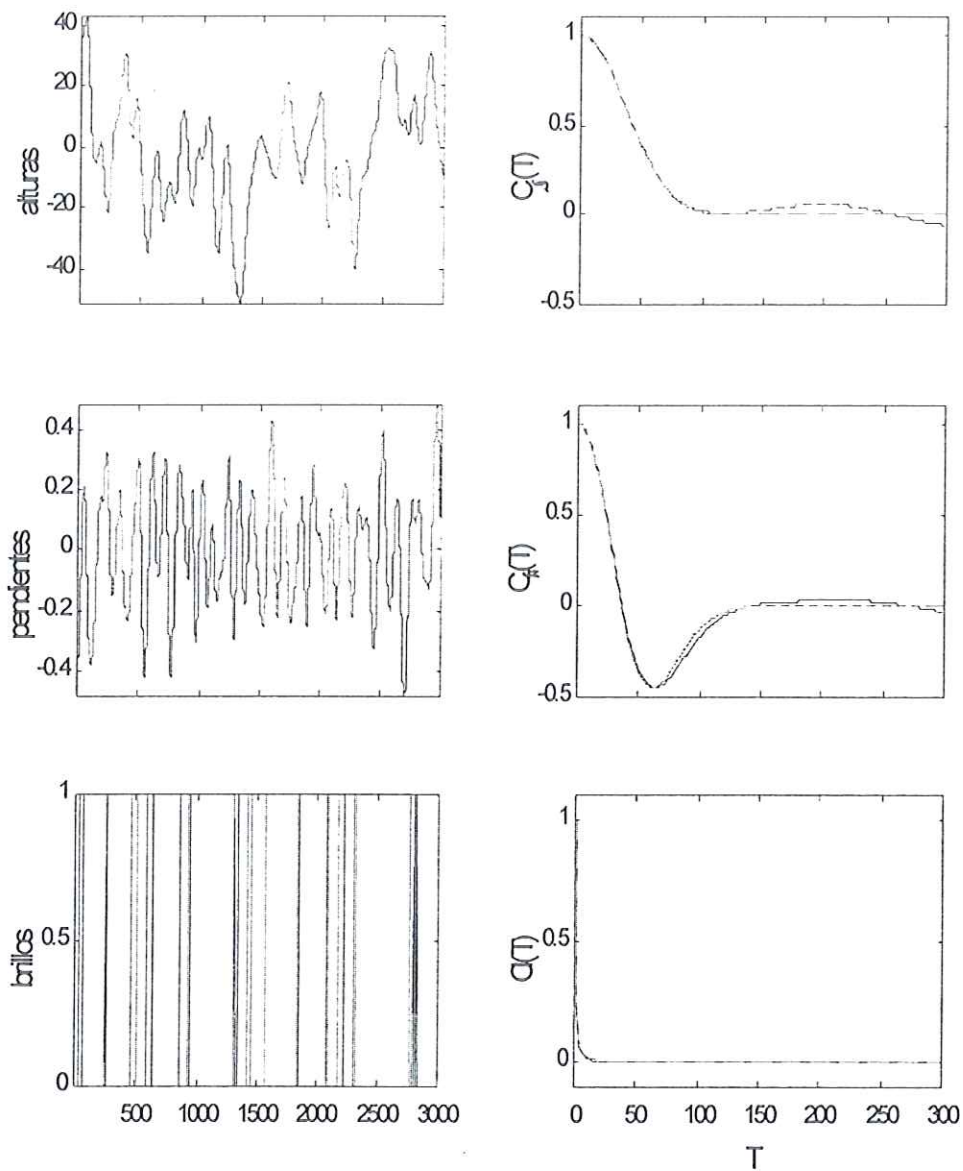


Fig. 5 Gráfica de la función Gauss; altura, pendiente y brillo con su correspondiente grafica de correlación (lado derecho) para cada caso. Línea cortada teóricos, línea continua datos, línea punteada modelo.

