

# OPCIONES CLIMÁTICAS PARA EL SECTOR PESQUERO DEL PACÍFICO MEXICANO

Abraham Alva Vázquez

Guillermo Sierra Juárez\*\*

(Recibido: Agosto, 2010 / Aprobado: Septiembre, 2010)

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es proponer un modelo de valuación de opciones climáticas para el Sector Pesquero del Pacífico mexicano, tomando como variable fundamental la temperatura del mar. Este derivado proporcionaría una cobertura contra la caída en la producción pesquera debida a los efectos ocasionados por el fenómeno natural de “El Niño”. Se utilizan los datos históricos de la temperatura del mar de diferentes regiones del Pacífico mexicano (Ensenada, Isla Cedros, Cabo San Lucas, Golfo de México, Puerto Vallarta, Acapulco y Golfo de Tehuantepec) para así proponer un proceso estocástico que describa la evolución de la temperatura del mar. Como la temperatura es un índice no-negociable, se utiliza el precio de riesgo de mercado, el cual es un parámetro importante para el cálculo de los precios de los contratos de opciones climáticas dentro un mercado de derivados incompleto. Se presenta la aplicación del modelo para la industria

---

\*\* Posgrado de Ingeniería en Sistemas, Maestría en Optimización Financiera, UNAM. Correo electrónico: <abalva@comunidad.unam.mx>, <gsierraj@comunidad.unam.mx>.

en algunas regiones del Sector Pesquero del Pacífico mexicano haciendo uso del método de simulación Monte Carlo. Además, se muestran las especificaciones que deberían tener algunos contratos de opciones climáticas.

*Palabras clave:* Opciones climáticas, Ecuación Black-Scholes, derivados

*Clasificación JEL:* C61, G10, G12

## ABSTRACT

The first purpose of this paper is the valuation of a kind of weather derivatives which underlying is the sea surface temperature and it could be used for hedging in the fall in fishing production like consequences of the natural phenomenon “El Niño”. We used historical data of several regions of Mexican Pacific (Ensenada, Isla Cedros, Cabo San Lucas, Golfo de México, Puerto Vallarta, Acapulco and Golfo de Tehuantepec) and thus suggest a stochastic process that describes the evolution of the sea surface temperature. Since the temperature is a not-tradable quantity, we used the market price of risk, which is an important parameter to estimate the prices of contracts of weather options in an incomplete derivatives market. We are presenting the application of model to industry in a few regions of the Fisheries of Mexican Pacific using the method of Monte Carlo simulation. In addition, we show the specifications that should have some contracts of weather options.

*Keywords:* Weather options, Black-Scholes Equation, derivatives

*JEL Classification:* C61, G10, G12

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a su situación geográfica, una gran variedad de fenómenos naturales ocurren cada año en México, tales cambios pueden ser causa de desastres como terremotos, huracanes, inundaciones y sequías. En el caso de desastres los efectos sobre los recursos naturales y financieros son grandes y no previsibles.

Si bien el tema de la variabilidad climática ha llamado la atención del público en el mundo durante algún tiempo, el fenómeno de El Niño ha sido el evento que más interés ha recibido en diversos sectores de la sociedad mexicana. Entre las actividades económicas que resienten el impacto de El Niño, una de las más afectadas es sin duda la pesca. Por ejemplo, el fenómeno de El Niño de mayor impacto en términos monetarios que se ha registrado hasta ahora ha sido el evento de 1997-1998, debido a que sus efectos significaron una pérdida de aproximadamente de \$700 millones de pesos durante 1998, cifra que representa los volúmenes de pesca que dejaron de capturar las embarcaciones costeras, además de que en el Golfo de California se dio un cambio radical en la distribución de la población de calamar, que resultó en capturas prácticamente nulas, ocasionando la pérdida de unos 3 200 empleos directos (Magaña, 2004). Para el caso de México los cambios en el Pacífico significan graves pérdidas por ser estos litorales los que aportan la mayor parte de la producción de pesca nacional en términos de volumen y de valor de producción.

El clima ha tenido un enorme impacto sobre muchos tipos de actividades financieras. La lista de negocios sujetos al riesgo climático es grande y se incluye, por ejemplo, productores y consumidores en energía, cadenas de supermercados, industrias en diversión y recreación e industrias agrícolas y pesqueras. El comercio de los derivados climáticos para estas compañías ha disminuido su riesgo dentro del mercado ante la presencia de un “mal” clima. Los derivados climáticos son contratos financieros con pagos que dependen del clima de alguna forma. Los índices fundamentales pueden ser, por ejemplo, la temperatura, la humedad, la lluvia o la nieve.

La primera transacción en el mercado de derivados climáticos tomó lugar en los Estados Unidos en 1997. Desde entonces se han realizado diferentes modelos para la valuación de los derivados climáticos, los cuales son usualmente estructurados como swaps, futuros y opciones de compra y de venta, basados sobre diferentes índices climáticos. Por ejemplo, uno de los modelos para la valuación de estos contratos es el presentado por Alaton, Djehiche y Stillberger (2002), el cual se toma como referencia principal para este trabajo, además de la importancia que tiene el artículo sobre diferentes trabajos en derivados climáticos en los que

se toma como índice fundamental la temperatura. Algunos de los artículos son los presentados por Jewson (2004), Richards, Manfredo y Sanders (2004), Benth y Saltyté-Benth (2005 y 2007), Zapranis y Alexandridis (2008), Benth, Härdle y Cabrera (2009), entre otros. En México, desafortunadamente aun no existe un mercado de derivados climáticos, aunque si hay diferentes trabajos sobre instrumentos financieros en relación al clima y otros fenómenos naturales que ocurren en México, como los presentados por Díaz y Venegas (2001), Trujillo y Navarro (2002), Ibarra (2003), López (2003 y 2006), Fernández y Gregorio (2005), Baqueiro y Sinha (2005), por mencionar algunos.

Para llevar a cabo este trabajo, se tiene la hipótesis de determinar las pérdidas en la industria pesquera del Pacífico mexicano debido al aumento que se presenta en la temperatura del mar y modelar una cobertura financiera usando un instrumento derivado, en particular un derivado climático. El propósito general es proponer un modelo de valuación de opciones climáticas para el Sector Pesquero del Pacífico mexicano, tomando como variable fundamental la temperatura del mar. En particular se espera que, usando datos históricos de la temperatura del mar en México, se pueda sugerir un proceso estocástico que modele la evolución de la temperatura como un subyacente. A partir del modelo sugerido se espera encontrar una valuación de opciones climáticas en las que la temperatura del mar supere cierto umbral, para así poder plantear un sistema de cobertura. Además, también se plantea aplicar el modelo a un caso práctico, en particular al Sector Pesquero del Pacífico mexicano.

## **2. EL FENÓMENO “EL NIÑO” Y EL SECTOR PESQUERO EN MÉXICO**

El Niño corresponde al estado climático en el que la temperatura de la superficie del mar está  $0.5^{\circ}\text{C}$  o más, por encima de la media del período 1950-1979, por al menos seis meses consecutivos, en la región conocida como “Niño 3” ( $4^{\circ}\text{N}-4^{\circ}\text{S}$ ,  $150^{\circ}\text{W}-90^{\circ}\text{W}$ ) (Trenberth, 1997). Se debe decir que la ocurrencia de El Niño no es periódica, en otras palabras, no ocurre un evento de este tipo cada cierto número

de años, generalmente ocurre cada tres a siete años y tiene una duración de 12 a 18 meses (McPhaden, 2002).

Las señales de la ocurrencia del fenómeno El Niño no sólo se limitan a las regiones tropicales del Océano Pacífico, sino que afectan lugares tan distantes como Norteamérica o Sudáfrica (Ropelewsky y Halpert, 1989). En México el fenómeno El Niño tiene serias repercusiones. De manera general podemos decir que las lluvias de invierno se intensifican y las de verano se debilitan. En la zona centro y norte del país se incrementan los frentes fríos en invierno, en tanto que en verano aparece la sequía y disminuyen el número de huracanes en el Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México (Magaña, 1998). Pero son muchas más las formas en que El Niño afecta a México y trae como consecuencias pérdidas económicas dentro del país, como por ejemplo en la industria agrícola y pesquera, entre otras.

La pesca es una actividad importante para México, debido principalmente a que el país cuenta con 11 592.77 kilómetros de costas, de los cuales 8 475.06 corresponden al litoral del Pacífico y 3 117.71 al del Golfo de México y mar Caribe, incluyendo islas; su plataforma continental es de aproximadamente 394 603 km<sup>2</sup>, siendo mayor en el Golfo de México; además cuenta con 12 500 km<sup>2</sup> de lagunas costeras y esteros y dispone de 6 500 km<sup>2</sup> de aguas interiores, como lagos, lagunas, represas y ríos. Al establecerse en 1976 el régimen de 200 millas náuticas de “zona económica exclusiva”, quedan bajo jurisdicción nacional 2 946 885 km<sup>2</sup> de región marina nacional (Cienfuentes, Torres y Frías, 2003). Esta gran dimensión del litoral favorece una actividad de captura que en condiciones normales, satisface el mercado interno y permite tener excedentes para la exportación.

Los reportes más recientes publicados por la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA), (SAGARPA, 2008), indican que el volumen total de la producción pesquera nacional en peso vivo es de 1 745 424 toneladas, las cuales representan un valor total de 16 884 millones de pesos. Los principales estados con mayor participación en el volumen de producción son los estados de Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur con el 77% del volumen total de la producción pesquera y acuícola nacional y con una participación del 62% en el valor total.

