



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Evolución de la temperatura superficial del
mar en el observatorio costero de Mazatlán
(1973 – 2016)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A :

Carlos Alberto Herrera Becerril

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza

Ciudad Universitaria, CDMX 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Carlos Alberto Herrera Becerril
Licenciatura en Ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
309054205

2. Datos del tutor

Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza
Laboratorio Cambio Global y Climático
U.A. Procesos Oceánicos y Costeros
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

3. Datos del sinodal 1

Dr. Jorge Zavala Hidalgo
Grupo de Interacción Océano-Atmósfera
Centro de Ciencias de la Atmósfera
Universidad Nacional Autónoma de México

4. Datos del sinodal 2

Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano
Catedrático CONACYT
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

5. Datos del sinodal 3

Dr. Yohan Alexander Correa Metrio
Departamento de Paleontología
Instituto de Geología
Universidad Nacional Autónoma de México

6. Datos del sinodal 4

Dra. Elsa Arellano Torres
Departamento de Ecología y Recursos Naturales
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Datos del trabajo escrito

Evolución de la temperatura superficial del mar en el observatorio costero de Mazatlán
(1973– 2016)

47 pp.

2018

Agradecimientos Académicos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ciencias, la Licenciatura en Ciencias de la Tierra y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por el apoyo, las instalaciones y los recursos brindados durante la realización de este proyecto, y durante toda mi formación académica.

A la Unidad de Informática Marina (UNINMAR) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, por el apoyo para la obtención de los datos satelitales utilizados en este proyecto.

Al Dr. Juan José Luis Carballo Cenizo, por haber facilitado la serie de temperatura del mar "Venados", la cual forma parte fundamental del este trabajo.

Al Lic. Ernesto Eduardo Gómez de la Peña, por el apoyo para la descarga de datos del reanálisis ERA-Interim.

A los miembros del jurado, Dr. Jorge Zavala Hidalgo, Dr. José Gilberto Cardoso Mohedano, Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza, Dr. Yohan Alexander Correa Metrio y Dra. Elsa Arellano Torres, por el tiempo dedicado a revisar este trabajo y por sus valiosos comentarios y correcciones que enriquecieron el mismo. Para mí fue un privilegio haber sido alumno suyo y haber podido colaborar con algunos de ustedes, el conocimiento y la experiencia que he obtenido de todos ustedes es invaluable.

Este trabajo fue realizado con el apoyo de los siguientes proyectos:

- Impactos del Cambio Climático y Global en zonas costeras de México, 2014-2016, CONACYT PDCPN2013-01/214349.
- Observatorios costeros y registros ambientales de la acidificación de los mares mexicanos, CONACYT SEMARNAT-2016-01-278634
- Red PRODEP "Contaminación acuática: niveles y efectos" (Año 3). 2015-2018.

Agradecimientos Personales

Agradezco en primer lugar a mi mamá, Lety, por todo el amor, apoyo y sabiduría que me has brindado durante toda mi vida, y en particular por la paciencia que me tuviste durante la elaboración de esta tesis. Ni escribiendo otras mil tesis alcanzaría el espacio para agradecerte todo lo que me has dado. ¡Gracias!

Quiero agradecer a mi segundo hogar, la UNAM, y todos quienes forman parte de ella. Es para mí un gran orgullo formar parte de esta gran institución. Estoy consciente de la responsabilidad y deuda que tengo ahora para con ella y el pueblo de México.

A mi tutor, el Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza, le agradezco por todo el apoyo, paciencia, disposición, tiempo y esfuerzo que ha invertido en mi formación. Es para mí un honor poder colaborar con usted y tomar un poco de su conocimiento y experiencia.

Al M. en C. León Felipe Álvarez Sánchez por su apoyo con el manejo de los datos y por su disposición y consejos durante la elaboración de esta tesis.