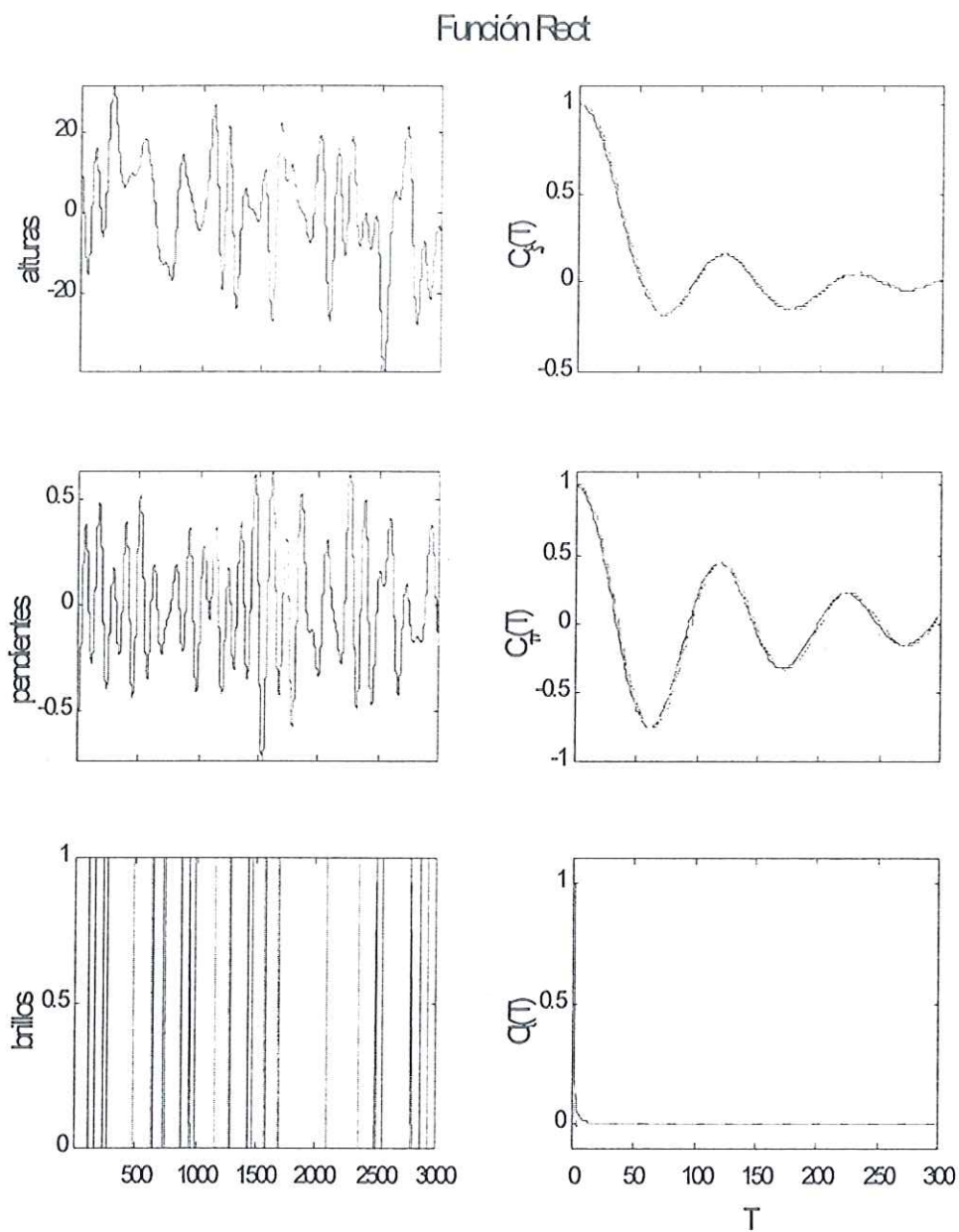


Fig. 6 Gráfica de la función Rect; altura, pendiente y brillo con su correspondiente grafica de correlación (lado derecho) para cada caso. Línea cortada teóricos, línea continua datos, línea punteada modelo.

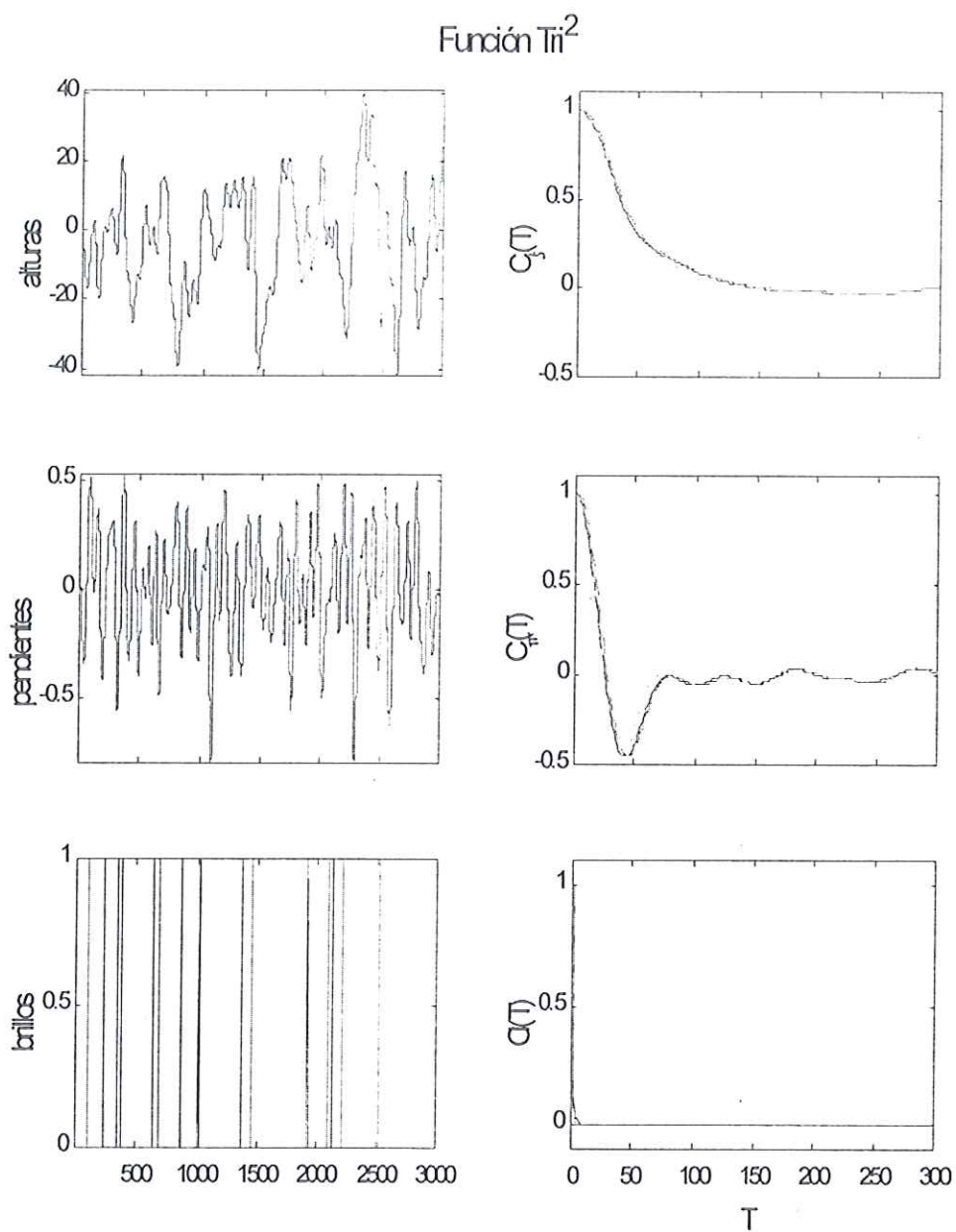


Fig. 7 Grafica de la función  $\text{Tri}^2$ ; altura, pendiente y brillo con su correspondiente grafica de correlación (lado derecho) para cada caso. Línea cortada teóricos, línea continua datos, línea punteada modelo.

Para el caso de la resolución teórica, se realizaron los cálculos y análisis pertinentes para obtener de manera adecuada tales resultados.

Se anexa en el apéndice II, las ecuaciones empleadas para la relación teórica, entre los procesos involucrados para cada uno de los espectro empleados en este trabajo.

Para el caso de la toma de imágenes, las características en posición que debe tener la fuente de luz (Sol), esta dada por la altura solar; que es el ángulo formado por el Sol con el plano horizontal definido en el punto de la superficie terrestre considerado. La altura varía entre  $-90^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ . Aunque esos valores dependen de la posición del punto.

La altura solar varía dependiendo de la latitud y de la hora del día, pero cabe mencionar que hay mas aspectos involucrados, tales como la declinación, que es el ángulo del círculo horario, que va desde el ecuador celeste hasta el astro (Sol).