Es importante señalar que, estos estados también tienen una participación importante en la captura de especies como la sardina, el camarón, los túnidos, el calamar, la mojarra y el ostión, ya que representan el 82% de la suma total de la producción de estas especies, equivalentes a un 76% del valor total de la producción nacional.

Las especies como la sardina, el camarón, los túnidos y el calamar, no son solamente importantes por los volúmenes de captura, sino también por los volúmenes que ocupan en las exportaciones, ya que del volumen total exportado estas especies representan el 43.7%, con un 59.2% del valor total (SAGARPA, 2008).

Durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño, las pesquerías del Pacífico Este son impactadas significativamente por encontrarse en la zona de influencia directa. Para el caso de México no existen cifras oficiales, aunque se sabe que los impactos fueron severos, principalmente en el Pacífico, pues poco se sabe de cómo El Niño afecta al Golfo de México o al mar Caribe. Los cambios en el Pacífico significan graves pérdidas para nuestro país por ser estos litorales los que aportan la mayor parte de la producción nacional en términos de volumen y de valor de producción.

Históricamente, El Niño 1997-98 ha sido el evento que más interés ha recibido en diversos sectores de la sociedad mexicana. Dentro de la actividad pesquera, dos de las pesquerías más grandes del Pacífico mexicano, sardina y calamar, experimentaron decrementos muy significativos en sus niveles de producción. El total del volumen de captura para ambas pesquerías en los años 97 y 98 tuvo una reducción de 212 mil toneladas, equivalentes a unos 16 millones de dólares, considerando únicamente el valor de la captura como materia prima (Magaña, 2004).

Más significativo aún es que, entre ambos años se dejaron de exportar alrededor de 74 millones de dólares por disminuciones en la producción de organismos como calamar, algas marinas, atún, langosta y mariscos enlatados, principalmente abulón. Para el caso del calamar por ejemplo, se registró la pérdida de unos 3 200 empleos directos, correspondiendo algunos de estos a personas que vendieron su patrimonio para hacerse de una embarcación ante la expectativa de lograr ganancias atractivas en poco tiempo. Otra de las pesquerías que registró importantes pérdidas socio-económicas derivadas de El Niño 97-98 fue la de captura y proce-

sado de sardina en la región del Golfo de California. En esta actividad el potencial de empleos directos es de unos 3 mil, pero las malas temporadas pueden reducir esta cifra hasta en un 50% (Magaña, 2004).

Afortunadamente no todo fueron pérdidas. El incremento en los precios del camarón en el mercado, asociado a la captura de 18 mil toneladas en 1997 y 1998, permitió compensar sobradamente el valor de la producción regional en más de 89 millones de dólares. Con esta situación, el balance y el valor de la producción a nivel del Pacífico mexicano se incrementó en más de 78 millones de dólares durante 1997 y 1998. El aumento de los costos del camarón propició un avance en las exportaciones pesqueras nacionales de este crustáceo. Este margen de ganancias se mantuvo a pesar de tener una reducción en el volumen de pesca mayor al 50% del total de 1996, con sólo 95 mil toneladas. Los ingresos en el período 97 y 98 descendieron sólo 6 millones de dólares, representando el 1% de los ingresos por este mercado en 1996 (Magaña, 2004).

### **3. EL MERCADO DE LOS DERIVADOS CLIMÁTICOS**

La primera negociación realizada en el mercado de derivados climáticos tomó lugar en los Estados Unidos entre los años de 1996 y 1997 (Jewson, 2005). El mercado dio un salto durante el fenómeno de El Niño del invierno de 1997-1998, el cual fue uno de los eventos más fuertes que se han registrado. Este fenómeno tuvo mucha publicidad dentro de la prensa Americana. Muchas de las compañías decidieron entonces cubrirse contra el riesgo climático (Alaton, Djehiche y Stillberger, 2002).

Para incrementar el tamaño del mercado y así remover el riesgo de crédito de los contratos que se comercian, el Chicago Mercantil Exchange (CME) inició un mercado electrónico para los derivados climáticos en septiembre de 1999. Este fue el primer mercado organizado donde los derivados climáticos pudieron ser negociados. El CME ofrece contratos de futuros y de opciones con períodos mensuales y de temporada basados en índices de temperatura, lloviznas, nevadas o huracanes en 24 ciudades de los Estados Unidos, seis en Canadá, 10 en Europa, dos en Asia

del Pacífico y tres ciudades en Australia. El valor nocial de los productos climáticos del CME aumentó de USD\$2.2 billones de dólares en el 2004 a USD\$18 billones de dólares en el 2007, con un volumen cercano a un millón de contratos negociados (CME, 2005 y Myers, 2007).

Los derivados climáticos son usualmente estructurados como swaps, futuros, opciones call/put que están basados en diferentes índices climáticos. Algunos índices usados comúnmente son los heating degree-days (HDDs) y los cooling degree-days (CDDs), los cuales fueron originados en el sector energético de los Estados Unidos.

En invierno, los HDDs son usados para medir la demanda de calor, y así poder medir cómo es el frío en esa temporada (cuanto más frío haya, mayor es el número de HDDs). La definición usada dentro del mercado climático es que el número de HDDs sobre un día en particular está definido como:

$$HDD_i = \max(T_0 - T_i, 0) \quad (2.1)$$

donde  $HDD_i$  es el número de HDDs para el día  $i$ ,  $T_i$  es el promedio de la temperatura para el día  $i$ , y  $T_0$  es una temperatura de referencia.

Un índice  $H_n$  de HDDs en período de  $n$  días está usualmente definido como la suma de los  $HDD_i$  de todos los días del período, es decir:

$$H_n = \sum_{i=1}^n HDD_i \quad (2.2)$$

Los CDDs son usados en verano para medir la demanda de energía usada para enfriar, y así poder medir cómo es el calor en esa temporada (cuanto más calor haya, mayor es el número de CDDs). La definición usada dentro del mercado climático es que el número de CDDs sobre un día en particular está definido como:

$$CDD_i = \max(T_i - T_0, 0) \quad (2.3)$$

donde  $CDD_i$  es el número de CDDs para el día  $i$ ,  $T_i$  es el promedio de la temperatura para el día  $i$ , y  $T_0$  es una temperatura de referencia.

Similar a los HDDs, el índice  $C_n$  de CDDs en periodo de  $n$  días está definido como la suma de los  $CDD_i$  de todos los días del periodo, es decir:

$$C_n = \sum_{i=1}^n CDD_i \quad (2.4)$$

Como se puede observar, el número de HDDs o de CDDs para un día específico es el número de grados que la temperatura se desvía a partir de un nivel de referencia. En los Estados Unidos, donde la temperatura es medida en Fahrenheit, la temperatura de referencia  $T_0$  usual es de 65 °F (18.33 °C), mientras que en otros países, donde la temperatura es medida en Celsius, la temperatura de referencia usual es de 18 °C (64.4 °F). La razón es que si la temperatura está por debajo de 18 °C las personas tenderán a usar más energía para calentar sus hogares, mientras que si la temperatura está por encima de los 18 °C las personas empezarán a encender su aire acondicionado para enfriarse.

La temperatura  $T_i$  para un día  $i$ , dada una estación climática específica, se define como:

$$T_i = \frac{T_i^{max} + T_i^{min}}{2} \quad (2.5)$$

donde  $T_i^{max}$  y  $T_i^{min}$  denotan la temperatura máxima y mínima medidas en el día  $i$ . Para este trabajo la temperatura se tomará en grados Celsius.

Fuera del CME existe un número de diferentes contratos negociados en el mercado OTC. Un tipo común de estos contratos son las Opciones. Existen dos tipos de opciones básicas, Calls y Puts. El comprador de un call HDD, por ejemplo, paga al vendedor una prima al inicio del contrato. Al retorno, si el número de HDDs para el periodo del contrato es superior al nivel de ejercicio predeterminado, el comprador recibirá un pago. El tamaño del pago es determinado por el nivel de ejercicio y el nominal. El nominal es la cantidad de dinero que el tenedor o comprador del call recibe por cada grado-día ( $HDD_i$  o  $CDD_i$ ) que se encuentre por encima del nivel de ejercicio durante el periodo del contrato. Frecuentemente la opción tiene un pago máximo distinto (por ejemplo) a las opciones tradicionales sobre acciones (Alaton, Djehiche y Stillberger, 2002).

Una opción climática común puede ser formulada especificando los siguientes parámetros:

- El tipo de contrato (call o put).
- El período del contrato.
- El índice base (HDD o CDD).
- Una estación climática oficial de la cual se obtengan los datos de la temperatura.
- El nivel de ejercicio.
- El nominal.
- El pago máximo (si existe alguno).

Para encontrar la fórmula del pago de una opción,  $K$  denotará el nivel de ejercicio y  $\alpha$  el nominal. Si el período del contrato consiste de  $n$  días y usando la definición de la ecuación (2.2), podemos escribir el pago de un call HDD sin pago máximo como:

$$\chi = \alpha \max(H_n - K, 0) \quad (2.6)$$

Los pagos para contratos similares como los puts HDD y los calls/puts CDD son definidos de la misma forma.