A todos los compañeros y profesores que tuve el privilegio de conocer durante mi trayecto como alumno de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra, en particular aquellos que formaron parte activa durante la elaboración de esta tesis: Karen, por estar siempre al pendiente de mí durante este tiempo; Olmo, por ese regalo que hizo el contrapeso poético-académico en este camino; y Eduardo, por los consejos recibidos.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. EL SISTEMA CLIMÁTICO	1
1.1.1. <i>El Niño-Oscilación del Sur</i>	1
1.1.2. <i>Cambio climático antropogénico</i>	5
1.2. MONITOREO DE SST	6
1.3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	7
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	7
1.3.2. <i>Objetivos particulares</i>	7
2. ÁREA DE ESTUDIO	8
2.1. OBSERVATORIO COSTERO DE MAZATLÁN	8
2.1.1. <i>Estero de Urías</i>	8
2.2. METEOROLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	9
2.3. CONTEXTO OCEANOGRÁFICO	10
3. METODOLOGÍA	12
3.1. FUENTES DE DATOS	12
3.1.1. <i>Datos satelitales</i>	12
3.1.2. <i>Datos de reanálisis</i>	12
3.1.3. <i>Datos in situ</i>	13
3.1.4. <i>Índices ENSO</i>	14
3.2. ANÁLISIS DE CALIDAD Y VALIDACIÓN DE DATOS	16
3.3. MÉTODOS ESTADÍSTICOS	16
3.3.1. <i>Creación de una serie de referencia</i>	16
3.3.2. <i>Establecimiento de normales operativas</i>	19
3.3.3. <i>Cálculo de desviaciones</i>	19
3.3.4. <i>Cálculo de tendencias</i>	19
4. RESULTADOS	20
4.1. BASE DE DATOS	20
4.1.1. <i>Serie de referencia</i>	23
4.2. NORMALES OPERATIVAS	24
4.3. DESVIACIONES	25
4.4. CORRELACIONES ÍNDICES ENSO – DESVIACIONES	30
4.5. TENDENCIAS	32
4.5.1. <i>Serie in situ Venados</i>	32
4.5.2. <i>Serie de reanálisis ERA-Interim</i>	32
5. DISCUSIÓN	35
5.1. BASE DE DATOS	35
5.2. SERIE DE REFERENCIA Y NORMALES CLIMATOLÓGICAS	36
5.2.1. <i>Distribución de SST en el observatorio</i>	36
5.3. RELACIÓN DEL ÍNDICE ONI Y SST EN MAZATLÁN	36
5.3.1. <i>Análisis de desviaciones durante eventos ENSO</i>	37
5.4. ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS	39
5.5. ALCANCES, LIMITACIONES Y PERSPECTIVAS	39

6.	CONCLUSIONES.....	41
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	42

Índice de Figuras

1.1.	Circulación oceánica y atmosférica en el Pacífico en condiciones normales, El Niño y La Niña.....	2
1.2.	Anomalía de SST en el Pacífico durante El Niño 2009-10	2
1.3.	Anomalía de SST en el Pacífico durante La Niña 2010-11.....	3
2.1.	Mapa de Mazatlán, Sinaloa	9
2.2.	Climograma de Mazatlán, Sinaloa.....	10
2.3.	Corrientes oceánicas superficiales del Pacífico tropical del este	11
2.4.	Distribución de oxígeno disuelto en el Pacífico tropical del este	11
3.1.	Sonda Hobo U24-002.....	13
3.2.	Sonda Hobo U22-001.....	13
3.3.	Sonda Hobo U20-001-01-Ti.....	13
3.4.	Mapa del observatorio costero de Mazatlán.....	14
3.5.	Regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4	15
3.6.	Distribución mensual de SST en de serie satelital, de reanálisis y de campo	17
3.7.	Presencia de datos de SST en el observatorio de Mazatlán (2007-2017).....	18
3.8.	Gráfico superpuesto de serie Venados y Copernicus.....	18
4.1.	Serie SST de la estación Venados.....	21
4.2.	Serie SST de la estación Mareógrafo.....	21
4.3.	Serie SST de la estación Recalada.....	22
4.4.	Serie SST de la estación Boya 24.....	22
4.5.	Serie SST de la estación SENI.....	23
4.6.	Serie SST de referencia del observatorio costero de Mazatlán.....	23
4.7.	Distribución mensual de SST en Mazatlán.....	25
4.8.	Distribución trimestral de SST en Mazatlán.....	25
4.9.	Presencia de datos <i>in situ</i> (2013-2017).....	26
4.10.	Comparación de distribución de series de SST <i>in situ</i>	26
4.11.	Desviaciones trimestrales del percentil 97.5.....	27
4.12.	Desviaciones trimestrales del percentil 2.5.....	28
4.13.	Desviaciones trimestrales de la mediana.....	28
4.14.	Desviaciones mensuales del percentil 97.5.....	29
4.15.	Desviaciones mensuales del percentil 2.5.....	29
4.16.	Desviaciones mensuales de la mediana.....	30
4.17.	Gráfico de dispersión desviaciones mensuales vs índice ONI.....	31
4.18.	Tendencia de SST en serie Venados (1981-2010).....	33
4.19.	Tendencia de SST en serie de reanálisis ERA-Interim (1981-2010).....	33
4.20.	Tendencia de SST del percentil 97.5 de serie de reanálisis ERA-Interim (1981-2010)....	34
5.1.	Desviaciones trimestrales del percentil 2.5 e índice ONI (2007-2016).....	38
5.2.	Desviaciones trimestrales de la mediana e índice ONI (2007-2016).....	39