La variación de la declinación ( $\delta$ ) es periódica y puede calcularse de manera aproximada utilizando la expresión:

$$\delta = 23.45 \times \text{sen} \left( 360 \times \frac{284 + n}{365} \right)$$

donde  $n$  es el número de días transcurridos del año.

La altura solar de igual manera depende de la situación geográfica de la zona, de la época del año y de la hora del día. Una manera mas completa de determinar la altura del sol es a través de la siguiente ecuación:

$$\sin a = \text{sen} \phi \text{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

donde:

$a$  es la elevación del sol.

$\phi$  es la latitud del observador.

$\delta$  es la declinación.

$\omega$  es el ángulo horario o distancia angular desde el meridiano del observador y debe expresarse en función de las horas transcurridas desde el medio día 't' y puede escribirse como:

$$\omega = 15 t$$

En la actualidad se cuentan con representaciones del recorrido solar sobre los hemisferios por medio de gráficos geométricos construidos analíticamente por ecuaciones de trigonometría espacial, las cuales se omiten en el presente trabajo ya que no son de interés para la finalidad del mismo.

Las representaciones más elementales del recorrido solar se pueden realizar en un sistema diédrico y requieren de operaciones de geometría descriptiva para su utilización. Un modelo tradicional es la Carta Solar de Fisher-Mattioni y hay una versión modificada para su lectura en planta, que es la Carta Solar Estereográfica, que es de uso sencillo, basta determinar la fecha y la hora solar real para poder leer directamente la altura solar en los círculos concéntricos y el azimut en el borde de la carta y se tiene una carta diferente para cada latitud precisa.

Una variante más sencilla es la Carta Solar Cilíndrica, que está basada en la proyección del recorrido solar en un cilindro que rodee al observador, donde se puede desplegar una proyección plana del recorrido solar con lecturas directas de altura y azimut. La principal ventaja es la posibilidad de representar el horizonte real en torno al observador y estudiar directamente las obstrucciones solares (Monroy, M.M., 2001).

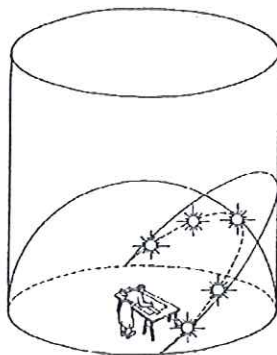


Fig. 8. Carta Solar Cilíndrica

La figura 9 presentada a continuación muestra de manera gráfica las diferentes posiciones del sol dependiendo de la época del año y la latitud; al igual que la máxima altura solar.

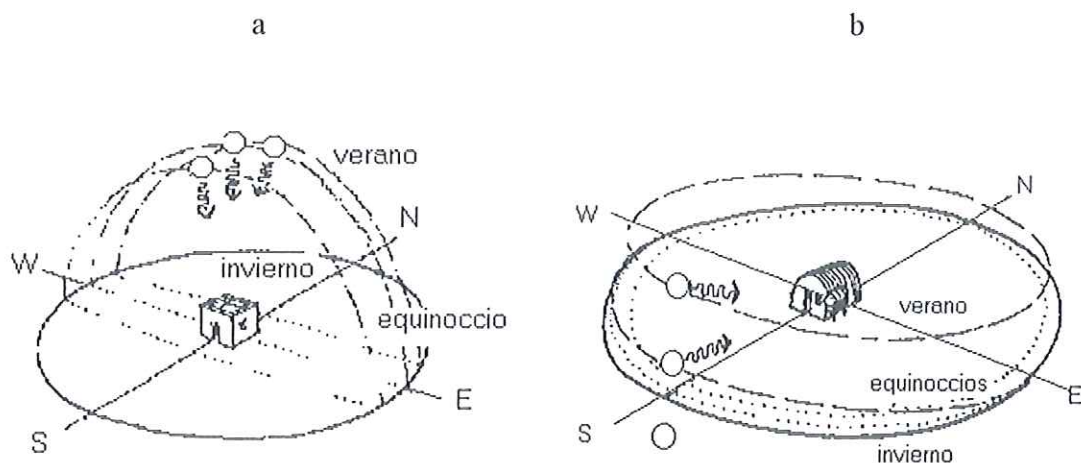


Fig. 9. Posición del sol en diferentes latitudes; a) ecuador, b) polos

Como se mencionó anteriormente, la altura y posición del sol dependen de la hora del día, de la latitud, de la época del año, entre otros, y como se observa en la figura anterior, en los polos, la altura del sol nunca estará a los  $90^\circ$ , debido a la declinación, pero efectivamente, la máxima altura será durante el verano.

De manera general y mas breve, se tiene una ecuación sencilla para calcular el ángulo del sol para el medio día, donde alcanza su máxima altura y es:

$$A = 90 - \text{lat} + \delta$$

y la expresión anterior para mayor facilidad queda como:

$$A = 90 - \text{lat} + 23.5$$

Ahora bien, debe tenerse presente que, debido a la rotación de la tierra, cada hora, se mueve  $15^\circ$ , positivos por la mañana y negativos por la tarde. De ahí que se puede calcular el horario óptimo para la toma de imágenes.

## CONCLUSIONES

Para el caso de la fabricación de superficies rugosas, es pertinente conocer el tipo de fotorresina que se va a emplear al igual que todas sus características y utilizar el revelador adecuado para la fotorresina empleada. Es conveniente iniciar haciendo pruebas para realizar los depósitos, una vez teniendo el sustrato con la capa de fotorresina, también deben realizarse pruebas de tiempo de exposición. A lo largo de la realización de este trabajo, el tiempo de exposición para cada experimento se vió disminuido considerablemente, inicialmente se tenían exposiciones de hasta 48 hr. y los últimos tiempo de exposición fueron de solo minutos; esto debido a que se emplearon diversos tipos de fotorresina.

Al utilizar los tres diferentes espectros (Gaussiano, Rect y Tri<sup>2</sup>), para la generación de superficies aleatorias, lo cual corroboramos que efectivamente poseen datos normales mediante el histograma de los datos, que muestran una tendencia normal. Los resultados obtenidos de las correlaciones de los datos teóricos y los del modelo, observamos que tienen una tendencia similar, por lo que podemos decir que el modelo puede ser empleado eficazmente.

Cabe mencionar que para cada ángulo de incidencia de luz, se tienen resultados diferentes, en este caso, las consideraciones fueron las mismas para cada uno de los espectros; por lo que para un problema dado se debe escoger la geometría adecuada, para que en el caso del proceso inverso, dicha geometría sea la óptima.