#### 4. MODELACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL MAR DEL PACÍFICO MEXICANO

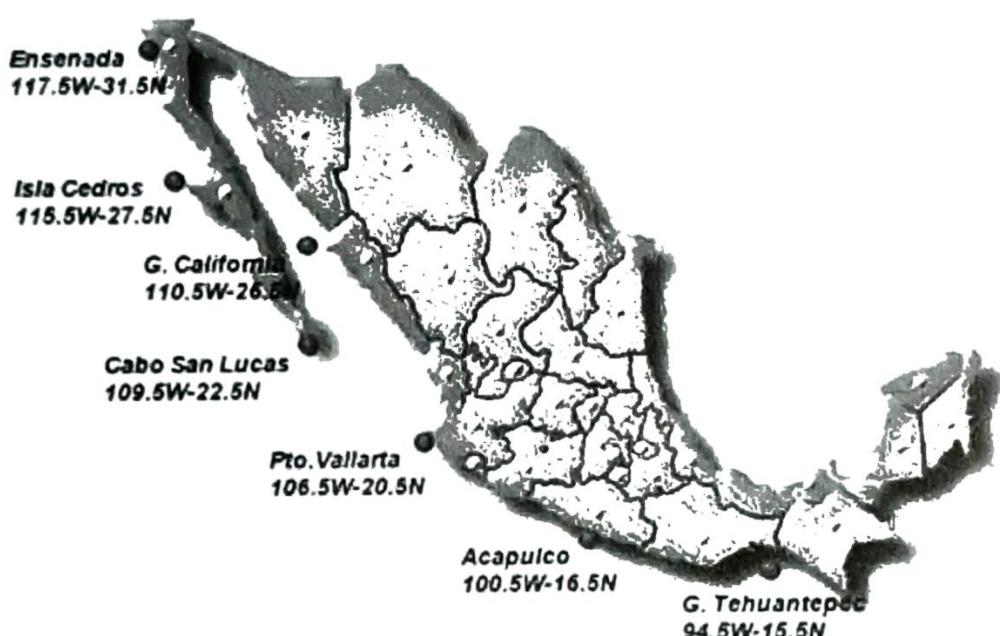
El propósito general de este trabajo es proponer un modelo de valuación de opciones para el Sector Pesquero del Pacífico mexicano, enfocándose en tomar como variable fundamental la temperatura del mar. Por esta razón, se tratará de proponer un modelo que describa la temperatura, para así poder obtener, más adelante, el precio de los derivados climáticos, en particular el de las opciones climáticas basadas en la temperatura, lo que será de gran uso para tener una idea de cómo es el comportamiento del proceso de la temperatura.

Para encontrar el modelo de la temperatura del mar, se cuenta con una base de datos desde el 1 de noviembre de 1981 al 27 de junio de 2010 para diferentes regiones del Pacífico mexicano (Figura 1). Los datos de la temperatura consisten de temperaturas promedio semanales, las cuales fueron medidas de acuerdo al análisis hecho por Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002). La fuente de los datos fue obtenida de la Biblioteca de Datos Climáticos (Climate Data Library) de la Universidad de Columbia (IRI/LDEO, 2010). La Figura 2 muestra la gráfica de la serie de temperaturas promedio semanales de la región del Golfo de California.

En la Figura 1 se puede observar claramente que hay una fuerte variación periódica en la temperatura. Se puede apreciar que debería de ser posible mo-

**FIGURA 1**

**Localización de las regiones de las que se obtuvieron los datos**

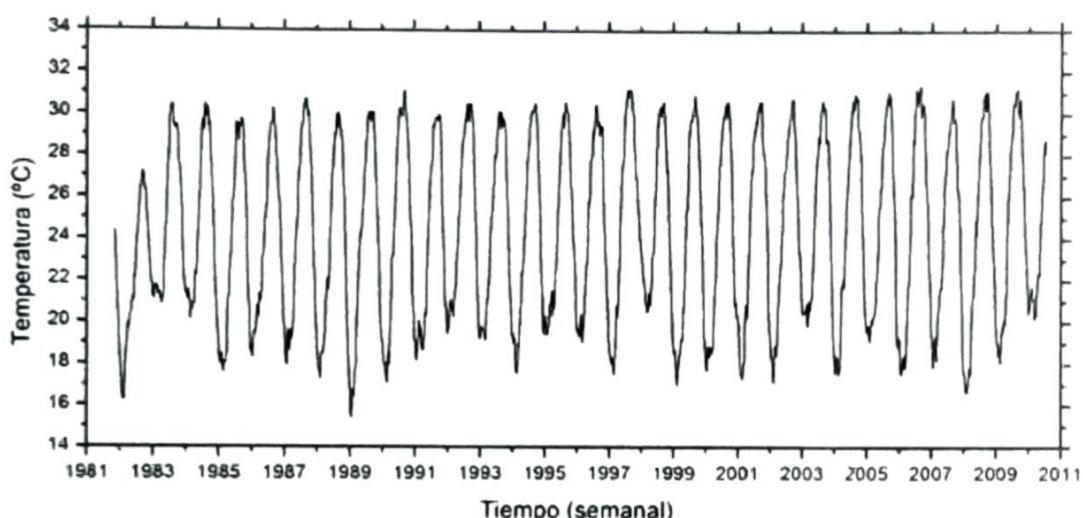


Fuente: Elaboración propia.

delar la dependencia periódica, por ejemplo, con una función seno de la forma  $\operatorname{sen}(\omega t + \varphi)$ , donde  $t$  denota el tiempo, medido en semanas. Así también, es conocido que el periodo de oscilación es de un año, por lo que tenemos que  $\omega = 2\pi/365$ . Debido a que las temperaturas promedio mínimas y máximas para las diferentes regiones no ocurren el 1 de Enero y el 1 Julio respectivamente, se debe introducir, por este motivo, un ángulo de fase  $\varphi$ . Además, al observar las series de datos se puede apreciar una tendencia positiva en los datos. Este ligero aumento en la temperatura puede ser debido al calentamiento global que existe en el mundo, lo que provoca que la temperatura aumente cada año. Por esta razón, como primera aproximación, se asumirá una tendencia lineal debido al calentamiento global.

**FIGURA 2**

**Temperaturas promedio semanal de la región del Golfo de California,  
1981-2010**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de IRI/LDEO (2010) y Reynolds, Rayner, Smith, Stokes y Wang (2002).

Asumiendo lo anterior, el modelo determinista para la temperatura promedio  $T_t^m$  en el tiempo  $t$ , deberá tener la forma:

$$T_t^m = A + Bt + C \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \quad (3.1)$$

donde los parámetros  $A, B, C$  y  $\varphi$  tendrán que ser escogidos de acuerdo a la curva que mejor se ajuste a los datos.

A partir del modelo de la ecuación (3.2) se estiman los valores numéricos de las constantes de la ecuación (3.1) para los datos de las temperaturas de las diferentes regiones, utilizando el método de mínimos cuadrados.

$$Y_t = a_1 + a_2 t + a_3 \sin(\omega t) + a_4 \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

Esto significa que se deben encontrar los parámetros del vector  $\xi = (a_1, a_2, a_3, a_4)$ , cuya solución debe cumplir

$$\min_{\xi} \|Y - X\|^2 \quad (3.3)$$

donde  $Y$  es el vector con los elementos de la ecuación (3.2) y  $X$  es el vector de los datos. Las constantes del modelo (3.1) se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones

$$A = a_1 \quad (3.4)$$

$$B = a_2 \quad (3.5)$$

$$C = \sqrt{a_3^2 + a_4^2} \quad (3.6)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{a_4}{a_3} \right) - \pi \quad (3.7)$$

Insertando los valores numéricos de las diferentes regiones de estudio dentro de la ecuación (3.2), se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1

**Valores numéricos estimados de los parámetros de la ecuación (3.1)  
para las diferentes regiones de estudio**

Región	A	B (X10 <sup>-9</sup> )	C	φ
Ensenada	17.63	8.77	2.65	-2.83
Isla Cedros	18.73	0.08	2.69	0.07
G. California	24.39	18.98	5.97	-2.67
Cabo San Lucas	25.13	12.25	3.59	15.71
Pto. Vallarta	26.83	10.43	3.06	-2.95
Acapulco	28.95	3.51	1.04	-2.84
G. Tehuantepec	28.51	3.79	1.66	-2.20

Fuente: Elaboración propia.

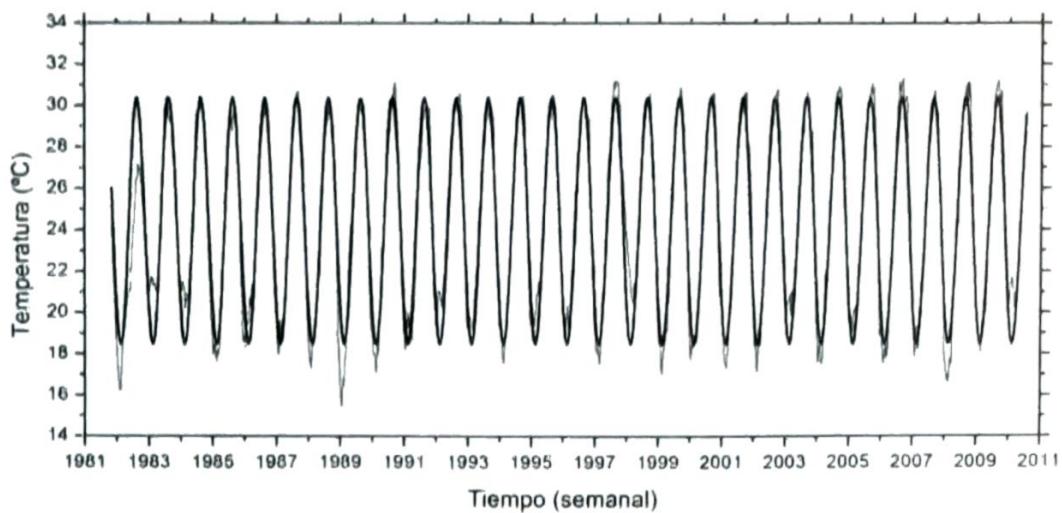
Como se muestra en la Tabla 1 la amplitud de la función seno varía de diferente forma para cada región, esto quizás sea debido a las anomalías de la temperatura ocasionadas por el fenómeno de El Niño. También se puede observar que la temperatura disminuye conforme se va más al norte, como era de esperarse. A partir de la Tabla 1 se obtiene que, para la región del Golfo de California la función de la temperatura promedio  $T_t^m$  es:

$$T_t^m = 24.39 + 18.98 \times 10^{-9} t + 5.97 \sin\left(\frac{2\pi}{365}t - 2.67\right) \quad (3.8)$$

En esta región, como se puede observar en la Tabla 1, se presenta la amplitud más alta de la función seno, ya que es de alrededor de 6 °C, lo cual significa que la diferencia de temperatura entre un día frío y un día caliente es de alrededor de 12 °C. La gráfica de la función (3.8) junto con los datos de la temperatura se muestran en la Figura 3.