Índice de Tablas

1.1. Descripción de eventos ENSO ocurridos entre 2007 y 2016.....	3
3.1. Descripción de índices ENSO.....	15
4.1. Descripción de series de SST incorporadas.....	20
4.2. Normales operativas mensuales de SST en Mazatlán.....	24
4.3. Normales operativas trimestrales de SST en Mazatlán.....	24
4.4. Comparación entre series <i>in situ</i> y referencia mediante diferencias punto a punto.....	27
4.5. Coeficientes de correlación (ρ) de Spearman entre índices ENSO y desviaciones mensuales.....	30
4.6. Resultados de correlación (ρ) de Spearman entre índice ONI y desviaciones mensuales de series <i>in situ</i>	32

Resumen

El sistema climático del planeta es el resultado de la interacción entre distintos subsistemas como la atmósfera, hidrósfera, biósfera y la radiación solar, a distintas escalas temporales y espaciales. El Niño – Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un fenómeno acoplado entre el océano y la atmósfera que se presenta en el océano Pacífico ecuatorial, pero que tiene influencia en el clima global a escala interanual. Además de las variaciones naturales, el sistema climático se encuentra en una etapa de calentamiento provocado por la actividad humana, principalmente por el aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera derivado de la quema de combustibles fósiles. Dicho calentamiento, junto con el ENSO, son los fenómenos de mayor influencia en el sistema climático global a escala interanual.

Debido a la capacidad de los océanos de almacenar y transportar energía, los océanos tienen un papel fundamental en el clima, por lo que el estudio de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) es un factor clave para entender el sistema climático global, y en particular el clima de las zonas costeras. En el presente trabajo se muestra un estudio del comportamiento de la SST en Mazatlán, Sinaloa, su relación con el fenómeno ENSO y su tendencia durante las últimas 3 décadas (1981-2010).

Para realizar este trabajo se construyó una base de datos de SST de Mazatlán, con series de datos de campo desde 1973, de reanálisis desde 1979 y satelitales desde 2002, todas ellas hasta 2016. A partir de estos datos se establecieron las normales operativas (valores medios y extremos) mensuales y trimestrales de los últimos 10 años (2007-2016). Mediante una correlación entre el Índice Oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) y las desviaciones de las series respecto a las normales, se encontró que existe una asociación fuerte ($R > 0.50$) entre la SST de Mazatlán y el ENSO, y que dicha relación se manifiesta principalmente mediante la variación en el comportamiento de las temperaturas mínimas.

Mediante una regresión lineal simple se encontró una tendencia positiva de la SST en Mazatlán en los datos de campo (0.55 ± 0.23 °C/década, $p < 0.05$), y en los de reanálisis (0.24 ± 0.01 , $p < 0.01$). A pesar de que ambas tendencias calculadas son distintas, ambas son positivas, lo que sugiere que las aguas costeras de Mazatlán pueden estar experimentando un calentamiento.