Con los resultados aquí obtenidos, se puede garantizar que el modelo empleado por Álvarez-Borrego (1995), tiene una buena aproximación respecto a la teoría y a los datos.

Para el caso de la toma de imágenes, es recomendable realizar un estudio minucioso de la posición del sol; y dada la latitud a la que nos encontramos y las condiciones meteorológicas y atmosféricas que por estar cerca de la costa, varían hora a hora para cada día, no es por lo tanto suficiente basarse únicamente en los cálculos de la posición del sol, si no, mas bien, aprovechar los momentos de luminosidad y cielo despejado que se tienen para poder obtener buenas imágenes.

## LITERATURA CITADA

Álvarez Borrego, J., 1993, Determinación de propiedades estadísticas de superficies rugosas aleatorias a partir de imágenes remotas, Tesis Doctoral, CICESE, Ensenada, B.C. pp. 117.

Álvarez Borrego, J., 1995, Some statistical properties of surface heights via remote sensing. *Journal of Modern Optics*. 42,2, pp.279-288.

Álvarez Borrego, J. y Martínez G.,A., 1995, Statistics of rough surface via remote sensing. An experiment. *Journal of Modern Optics*. 42,11, pp.2347-2355.

Barber, N.F., 1954. Finding the direction of travel of ssea waves. *Nature*. 174, pp 1048-1050.

Cox, C. y Munk, W. 1954a. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter. *Journal of the Optical Society of America*. 44,11, pp. 838-850.

Cox, C. y Munk, W. 1954b. Statistics of the sea surface derivved from sun glitter. *Journal of Marine Research*. 13,2, pp. 198-227.

Cox, C., 1958. Measurement os slopes of high-frecuency wind waves. *J. Mar. res.* 16. pp 199-225.

Davenport, W.B.Jr. y W.L.Root. 1958. An introduction to the theory of random signals and noise. McGraw-Hil, New-York.

Jiménez-López, J.C. [http://www.infoab.uclm.es /labelec/Solar/Solar\\_Fotovoltaica /introduccion6.htm](http://www.infoab.uclm.es /labelec/Solar/Solar_Fotovoltaica /introduccion6.htm)

Kassevich, R.S. 1975. Directional waves spectra from daylight scattering. *J. Geophysics Research*. 80, No. 33, pp. 4535-4541.

Marin Hernández, M. 1997. Estadísticas de primer y segundo orden de superficies rugosas aleatorias a partir de imágenes remotas considerando una función de brillo Gaussiana. Tesis de Licenciatura. UABC, FCM. Ensenada, B.C. pp. 40.

Marin Hernández, M. 2000. Determinación de propiedades estadísticas de superficies rugosas aleatorias unidimensionales, mediante percepción remota. Tesis de Maestría. UABC, FCM-IIO. Ensenada, B.C. pp. 72.

Monroy, M.M. 2001. [http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2\\_clima/2\\_soleamiento](http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2_clima/2_soleamiento)

Negrete Regagnon, P. 1988. Filtrado óptico y digital de una imagen simulada de la superficie marina que contiene el espectro teórico de Person-Moskiwitz. Tesis de Licenciatura. UABC, FCM. Ensenada, B.C. pp. 127.

Papoulis, A. 1981. Probability, random variables, and stochastic processes. Cap.9. McGraw-Hill, New-York.

Peppers, N. y J.S. Ostrem. 1978. Determination of wave slopes from photographs of the ocean surface: a new approach. *Applied Optics*. 17, pp. 3450-3458.

Ramírez Zaragoza, H.L. y Álvarez Borrego. 1998. Fabricación de superficies rugosas aleatorias. Informe técnico. CICESE. pp. 18.

Silvester R. 1974. Coastal Engineering 1. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Stilwell,D.Jr. 1969. Directional energy spectra of the sea from photographs.  
Journal Geophysical Research. 74, pp. 1974-1986.

## APÉNDICE I

### INTRODUCCION

Recientemente fue presentado un nuevo método para obtener algunas propiedades estadísticas de alturas de superficies (cuando la escala lateral de las fluctuaciones de las alturas es más grande que la longitud de onda de la luz) de las propiedades estadísticas de las intensidades en la imagen, vía percepción remota (Alvarez Borrego, 1995). La atención se enfoca principalmente en la estadística de las alturas de la superficie para estimar la función de correlación, variancia y función de densidad espectral. La motivación para este trabajo es la aplicación de esta técnica no lineal para obtener información estadística de una superficie marina real mediante fotografías aéreas.

La información del oleaje puede ser adecuadamente obtenida por la fotografía aérea de los patrones de brillo que se forman cuando la superficie del mar refleja la luz del sol, obteniéndose imágenes de oleaje de alto contraste.

En este informe técnico se describe la metodología para la fabricación de superficies y su respectiva caracterización mediante perfilometría. Resultados de la fabricación de superficies rugosas aleatorias bidimensionales con estadísticas Gaussiana conocidas, son presentados y discutidos.

### METODOLOGIA

Cuatro procesos intervienen en la fabricación de superficies rugosas aleatorias: depósitos, exposición, revelado y aluminización.

#### a) Depósitos de fotorresina

Es importante que el sustrato<sup>1</sup> esté preparado, es decir, que no contenga partículas de polvo; una vez tenido esto, se procede a realizar el depósito de fotorresina. Se trabaja

---

<sup>1</sup> El sustrato es un cristal circular plano y completamente liso, de 2 pulgadas de diámetro por 1/8 pulgadas de espesor.

bajo luz amarilla, ya que la fotorresina es sensible a luz blanca. Se utilizó una fotorresina marca Shipley serie 1400-31 (Fig.1).

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.2), 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 r.p.m. con una velocidad de  $50 \text{ cms}^{-1}$  (Fig. 3), durante aproximadamente 20 seg., 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, que puede realizarse en una mufla convencional (horno de laboratorio), cuidando mantener una temperatura constante de  $45^{\circ}\text{C}$  y se deja hornear durante 15 min.