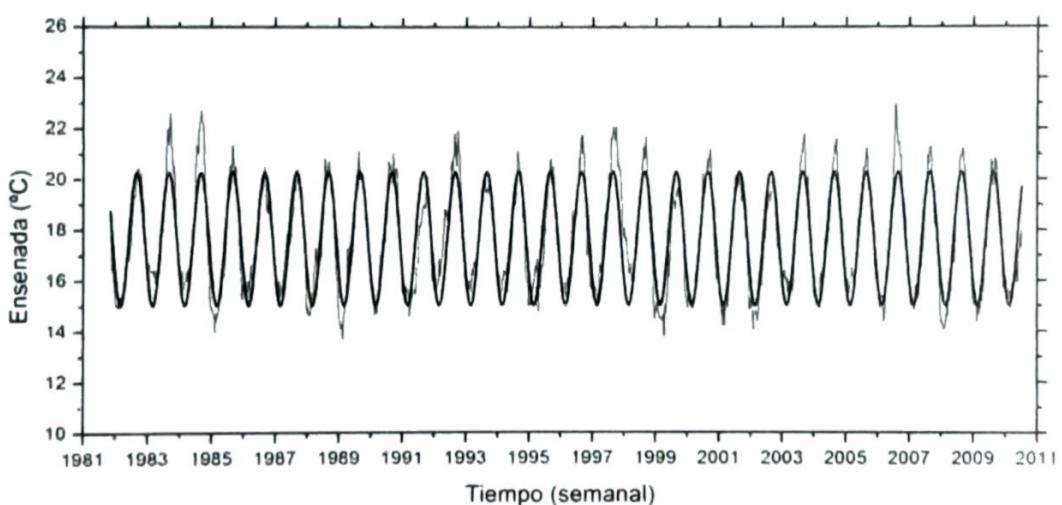
Las gráficas de la función (3.1) para los diferentes valores de la Tabla 1, junto con los datos de la temperatura para las otras regiones de estudio se muestran en la siguiente Figura 4.

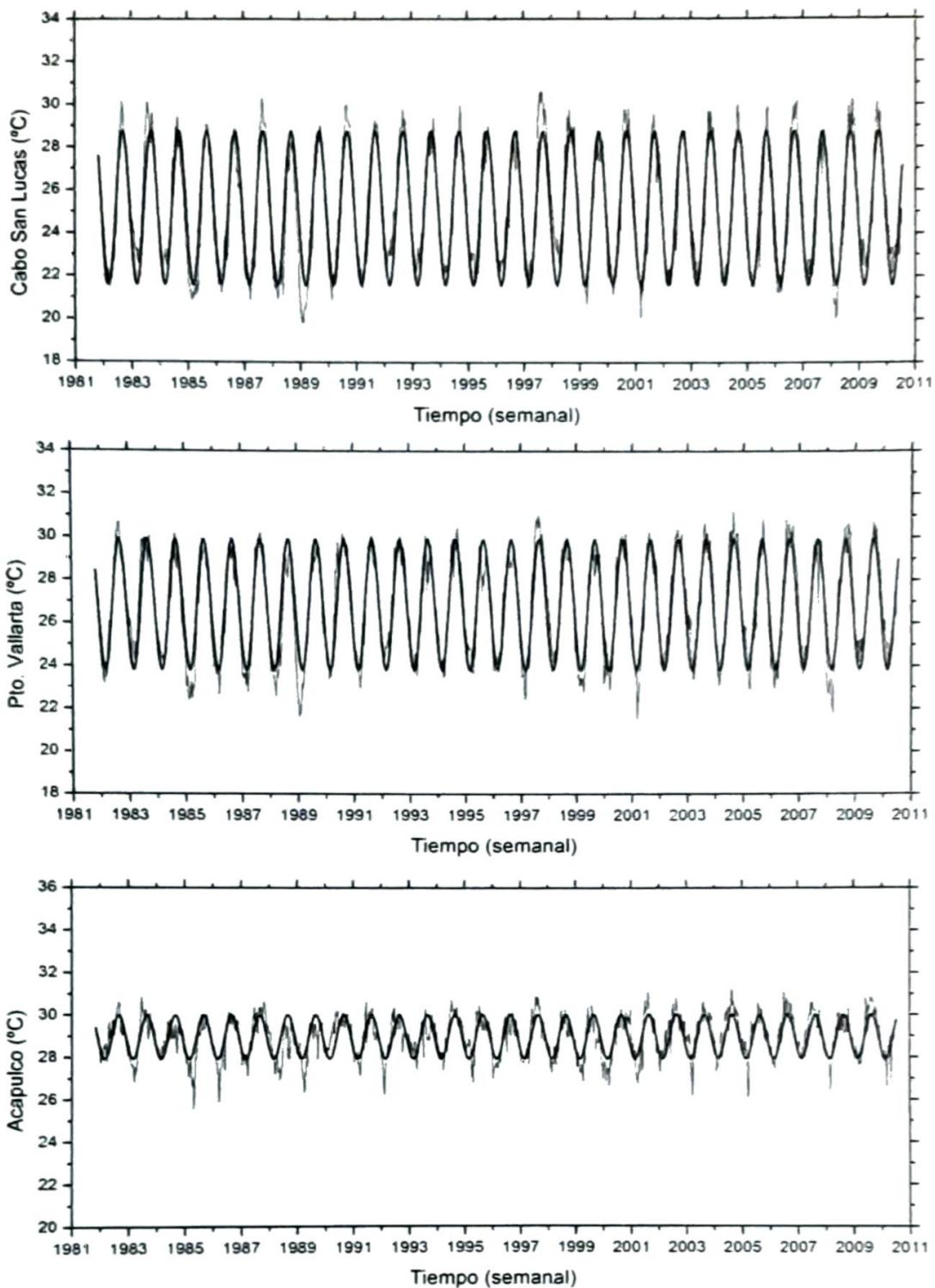
**FIGURA 3**  
**Temperatura promedio (3.8) y datos de las temperaturas de la  
región del Golfo de California, 1981-2010**