1. Introducción

1.1. El Sistema Climático

El sistema climático del planeta es el resultado de la interacción entre un conjunto de subsistemas, compuesto principalmente por la atmósfera, la superficie terrestre, la biósfera, la criósfera y la hidrósfera, esta última constituida principalmente por los océanos. Estos sistemas, en conjunto con la radiación solar, interactúan a distintas escalas temporales y espaciales determinando así el clima de la Tierra (OMM, 2011). Durante el Cuaternario (desde hace ~ 2.58 Ma) el clima de la Tierra se ha caracterizado por una oscilación entre ciclos fríos y cálidos (ciclos glaciares e interglaciares), con periodos principales de aproximadamente 100,000 años, los cuales responden principalmente a ciclos orbitales conocidos como ciclos de Milankovitch (Milankovitch, 1930; Kuhlmann *et al.*, 2015). Estos ciclos orbitales, junto con la circulación oceánica y atmosférica, y el efecto invernadero son los principales elementos que han dominado el comportamiento del clima de la Tierra durante este periodo (Gornitz, 2009).

El clima del planeta está además sujeto a otras variaciones de mayor frecuencia y menor escala espacial, con impactos regionales y locales, como son la variabilidad diaria, estacional, interanual y las teleconexiones climáticas, como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). El ENSO es un fenómeno climático acoplado entre la atmósfera y el océano que ocurre en el océano Pacífico ecuatorial, pero que tiene influencia en el clima de muchas regiones (NOAA, 2018a).

1.1.1. El Niño-Oscilación del Sur

El ENSO es un complejo sistema de variabilidad climática que se caracteriza por anomalías en la presión atmosférica en la región ecuatorial del Océano Pacífico, conocidas como Oscilación del Sur, y por anomalías de temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) del Océano Pacífico Tropical del Este, conocidas como El Niño en su fase cálida y La Niña en la fase fría (Trenberth, 1997; NOAA, 2018a). Su frecuencia irregular y varía entre 2 y 7 años (Hanley *et al.*, 2003).

En condiciones normales los vientos alisios fluyen permanentemente sobre el Pacífico ecuatorial, desplazando el agua cálida de la superficie oceánica hacia el Pacífico occidental, llegando hasta la región de Indonesia, donde existe una zona de convergencia atmosférica cuasi-permanente. En el otro extremo, en el Pacífico oriental, los vientos que fluyen hacia el oeste, perpendiculares a la costa occidental de América del sur, propician las condiciones que favorecen la concurrencia de surgencias, que provocan la persistencia de agua fría, y condiciones de poca humedad atmosférica, que provocan en general condiciones desérticas (Fig. 1.1A) (Sheinbaum, 2003).

La fase cálida del ENSO, El Niño, se caracteriza por el debilitamiento de los vientos alisios del este en el Pacífico ecuatorial, y el desplazamiento del agua cálida del Pacífico occidental hacia el este, provocando el calentamiento anómalo del Pacífico oriental ecuatorial (NOAA, 2018a) (Fig. 1.2), aunque el calentamiento puede llegar hasta la zona intertropical del Pacífico. La zona de convergencia, localizada típicamente en el Pacífico occidental, también se desplaza hacia el centro y oriente del Pacífico, propiciando condiciones de humedad en esas zonas (Fig. 1.1B) (Sheinbaum, 2003).

Por el contrario, la presencia de la fase fría del ENSO, La Niña, se caracteriza por el fortalecimiento de los vientos alisios persistentes en el Pacífico ecuatorial y el enfriamiento

anómalo de las aguas superficiales del Pacífico oriental ecuatorial (Fig. 1.3) (NOAA, 2018b). Esto intensifica las condiciones de surgencia en el océano y de poca humedad en la atmósfera, características de las condiciones normales en dicha región (Fig. 1.1C) (Sheinbaum, 2003).