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

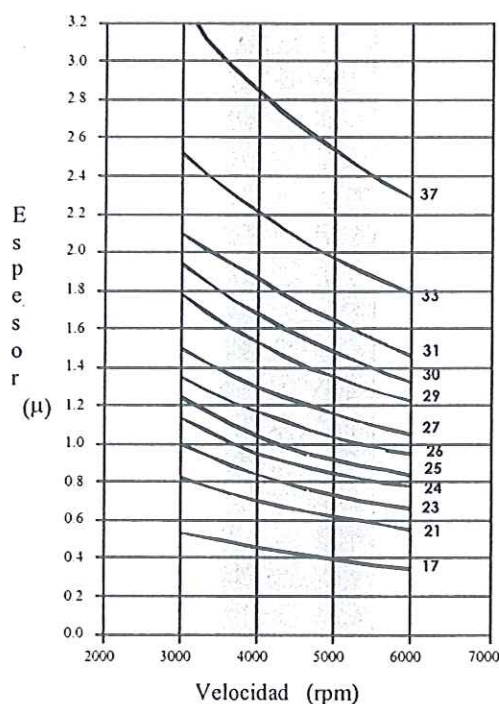


Fig. 1. Espesores de la fotorresina empleada en el experimento, para diferentes velocidades.

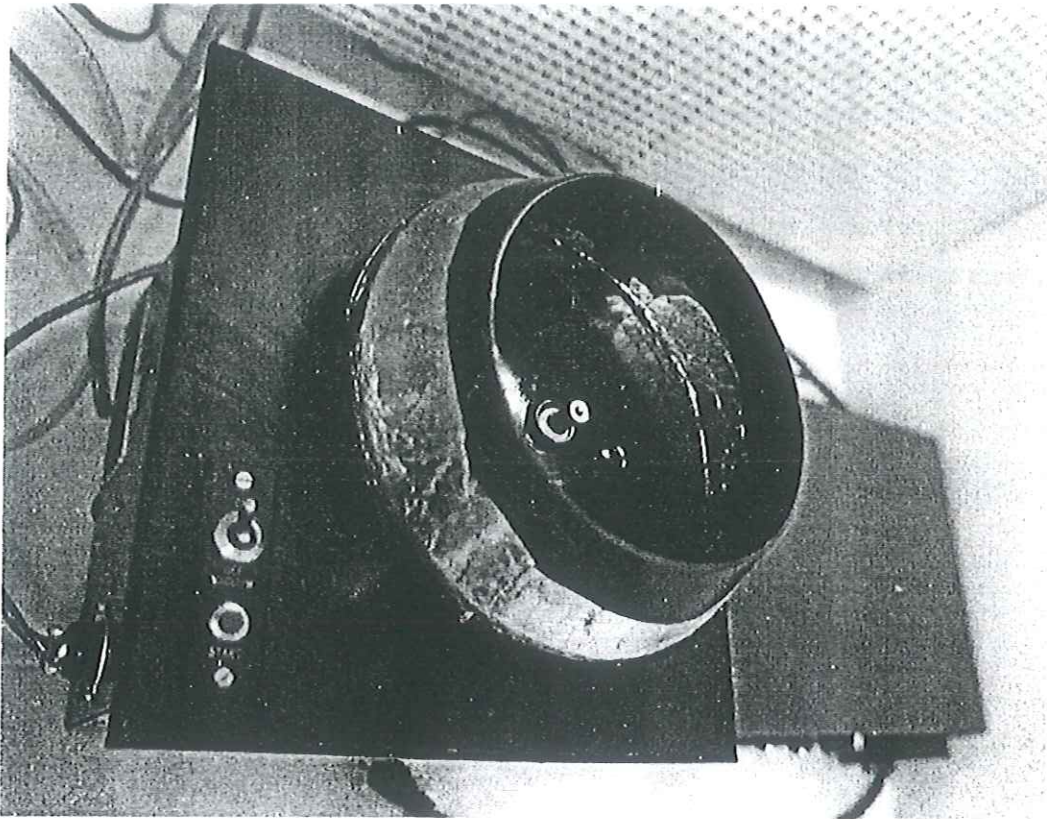


Fig.2. Sistema rotatorio para realizar los depósitos

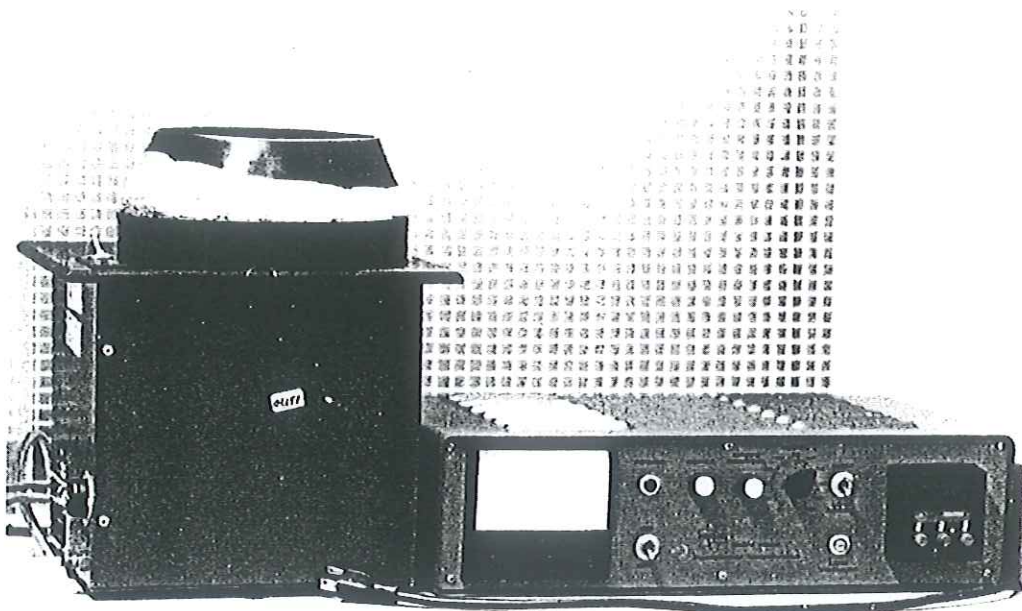


Fig. 3. Regulador de velocidad del sistema rotatorio

## b) Exposición

Antes de comenzar la exposición, se sugiere pintar la parte posterior a la capa de fotorresina de los sustratos con pintura negra mate, para evitar múltiples reflexiones de luz.

El sistema óptico utilizado para la fabricación de superficies rugosas, se muestra en la figura 4.