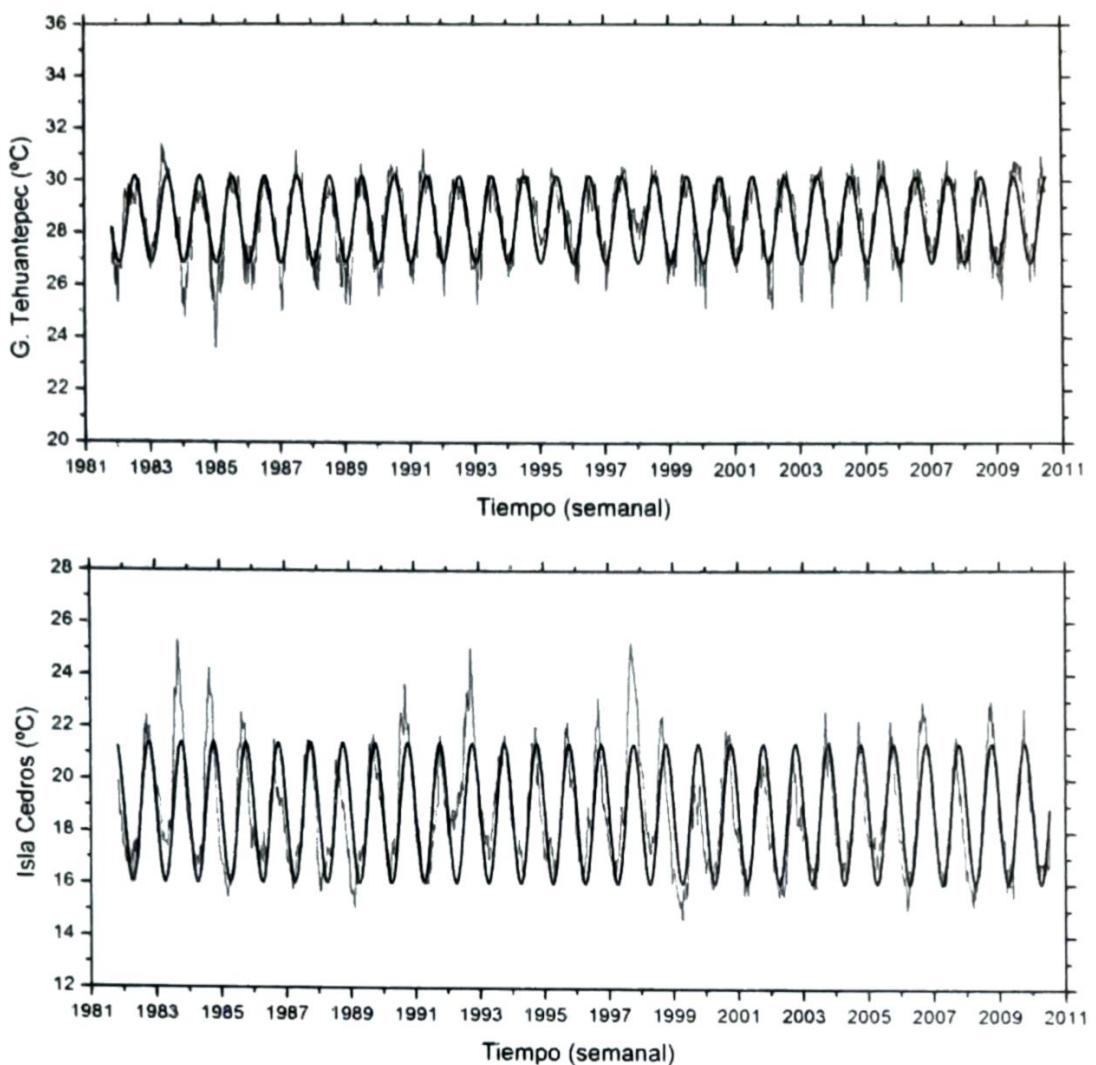


Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA 4**  
**Temperatura promedio de la función (3.1) para los diferentes  
valores de la Tabla 1 junto con los datos de las temperaturas  
para las diferentes regiones de estudio, 1981-2010**







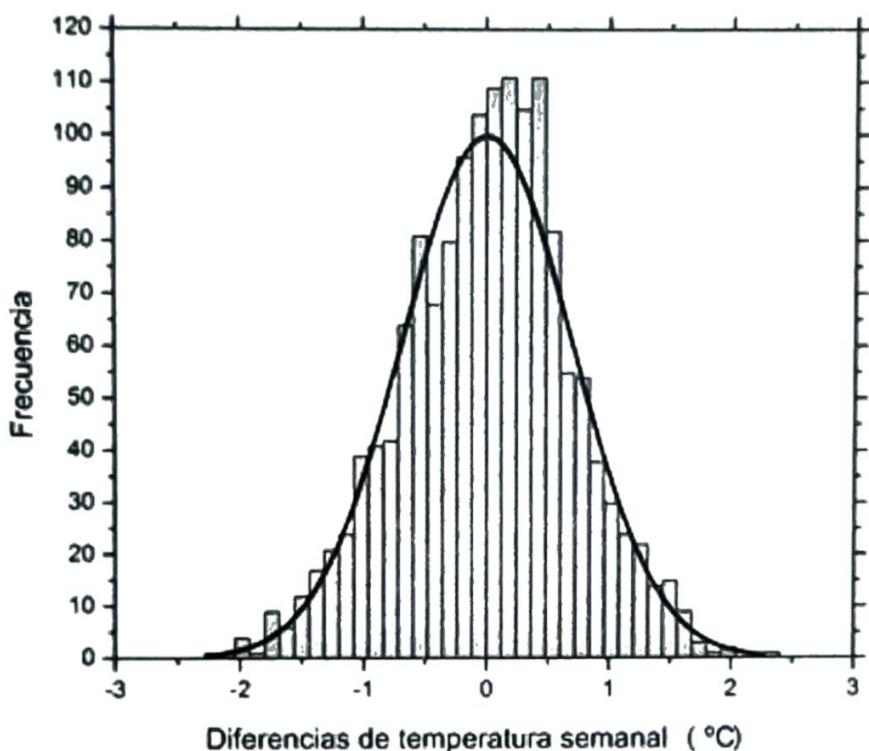
Fuente: Elaboración propia.

Desafortunadamente, las temperaturas no son deterministas. Por esta razón, para obtener un modelo más realista tenemos que agregar algún tipo de ruido al modelo determinista (3.1). Así, podemos escoger un proceso de Wiener estándar ( $W_t, t \geq 0$ ). Además, esto debe de ser razonable no solamente por considerar el trato matemático del modelo, sino también debido a que en la Figura 5 se puede observar una buena correlación de las diferencias de temperatura semanal junto con la distribu-

ción normal correspondiente, lo cual hace pensar que la probabilidad de conseguir diferencias pequeñas en la temperatura promedio semanal será ligeramente indeterminada de acuerdo a lo mencionado por Alaton, Djehiche y Stillberger (2002).

**FIGURA 5**

**Histograma de las diferencias de temperaturas promedio semanal para la región del Golfo de California**



Fuente: Elaboración propia.

Una observación en la serie de datos revela que, la variación cuadrática  $\sigma_t^2 \in \mathbf{R}^+$  de la temperatura varía a través de los diferentes meses del año, pero ésta también se acerca a una constante dentro de cada mes. Por ejemplo, durante el verano y el invierno la variación cuadrática para las diferentes regiones se muestra más alta que durante el resto del año. Por lo tanto, se hace la suposición de que  $\sigma_t$  sea una

función constante por segmentos, es decir que tendrá un valor constante para cada mes. Así  $\sigma_t$ , que especificada como:

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_1, & \text{durante Enero,} \\ \sigma_2, & \text{durante Febrero,} \\ \vdots \\ \sigma_{12}, & \text{durante Diciembre,} \end{cases}$$

donde  $\{\sigma_t\}_{i=1}^{12}$  son constantes positivas. Por lo tanto, un proceso para el manejo del ruido de la temperatura estaría dado como  $(\sigma_t, W_t, t \geq 0)$  (Alaton, Djehiche y Stillberger, 2002).

Por otro lado, es bien sabido que la temperatura no puede, por ejemplo, aumentar día a día por un largo tiempo. Esto significa que un modelo no debería permitir que la temperatura se desvíe de su media más que por períodos cortos de tiempo. En otras palabras, el proceso estocástico que describe a la temperatura debe tener la propiedad de reversión a la media.

Entonces, colocando todas las suposiciones juntas, la temperatura quedaría modelada por un proceso estocástico obtenido de la solución de la siguiente ecuación diferencial estocástica:

$$dT_t = a(T_t^m - T_t)dt + \sigma_t dW_t \quad (3.9)$$

donde  $a \in \mathbf{R}$  determina la rapidez de reversión a la media. A la solución de dicha ecuación usualmente se le conoce como Proceso de Ornstein-Ulenbeck.

El problema con la ecuación (3.9) es que, de hecho, a la larga no tiene reversión a la media  $T_t^m$ . Por lo que, para obtener un proceso que realmente revierta a la media (3.1) tenemos que agregar el término

$$\frac{dT_t^m}{dt} = B + \omega C \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.10)$$

dentro del coeficiente del tiempo en (3.9). Como la temperatura media  $T_t^m$  no es constante, el término (3.10) ajustará el coeficiente del tiempo, tal que la solución de la ecuación diferencial estocástica (3.9) obtenga a la larga media  $T_t^m$  (Alaton, Djehiche y Stillberger, 2002).

Por lo tanto, iniciando en  $T_s = x$  se consigue el siguiente modelo para la temperatura:

$$dT_t = \left\{ \frac{dT_t^m}{dt} + a(T_t^m - T_t) \right\} dt + \sigma_t dW_t, \quad t > s \quad (3.11)$$

cuya solución es:

$$T_t = (x - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_s^m + \int_s^t e^{-a(t-\tau)} \sigma_\tau dW_\tau \quad (3.12)$$

donde:

$$T_t^m = A + Bt + C \sin(\omega t + \varphi)$$

De acuerdo a lo presentado en Alaton, Djehiche y Stillberger (2002) se desarrollarán dos estimadores de  $\sigma$  a partir de la serie de datos. Dado un mes específico  $\mu$  de  $N_\mu$  semanas, se denota como  $T_j, j = 1, \dots, N_\mu$  a las temperaturas observadas durante el mes  $\mu$ . El primer estimador está basado en las variaciones cuadráticas de  $T_j$  (Basawa y Prasaka Rao, 1980) como:

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{N_\mu} \sum_{j=0}^{N_\mu-1} (T_{j+1} - T_j)^2 \quad (3.13)$$

El segundo estimador es derivado de la discretización de la ecuación (3.11) y, suponiendo que la ecuación discretizada se comporta como una ecuación de regresión, se tiene que el segundo estimador de  $\sigma_\mu$ , durante un mes dado  $\mu$  está dado como (Brockwell y Davis, 1990):

$$\sigma_\mu^2 = \frac{1}{N_\mu - 2} \sum_{j=1}^{N_\mu} (\tilde{T}_j - \hat{a}T_{j-1}^m - (1 - \hat{a})T_{j-1})^2 \quad (3.14)$$

donde

$$\tilde{T}_j \equiv T_j - (T_j^m - T_{j-1}^m)$$

Para poder encontrar la estimación de  $\sigma_\mu$  en (3.14) se necesita encontrar un estimador de  $a$ . Para esto, es apropiado estimar el parámetro de reversión a la media  $a$  usando el método de funciones de estimación martingala sugerido por Bibby y Sørensen (1995). Basándose en las observaciones de la temperatura sobre  $n$  semanas, un estimador eficiente de  $\hat{a}_n$  de  $a$ , está dado como (Alaton, Djehiche y Stillberger, 2002):

$$\hat{a}_n = -\ln \left( \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \{T_i - T_i^m\}}{\sum_{i=1}^n Y_{i-1} \{T_{i-1} - T_{i-1}^m\}} \right) \quad (3.15)$$

donde

$$Y_{i-1} \equiv \frac{T_{i-1}^m - T_{i-1}}{\sigma_{i-1}^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

Insertando los valores de las temperaturas observadas en las diferentes regiones dentro de las ecuaciones (3.13) y (3.14), se obtienen las estimaciones de  $\sigma$  listadas en la Tabla 3. Como era de esperarse, las variaciones que se muestran en las  $\sigma$  estimadas oscilan diferente para cada región, esto se puede atribuir probablemente al fenómeno de El Niño ya que, en cada región afecta en diferente época del año por lo cual, para algunos meses, se observan variaciones altas en las estimaciones de  $\sigma$ .