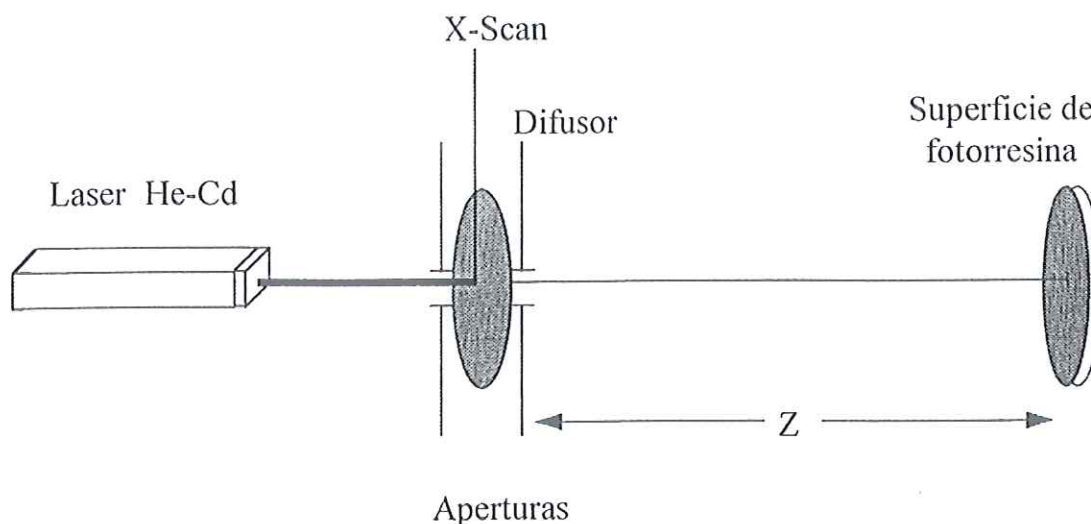


Fig. 4. Sistema óptico utilizado en la fabricación de superficies

La distancia entre difusor y la placa de fotorresina, depende del tamaño de granulado que se desee y de la longitud de onda. El tamaño del granulado es proporcional a la distancia.

A continuación se presenta la ecuación utilizada para el cálculo teórico de la distancia entre el difusor y la placa de fotorresina.

$$a = \frac{\lambda}{\pi\sqrt{2}} \left( \frac{z}{\omega} \right) ,$$

donde:  $a$  es longitud de correlación.

$\lambda$  es la longitud de onda del haz del láser.

$z$  es la distancia comprendida entre el difusor y el sustrato.

$\omega$  es el radio de haz del láser.

Es importante comentar que se presenta un problema de precisión, ya que el haz del láser es muy pequeño en su sección eficaz.

Para la obtención de una superficie rugosa aleatoria, el haz de luz se hace incidir sobre el difusor creando un patrón de speckel (granulado) en el campo de difracción.

Este patrón es grabado en la fotorresina depositada sobre la placa. Las estadísticas del patrón de granulado, han sido estudiadas antes (Dainty, 1984). Es bien conocido que cuando varias regiones del difusor no correlacionadas son iluminadas, la función de densidad de probabilidad en el campo lejano asociada con las variaciones de la intensidad de la luz tienen un comportamiento exponencial negativo. Por tanto, si exponemos una placa de vidrio cubierta con fotorresina a un solo patrón de granulado, después de revelarse, se obtiene una superficie con función de densidad de probabilidad de alturas con forma de exponencial negativa. Esto es así, si suponemos una relación lineal entre la exposición y el relieve de la altura.

Una superficie con función de densidad de probabilidad Gaussiana de alturas puede obtenerse al exponer repetidamente la placa fotosensitiva a patrones de granulado estadísticamente independientes. En nuestro caso, las exposiciones fueron producidas con luz de un láser He-Cd (Liconix 4240 NB) con una longitud de onda de  $0.442 \mu\text{m}$ .

Para lograr obtener una superficie con las características adecuadas, el sistema puede corregirse a partir de la caracterización de la primera superficie generada, en base al factor de correlación.

Dentro de este proyecto, se realizaron varios experimentos en los cuales los patrones de granulado se cambiaban regularmente para cada superficie, variando desde 2 min., hasta 28 min., en 10 ocasiones, hasta obtener una superficie con las características adecuadas.

Cabe mencionar que esta parte experimental es la mas larga e importante, ya que se requiere tener tiempos de exposiciones reales. De la misma manera, así como cada fotorresina actúa de manera particular dependiendo de sus características, es conveniente

tener un buen registro del tiempo de exposición o hacer experimentos preliminares para determinar el tiempo de exposición adecuado para lograr una rugosidad específica. Es precisamente en esta etapa donde se invirtió más tiempo, ya que, inicialmente se tenía problemas con una no uniformidad del haz de luz, una vez detectado y corregido el problema, se realizaron experimentos variando la distancia entre el difusor y el sustrato, así como el tiempo de exposición, hasta que se logró una superficie con las estadísticas adecuadas.

Terminada la exposición, es necesario revelar la placa.

#### c) Revelado

Este proceso es prácticamente el más sencillo, ya que se coloca el sustrato en un recipiente preparado previamente con una proporción 3:1, agua destilada y revelador respectivamente. Para el tipo de fotorresina empleada en el presente trabajo, se sugiere un revelador Microposit 351 concentrado, de Shipley.

Se mantiene la placa, con la capa de fotorresina hacia arriba, agitada suavemente durante aproximadamente 3 min. Posteriormente se enjuaga bajo el chorro de agua por la parte de atrás, quitándole en ese momento la pintura, con una navaja; libre de pintura, la superficie creada, se deja reposar durante 3 min. en agua destilada, para enjuagar perfectamente y fijar.

Pasados los 3 min., la superficie fabricada, se seca con aire a temperatura media, preferentemente con la ayuda de una secadora, para evitar manchas, y finalmente se obtiene una superficie isotrópica rugosa aleatoria.

Para continuar con el trabajo es necesario obtener de esa superficie, la mayor reflectividad posible, para lo cual, es conveniente cubrir cada superficie fabricada, con una capa de aluminio.

#### d) Aluminización

En esta parte, se realiza un depósito de película delgada, en este caso la película es de aluminio, y se utiliza la técnica de evaporación térmica descrita por Salazar M.(Comunicación personal), en un sistema Edwards 306.

La finalidad del recubrimiento con la película delgada (Fig.5), es de alterar las propiedades físicas y ópticas, tales como dureza y reflectancia.

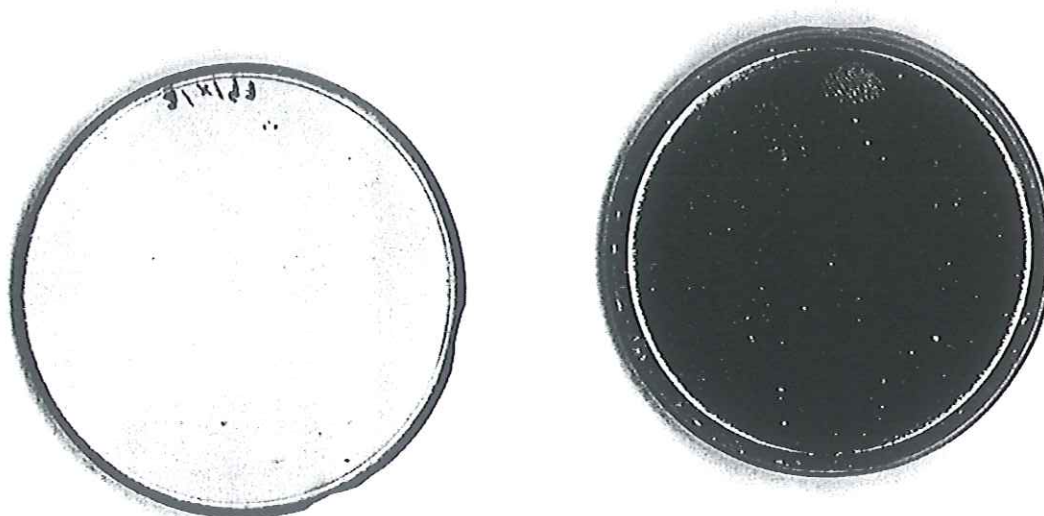


Fig.5. Sustratos con fotorresina (izquierda) y con cubierta de aluminio (derecha).

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 (puede ser en polvo, pastilla, alambre o líquido).

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

La fracción  $N$  de las moléculas emitidas que recorren una distancia determinada ( $x$ ), sin sufrir colisiones esta dada por:

$$N = N_o \exp\left(-\frac{x}{L}\right) \quad ,$$

donde:  $L$  es el camino libre.

$N_o$  el número inicial de moléculas.

$x$  es la distancia entre el recipiente y el sustrato.

Para aumentar el camino libre medio, es necesario que la presión disminuya en el momento de la evaporación y para lograrlo, se requiere de un sistema de vacío que proporcione una presión parcial de  $10^{-6}$  Torr.

Es importante mencionar que en el proceso de preparación del sustrato, la limpieza y rugosidad del mismo, son relevantes al momento de determinar la adhesión, durabilidad y respuesta en frecuencia del mismo.

Algunos de los problemas o inconvenientes que pudieran presentarse a lo largo de ésta técnica, son las propiedades ópticas y mecánicas del material a utilizar, al igual que la temperatura necesaria para su evaporación.

La evaporación se inicia al alcanzar un vacío de  $2 \times 10^{-5}$  Torr, proporcionando un camino libre medio de varios metros, lo cual permite que éste se condense en los sustratos con poca dispersión en la trayectoria.

En el caso de depósitos de metales se hace circular para la evaporación una corriente del orden de 100 Amperes.

El material empleado en la evaporación para el recubrimiento del sustrato con fotorresina es el aluminio que tiene una temperatura de evaporación de aproximadamente 660 °C.

## RESULTADOS

Para la obtención de la estadística de la superficie anteriormente fabricada, se empleó un perfilómetro mecánico DEKTAK3 ST, con el que, después de su proceso, se obtiene el cálculo de la correlación de las alturas y de la imagen, al igual que las gráficas teóricas correspondientes a cada caso.

En las mediciones del perfilómetro, se realizan 20 barridos de aproximadamente 4000 micras, de manera aleatoria, a una velocidad baja con una fuerza de 3 mg. Cada barrido se va registrando en un archivo diferente para su posterior análisis.

Obtenidas todas las lecturas de los barridos, se procede a la aplicación de algoritmos que proporcionan la estadística total y parcial de la superficie.

Los resultados obtenidos al final de éste proceso, son empleados para comparaciones con resultados teóricos.

Se presentan a continuación un ejemplo de las gráficas de las correlaciones, además de histogramas de alturas y pendientes de los resultados obtenidos de una superficie.

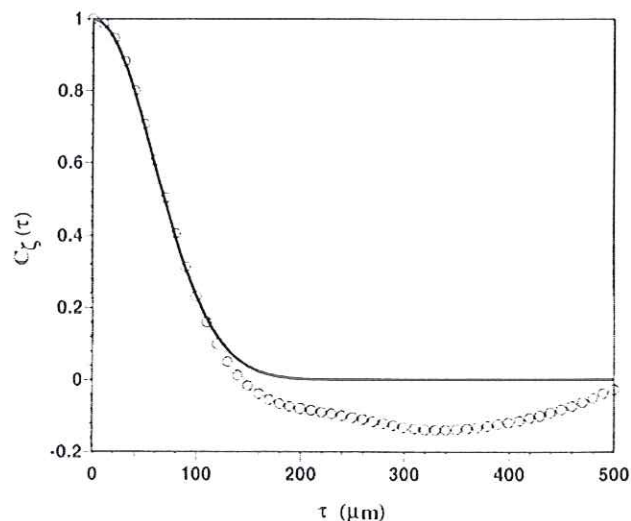


Fig. 7. Función de autocorrelación de alturas; línea continua autocorrelación Gaussiana teórica; círculos, autocorrelación obtenida del perfilómetro.

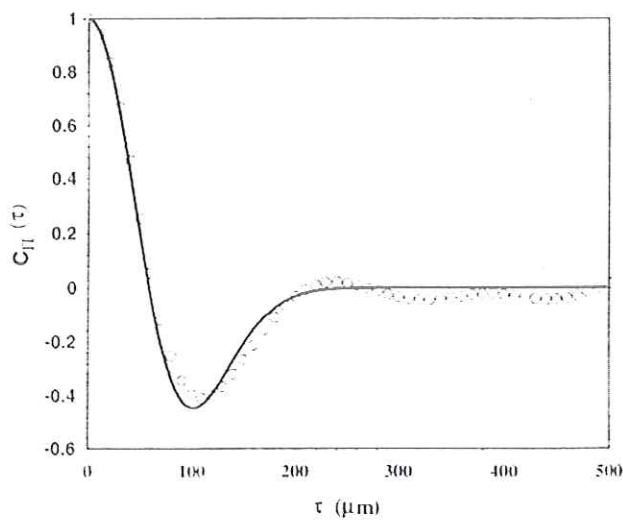


Fig. 8. Función de correlación de pendientes; línea continua pendiente teórica normalizada; círculos, pendientes medidas.