Con los valores promedio de  $\sigma$  de la Tabla 3 se obtienen los parámetros de reversión a la media de las diferentes regiones de estudio. Estos parámetros se encuentran listados en la Tabla 4. De la Tabla 4 se puede observar que, la rapidez con la que regresan a la media es diferente para cada región, esto se atribuye (de nuevo) al fenómeno de El Niño ya que, para las regiones que son más afectadas, el parámetro de reversión resultó ser más pequeño que en las regiones donde El Niño no afecta de la misma forma (ver Figura 6).

El que una señal (en este caso de temperatura) presente un valor pequeño en su reversión a la media, significa que le tomará un “mayor tiempo” en volver a su nivel de equilibrio. En este caso, las regiones que se ven más afectadas por el fenómeno

TABLA 3

**Valores promedio de  $\sigma$  de las diferentes regiones de estudio del Pacífico mexicano, donde**  
**ENS = Ensenada, IC = Isla Cedros, GC = Golfo de California,**  
**CSL = Cabo San Lucas, PV = Puerto Vallarta, AC = Acapulco y**  
**GT = Golfo de Tehuantepec**

Mes	ENS	IC	GC	CSL	PV	AC	GT
Enero	0.29	0.34	0.46	0.44	0.45	0.29	0.72
Febrero	0.35	0.38	0.53	0.37	0.41	0.32	0.74
Marzo	0.49	0.53	0.67	0.51	0.53	0.48	0.67
Abril	0.52	0.50	0.68	0.48	0.53	0.56	0.54
Mayo	0.43	0.47	0.71	0.56	0.65	0.58	0.54
Junio	0.44	0.55	0.66	0.74	0.70	0.68	0.49
Julio	0.49	0.63	0.48	0.77	0.59	0.47	0.45
Agosto	0.44	0.53	0.43	0.51	0.57	0.46	0.37
Septiembre	0.50	0.73	0.49	0.59	0.52	0.44	0.42
Octubre	0.51	0.53	0.69	0.50	0.50	0.42	0.67
Noviembre	0.52	0.48	0.84	0.55	0.49	0.37	0.67
Diciembre	0.45	0.49	0.68	0.55	0.51	0.37	0.60

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4

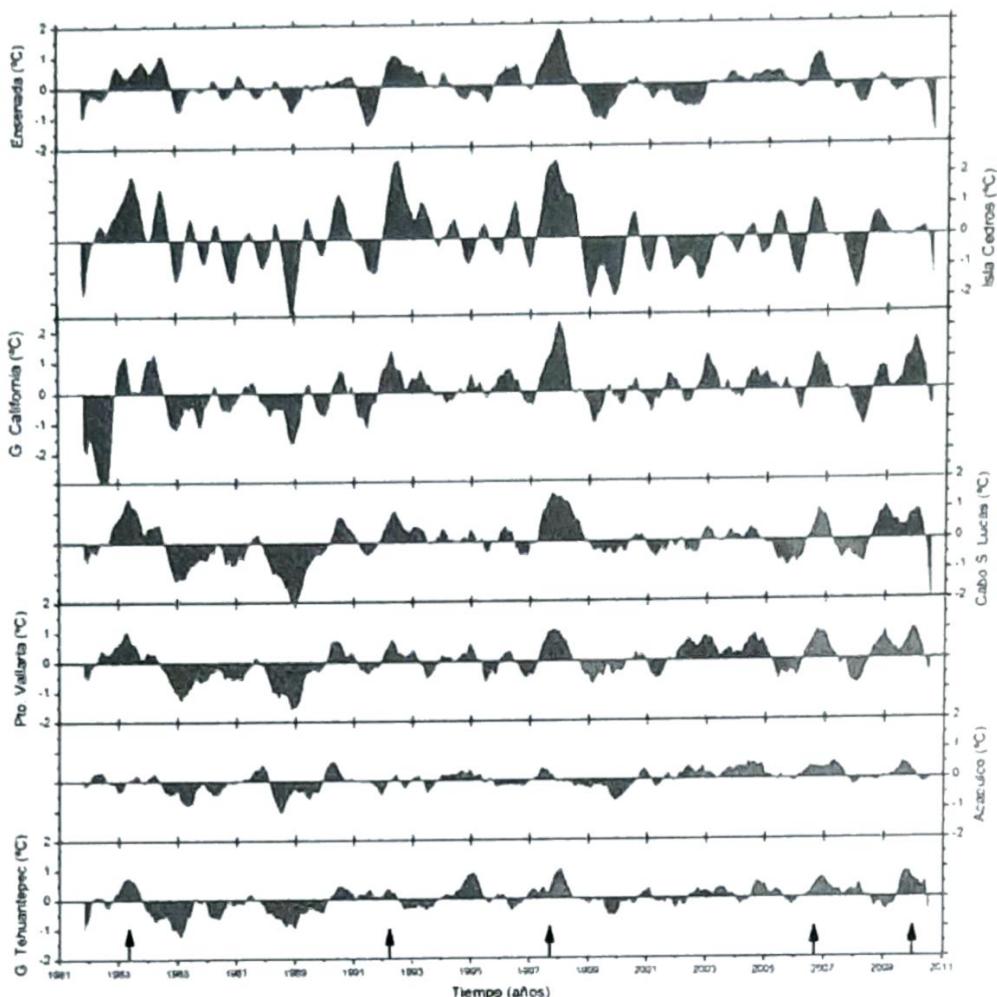
**Parámetros de reversión a la media  $a$  estimados a partir de (3.15) para las diferentes regiones de estudio**

Región	Parámetro $a$
Ensenada	0.103
Isla Cedros	0.070
G. California	0.075
Cabo San Lucas	0.116
Pto. Vallarta	0.143
Acapulco	0.233
G. Tehuantepec	0.278

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 6

**Ruido que se presenta en la señal de la temperatura en las diferentes regiones del Pacífico mexicano**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de IRI/LDEO (2010). La información se obtuvo a partir del residual entre los datos de temperatura y el modelo determinista. Las flechas indican eventos del fenómeno de El Niño.

de El Niño, en su señal de temperatura presentan un mayor ruido, como el que se muestra en la Figura 6, lo cual ocasiona que le tome “mayor tiempo” a la señal en volver a su nivel de equilibrio y por consiguiente obtener un valor pequeño en su parámetro de reversión a la media.

Habiendo estimado todos los parámetros desconocidos del modelo de temperatura (3.11)-(3.13), podemos proceder a simular las trayectorias del proceso de Ornstein-Uhlenbeck (OU) haciendo uso del modelo de simulación Monte Carlo. Para llevar a cabo la simulación del proceso se necesita encontrar, a partir de (3.11), una ecuación en tiempo discreto. Resolviendo la integral en (3.12) entre  $s$  y  $t$ , con  $t > s$  se obtiene lo siguiente (Dagpunar, 2007):

$$T_t = (T_s - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_t^m + \sigma_\mu \sqrt{\frac{1 - e^{-2a(t-s)}}{2a}} W_{(s,t)} \quad (3.17)$$

donde  $\{W_{(s,t)}\}$  son variables aleatorias independientes para intervalos discontinuos  $\{(s,t)\}$ . Finalmente, para simular un proceso de OU en el intervalo  $\Delta t$ , se obtiene que:

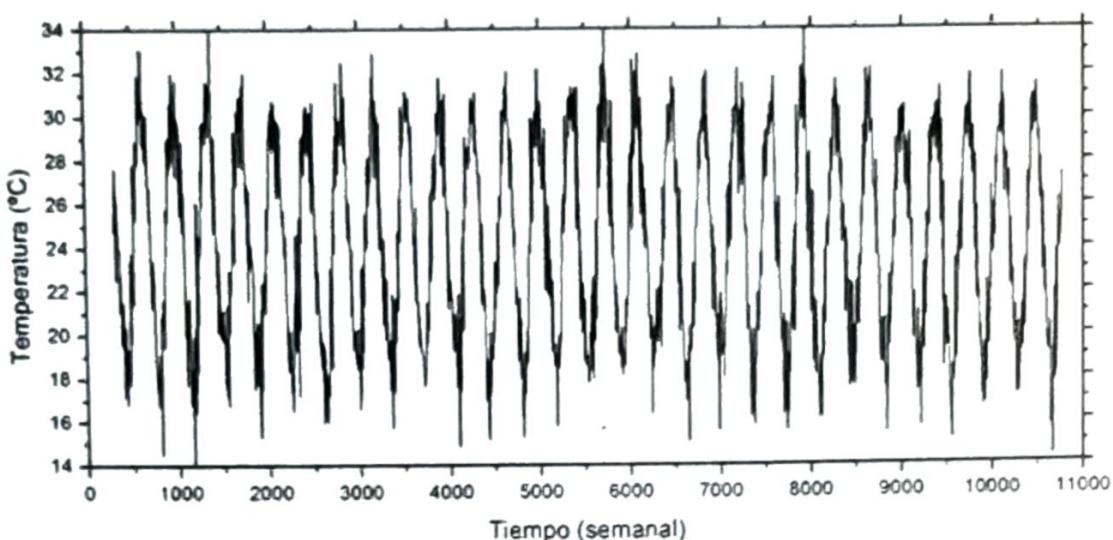
$$T_{t+1} = (T_t - T_t^m)e^{-a\Delta t} + T_{t+1}^m + \sigma_\mu \sqrt{\frac{1 - e^{-2a\Delta t}}{2a}} \epsilon_t \quad (3.18)$$

donde  $\epsilon_t$  es un número procedente de una distribución  $N(0,1)$ , el cual fue generado a partir del método de Box-Müller. Por lo tanto, haciendo uso de la ecuación (3.18), en la Figura 7 se muestra una posible trayectoria de la temperatura durante los siguientes años para la región del Golfo de California. Comparando esta simulación con las temperaturas reales graficadas en la Figura 2, se puede concluir (al menos visualmente) que, el modelo de la temperatura (3.11)-(3.13) tiene las mismas propiedades que las temperaturas observadas. Sin embargo, la trayectoria simulada presenta un poco de más ruido que las temperaturas observadas en la Figura 2, esto puede ser debido a que (de acuerdo a las resultados

mostrados en la Tabla 3) la estimación de  $\sigma$  promedio resultó ser mayor que la que se presenta en la serie original.

**FIGURA 7**

**Una trayectoria del proceso de Ornstein-Uhlenbeck de la región del Golfo de California que será usada para modelar la temperatura**



Fuente: Elaboración propia.

## 5. CÁLCULO DEL PRECIO DEL DERIVADO CLIMÁTICO

El mercado para los derivados climáticos es un típico ejemplo de un mercado incompleto, y más aún en el mercado de los derivados en México ya que, se trata de un mercado joven debido a que la creación del mercado de derivados listados en México inició en 1994 hasta su inicio formal de operaciones el 15 de diciembre de 1998, a través de la Bolsa de Derivados de México conocida como MexDer (Mercado Mexicano de Derivados, S.A. de C.V.).

Decimos que el mercado de los derivados climáticos es un mercado incompleto debido a que la temperatura no es negociable. Por lo tanto, se tiene que

considerar un precio de riesgo de mercado para poder obtener el precio de dichos contratos.

Como aún no existe un mercado real de derivados climáticos del cual se puedan obtener los precios de dichos contratos, se asume por simplicidad que el precio de riesgo de mercado  $\lambda$  es constante. Además, de acuerdo a Alaton, Djehiche y Stillberger (2002), se asume dar un activo libre de riesgo con tasa de interés constante  $r$  y un contrato que por cada grado Celsius paga una determinada cantidad monetaria. Así, bajo una medida martingala  $\mathbf{Q}$ , caracterizada por el precio de riesgo de mercado  $\lambda$ , el proceso para el precio, denotado por  $T_t^m$ , debe satisfacer la siguiente dinámica:

$$dT_t^m = \left\{ \frac{dT_t^m}{dt} + a(T_t^m - T_t) - \lambda\sigma_t \right\} dt + \sigma_t dV_t \quad (4.1)$$

donde  $(V_t, t \geq 0)$  es un proceso de  $\mathbf{Q}$ -Wiener. Así, el precio de un derivado está expresado como un valor esperado descontado bajo la medida martingala  $\mathbf{Q}$ , por lo tanto el valor esperado y la varianza de  $T_t^m$  bajo la medida  $\mathbf{Q}$  se calcula como sigue (Alaton, Djehiche y Stillberger, 2002):

$$\mathbb{E}^{\mathbf{Q}}[T_t | \mathcal{F}_s] = (T_s - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_s^m - \frac{\lambda\sigma_i}{a}(1 - e^{-a(t-s)}) \quad (4.2)$$

$$\text{Var}[T_t | \mathcal{F}_s] = \frac{\sigma_i^2}{2a}(1 - e^{-2a(t-s)}) \quad (4.3)$$

Entonces, para simular trayectorias de la temperatura bajo el riesgo neutral en la medida  $\mathbf{Q}$ , sólo debemos agregar el término del precio de riesgo de mercado a las ecuaciones (3.17) y (3.18) para poder llevar a cabo la simulación del proceso. Por lo tanto, haciendo uso de las ecuaciones (4.2) y (4.3) para simular un proceso de Ornstein-Uhlenbeck bajo el riesgo neutral en la medida  $\mathbf{Q}$ , con  $t > s$  obtenemos lo siguiente:

$$T_t = (T_s - T_s^m)e^{-a(t-s)} + T_s^m - \frac{\lambda\sigma_i}{a}(1 - e^{-a(t-s)}) + \sigma_\mu \sqrt{\frac{1 - e^{-2a(t-s)}}{2a}} W_{(s,t)} \quad (4.4)$$

donde  $\{W_{\beta,t}\}$  son variables aleatorias independientes para intervalos discontinuos  $\{(s,t)\}$ . Y para simular un proceso de OU en el intervalo  $\Delta t$ , se obtiene que:

$$T_{t+1} = (T_t - T_t^m)e^{-a\Delta t} + T_{t+1}^m - \frac{\lambda\sigma_t}{a}(1 - e^{-a\Delta t}) + \sigma_t \sqrt{\frac{1 - e^{-2a\Delta t}}{2a}} \epsilon_t \quad (4.5)$$

donde  $\epsilon_t$  es un número procedente de una distribución  $N(0,1)$ , el cual fue generado a partir del método de Box-Müller.

Antes de calcular algún precio usando el método de simulación Monte Carlo, primero se debería encontrar el parámetro  $\lambda$  de acuerdo a las condiciones del mercado, observando los precios de algunos contratos. Sin embargo, desafortunadamente aún no existe un desarrollo de mercado de derivados climáticos en México, por lo que asumiremos que el precio de riesgo de mercado  $\lambda$  es una cantidad constante para la cual se tomaran distintos valores a fin de obtener el precio de las diferentes opciones que se propongan en el trabajo.

Otro valor que se debe encontrar debido a este mercado de derivados incompleto es el nominal  $a$ , el cual, en este caso, corresponde a la cantidad de dinero que el tenedor o comprador del call recibe por cada grado-semana ( $HDWi$  o  $CDWi$  de sus siglas en inglés heating degree-week y cooling degree-week) que se encuentre por encima del nivel de ejercicio  $K$  durante el período del contrato. Por esta razón, para poder obtener una estimación del nominal  $a$ , se propone analizar en particular la variación del volumen de producción en peso vivo de dos de las pesquerías más grandes de Sector Pesquero en México, la Sardina y el Camarón, contra la temperatura del mar del Pacífico mexicano. Estas pesquerías recientemente notables el impacto del fenómeno de El Niño, por lo tanto creemos que un análisis de regresión lineal nos puede proporcionar una estimación del nominal  $a$ , ya que se obtendría la variación del volumen de producción por cada grado de temperatura del mar, para así obtener un valor del nominal utilizando los precios del mercado de las pesquerías.

Para poder realizar el cálculo del precio de las opciones climáticas se necesita también la temperatura de referencia. Como se mencionó anteriormente, la temperatura de referencia para los derivados de temperatura climática es de 18 °C en los contratos de temperatura que se cotizan en los Estados Unidos y algunos países de

Europa. En este caso, como se trata de la temperatura del mar no se cuenta con un nivel de referencia fijo o usual debido, de nueva cuenta, a la inexistencia de un mercado completo, sin embargo este parámetro puede ser acordado en el contrato, en el cual el comprador puede establecer la temperatura de referencia bajo la cual resultan afectadas sus ganancias y así poder obtener cobertura contra las anomalías en la temperatura del mar, como podría ser la presencia del fenómeno de El Niño.

Como estamos tratando el caso particular de las pesquerías de Sardina y de Camarón, se propone que la temperatura de referencia para el diseño de una opción call HDW en la región del Golfo de California para la pesquería de Sardina sea de 20 °C, esto debido a que la sardina prefiere temperaturas en el intervalo de un 17 a 20 °C, ya que por encima de esta temperatura el porcentaje de mortandad se incrementa aproximadamente en un 40% (Hernández y Barón, 2009), y como la temperatura promedio mínima en la región del Golfo de California es de 17 °C, ésta resulta encontrarse dentro del intervalo preferencial de la sardina (ver Figura 2). Para la pesquería de Camarón se propone que la temperatura de referencia para el diseño de una opción call CDW para la región del Golfo de California sea de 21 °C, esto debido a que el camarón (similar a lo que sucede con la sardina) prefiere temperaturas aproximadamente en el intervalo de 21 a 31 °C (Ramos y Ramos, 2006), y como la temperatura promedio máxima en la región del Golfo de California es de 31 °C, ésta resulta encontrarse dentro del intervalo preferencial del camarón. Por lo tanto, los intervalos en las temperaturas preferenciales de las dos pesquerías nos resulta muy conveniente para poder establecer una temperatura de referencia para los contratos en la región del Golfo de California, la cual además es la región de mayor producción de estas especies (ver Figura 2).