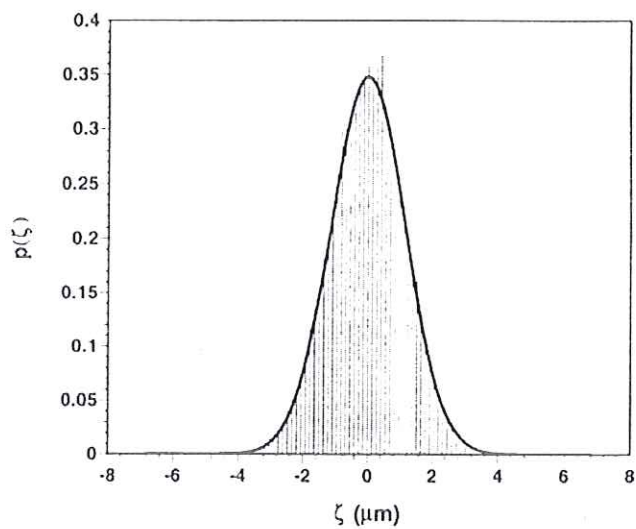


Fig.9. Histograma de alturas; curva continua, función de densidad de probabilidad Gaussiana; barras, función de densidad de probabilidad medida en la superficie rugosa.

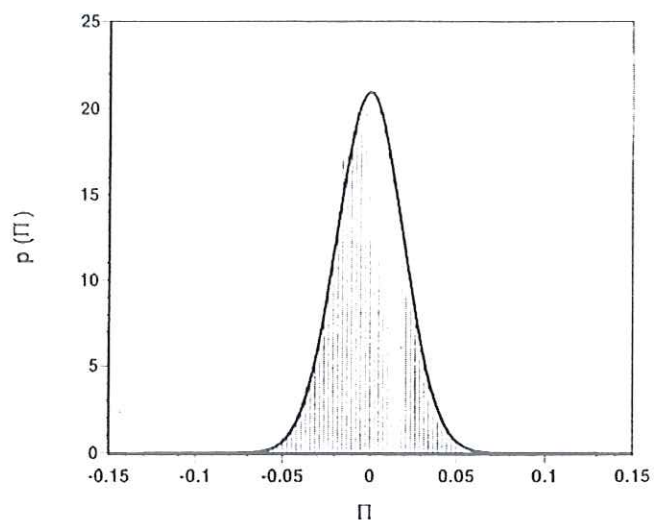


Fig.10. Histograma de pendientes; curva continua, función de densidad de probabilidad Gaussiana; barras, función de densidad de probabilidad medida en la superficie rugosa.

## RECOMENDACIONES

A continuación se hacen algunas sugerencias importantes para el proceso de fabricación de superficies rugosas.

### - EQUIPO

Dado que se manejan sustancias químicas tóxicas, es conveniente utilizar mascarillas y guantes adecuados.

En los procesos de limpieza posterior a la realización de los depósitos de fotorresina, y de revelado, se sugiere trabajar bajo una campana de extracción.

### - LUZ

Como se ha mencionado a lo largo del presente, la fotorresina es fotosensible, por lo que se recomienda el uso de luz amarilla durante todos los procesos.

## REFERENCIAS

Alvarez Borrego, J.,1995. Journal Modern Optics, 42,11, pp.2347-2355.

Dainty, J.C., 1984, Progress in Optics, Vol.XIV, 2<sup>nd</sup> edn. Edited by E. Wolf (Amsterdam: North-Holland), pp. 1-46.

Salazar M. , D., 1989, ELABORACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS EN NA EVAPORADORA EDWARDS 306, Reporte Técnico, CICESE, Depto. De Optica.

## APÉNDICE II

### Resolución teórica

Con la finalidad de obtener la correlación de alturas de la superficie, podemos entonces retomar las ecuaciones de los espectros de las funciones utilizadas (5, 6 y 7) y sus funciones de correlación correspondientes (ecuaciones 8, 9 y 10).

Y recordando la relación entre la función de correlación del perfil,  $C_{\zeta}(\tau)$ , y la de su derivada,  $C_{\Pi}(\tau)$ , es:

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

Podemos entonces escribir esta relación para cada uno de los espectros que se emplearon.

#### a) Espectro Gaussiano

Definición	Función de Correlación	Relación $C_{\Pi}(\tau)$ vs $C_{\zeta}(\tau)$
$S_1(K_x) = l\sqrt{\pi}\sigma_{\zeta}^2 \exp\left(-\frac{K_x^2 l^2}{4}\right)$	$C_{\zeta_1}(\tau) = \sigma_{\zeta}^2 \exp\left(-\frac{\tau^2}{l^2}\right)$	$\left(1 - \frac{2\tau^2}{l^2}\right) \frac{2\sigma_{\zeta}^2}{l^2} e^{-\frac{\tau^2}{l^2}}$

#### b) Espectro Rect

Definición	Función de Correlación	Relación $C_{\Pi}(\tau)$ vs $C_{\zeta}(\tau)$
$S_2(K_x) = l\sigma_{\zeta}^2 \text{rect}(lK_x)$	$C_{\zeta_2}(\tau) = \sigma_{\zeta}^2 \text{sinc}\left(\frac{\tau}{l}\right)$	$-\sigma^2 \left( \frac{\pi \sin(\pi\tau)}{\tau} + \frac{2 \cos(\pi\tau)}{\tau^2} - \frac{2 \sin(\pi\tau)}{\pi\tau^3} \right)$

c) Espectro  $\text{Tri}^2$ 

Definición	Función de Correlación	Relación $C_{\Pi}(\tau)$ vs $C_{\zeta}(\tau)$
$S_3(K_x) = l\sqrt{\pi}\sigma_{\zeta}^2 \text{tri}^2(lK_x)$	$C_{\zeta_3}(\tau) = \frac{3l^2\sigma_{\zeta}^2}{10\tau^2} \left[ 1 - \text{sinc}\left(\frac{2\sqrt{5}\tau}{l\pi}\right) \right]$	$\frac{3l^2\sigma_{\zeta}^2}{10} \frac{6\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\tau + 6\cos\left(\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\tau\right)\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\tau + \left(\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\right)^2\tau^2 \sin\left(\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\tau\right) - 12\text{Si}\left(\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\tau\right)}{\frac{2\sqrt{5}}{l\pi}\tau^5}$