Otro de los parámetros que son importantes para el cálculo del precio de la opción, es el nivel de ejercicio  $K$ , sin embargo, al igual que la temperatura de referencia, este valor puede ser acordado en el contrato, ya que  $K$  depende también del período del contrato.

Por lo tanto, ya que se tienen estos valores ( $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $T_0$ ,  $K$ ), podemos obtener el precio de una opción climática para el caso particular de las pesquerías de Sardina y Camarón del Sector Pesquero del Pacífico mexicano. La Tabla 5 muestra las especificaciones de una opción call HDW y una opción call CDW para los meses

de Marzo y Octubre de 2011 debido a que, en estos meses se registra un volumen promedio alto de producción para las pesquerías de Sardina y Camarón respectivamente. Además, en estos meses se encuentran los intervalos preferenciales de temperatura para cada una de estas especies.

**TABLA 5**  
**Especificaciones de dos opciones call**

Parámetro	Opción I	Opción II
Región	Golfo de California	Golfo de California
Índice	HDW	CDW
Tipo	Call	Call
Período	Marzo 2011	Octubre 2011
Ejercicio	$K$	$K$
Nominal	$\alpha$	$\alpha$

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el cálculo del precio de la opción climática se propone utilizar el método de simulación Monte Carlo, debido a que no existe una fórmula cerrada similar a la propuesta por Black-Scholes. Recordemos que el método de simulación Monte Carlo es una técnica con la cual podemos calcular numéricamente el valor esperado. Así, una formula de aproximación para calcular el valor esperado es:

$$E[g(F(t))] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(\bar{F}(t, w_i)) \quad (4.6)$$

donde  $\bar{F}$  es la solución de alguna ecuación diferencial estocástica,  $g$  puede ser cualquier función y  $F$  es una aproximación de  $\bar{F}$ , la cual tiene que ser usada si la solución exacta de  $F$  no está disponible. La idea es simular tantas trayectorias del proceso utilizando el promedio aritmético para aproximarse al valor esperado.

Una vez encontrando el valor esperado para algún proceso, calculamos el precio de la opción call o put en términos del valor esperado de la siguiente forma:

$$c(t) = e^{-rt} E[g(F(t))] \quad (4.7)$$

$$p(t) = e^{-rt} E[g(F(t))] \quad (4.8)$$

donde  $r$  se puede elegir como la tasa libre de riesgo.

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha propuesto un modelo para entender la dinámica de la temperatura promedio semanal del mar, tomando como referencia estudios previos sobre derivados climáticos en donde utilizan como índice fundamental la temperatura del ambiente. En las secciones anteriores se ha explicado por qué un proceso con reversión a la media y una combinación de comportamiento periódico y estocástico es adecuado; aunque este modelo de temperatura es una simplificación del mundo real, se puede observar que el modelo se ajusta en buena forma a los datos empíricos de la temperatura. Uno podría incluir en el modelo un mejor ajuste del ruido considerando una volatilidad estocástica y así poder encontrar un modelo más realista.

Debido al crecimiento lento del mercado de derivados en México, resulta difícil poder encontrar una mejor descripción para estimar el valor del precio de riesgo de mercado en la práctica. Seguramente, con el desarrollo del mercado de derivados climáticos se podrá incluir una mejor dinámica para el precio de riesgo de mercado.

Es importante también tomar en cuenta que el valor del nominal es un parámetro que se debe considerar debido a que éste muestra cómo varía el volumen de producción de la especie con respecto a la temperatura del mar, por lo cual se vuelve un claro indicador de las pérdidas para el caso particular del Sector Pesquero, por lo tanto se cree que un análisis de regresión lineal podría proporcionar una estimación de este valor. Aunque sabemos que el valor del nominal puede ser acordado en el contrato, debemos recordar que no existe un desarrollo del mercado de derivados, lo cual vuelve más complicado la estimación de este valor.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alaton, P. B. Djehiche y D. Stillberger (2002), "On modeling and pricing weather derivatives", *Applied Mathematical Finance*, 9(1): 1-20.
- Baqueiro, C. E. y T. Sinha (2005), *Seguros de lluvia mediante el uso de derivados, Tesis*.
- Basawa, I. V. y B. L. S. Prasaka Rao (1980), *Statistical Inference for Stochastic Process*, Academic Press.
- Benth, F. E., W. K. Härdle y C. B. López (2009), "Pricing of Asian temperature risk", SFB649 Working Paper, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Benth, F. E. y J. Šaltytė-Benth (2005), "Stochastic Modelling of Temperature Variations with a View Towards Weather Derivatives", *Applied Mathematical Finance* 12(1): 53-85.
- Benth, F. E. y J. Šaltytė-Benth (2007), "The volatility of temperature and pricing of weather derivatives", *Quantitative Finance* 7(5): 553-561.
- Bibby, B. M. y M. Sørensen (1995), "Martingale estimation functions for discretely observed diffusion processes", *Bernoulli* 1(1/2): 17-39.
- Brockwell, P. J. y R. A. Davis (1990), *Time Series: Theory and Methods*, 2a ed. Springer.
- Cienfuentes, L. J. L., G. P. Torres y M. M. Frías (2003), *El océano y sus recursos, IX. La pesca* (81), 5a ed. (La ciencia para todos) Fondo de Cultura Económica, México, D.F.
- CME (2005), "An introduction to cme weather products", <<http://www.levow.com/SGdownload/-Commodities/CME Weather products.pdf>>, *CME Alternative Investment Products*.
- Dagpunar, J. S. (2007), *Simulation and Monte Carlo with applications in finance and MCMC*, John Wiley & Sons, London.
- Díaz, T. J. y M. F. Venegas (2001), "Política Agrícola y Contratos de Futuros: Un Modelo de Arbitraje", *Momento Económico* (115): 2-21.
- Fernández, D. J. J. y D. M. M. Gregorio (2005), "Valuación Actuarial de Bonos Catastróficos para Desastres Naturales en México", *El Trimestre Económico* 72(288): 877-912.

- Hernández, M. y B. Barón (2009), Sardina, especie indicadora de variabilidad climática, *Gaceta CICESE* 136, *Todos@CICESE*, Sección Ciencia y Tecnología. <<http://gaceta.cicese.mx/>>.
- Ibarra P. H. (2003), *Administración de riesgos naturales en México: un caso práctico en el diseño de un derivado climático para la agricultura*, Tesis.
- IRI/LDEO (2010), *Climate Data Library*, IGOSS nmc Reyn SmithOlv2 weekly sst. <[http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn\\_SmithOlv2/.weekly/.sst/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn_SmithOlv2/.weekly/.sst/)>.
- Jewson, S. (2004), “Introduction to Weather Derivative Pricing”, *The Journal of Alternative Investments*: 57-64.
- Jewson, S. y A. Brix (2005), *Weather Derivative Valuation: The Meteorological, Statistical, Financial and Mathematical Foundations*, Cambridge University Press.
- López, C. B. (2003), *Valuación de Bonos Catastróficos para terremotos en México*, Tesis.
- López C. B. (2006), *Pricing Catastrophic Bonds for Earthquakes in Mexico*, Master, Tesis.
- Magaña, V., J. L. Pérez y C. Conde (1998), “El fenómeno de El Niño y la Oscilación del sur y sus impactos en México”, *Revista Ciencias* 51: 14-18.
- Magaña, R. V. (ed) (2004), *Los Impactos de El Niño en México*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Secretaría de Gobernación, 229 p.
- McPhaden, M. (2001), “El Niño and La Niña: causes and global consequences”, en: M. Cracken y J. Perry (ed), *Encyclopedia of global environmental change I*, John Wiley & Sons, New York: 929-948.
- Myers, R. (2007), “What Every CFO Needs to Know Now About Weather Risk Management”, <<http://www.cmegroup.com/trading/weather/>>, CME Group.
- Ramos, C. S. y S. E. Ramos (2006), “Abundancia relativa de postlarvas de camarones peneidos en la bahía Salinas de Marqués, Golfo de Tehuantepec, México”. Marzo a junio de 1999, *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 41(1): 121-128.
- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, D. C. Stokes y W. Wang (2002), “An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate”, *Journal of Climate* 15: 1609-1625.

- Richards, T. J., M. R. Manfredo y D. R. Sanders (2004), "Pricing Weather Derivatives", *American Journal of Agricultural Economics*. 86(4): 1005-1017.
- Ropelewsky, C.F. y M. S. Halpert (1989), "Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation", *Journal of Climate* 2: 268-284.
- SAGARPA (1984-2008), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, CONAPESCA, Anuarios Estadísticos de Acuacultura y Pesca de 1984 a 2008, <[http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona\\_anuario\\_estadistico\\_de\\_pesca](http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona_anuario_estadistico_de_pesca)>.
- SEMARNAT (2009), Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Compendio de Estadística Ambiental, <<http://www.semarnat.gob.mx/>>.
- Trenberth, K.E. (1997), "The definition of El Niño", *Bulletin of American Meteorological Society*, 78: 2771-2777.
- Trujillo, P. M. L. y T. R. C. Navarro (2002), *Derivados Climáticos*, Tesina.
- Zapranis, A. y A. Alexandridis (2008), "Modelling the Temperature Time-dependent Speed of Mean Reversion in the Context of Weather Derivatives Pricing", *Applied Mathematical Finance* 15(4): 355-386.