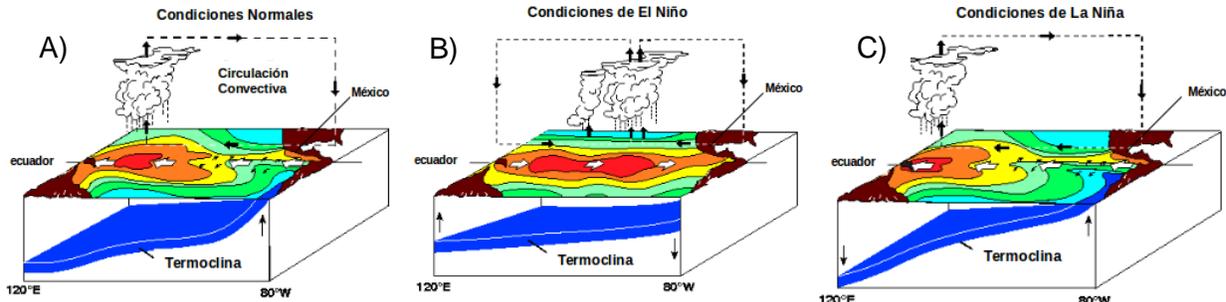


Fig. 1.1. Esquema de circulación atmosférica y oceánica en el océano Pacífico, en A) condiciones normales, B) presencia de El Niño y C) presencia de La Niña. (Tomado de SMN 2018, editado de NOAA 2018c).

El ENSO es el fenómeno de escala interanual con mayor influencia sobre el clima global (Magaña & Gay, 2002; Carré *et al.*, 2003) y se manifiesta principalmente como una alteración de los patrones de precipitación global (Magaña *et al.*, 2003). En México, el ENSO es también el fenómeno que domina la variabilidad climática interanual. De manera general, El Niño intensifica las lluvias durante el invierno y las disminuye durante el verano. También se ha observado una mayor incidencia de frentes fríos durante el invierno en presencia de El Niño. Por el contrario, La Niña aumenta la precipitación en verano y la disminuye en invierno (Magaña & Gay, 2002). Sin embargo, los impactos del ENSO son heterogéneos y pueden variar significativamente entre distintos eventos y de una región a otra (Páez-Osuna *et al.*, 2016). Debido a la importancia del ENSO para el comportamiento del clima global, y regional, es necesario continuar con la investigación que permita conocer mejor los efectos que tiene este fenómeno para esta y otras regiones (Páez-Osuna *et al.*, 2016).

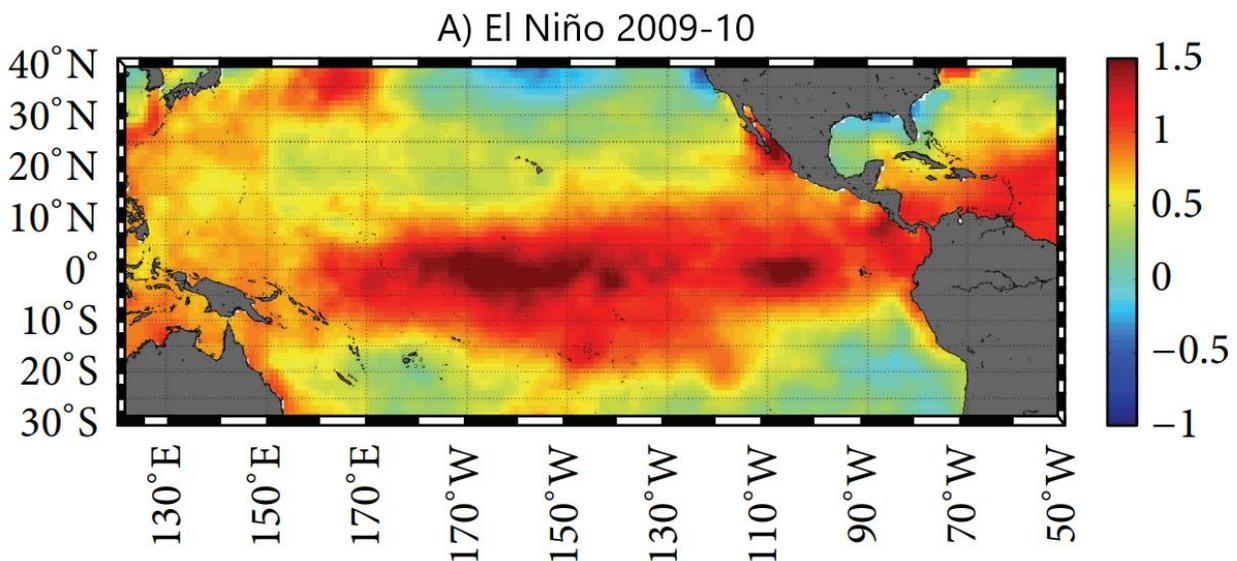


Fig. 1.2. Anomalia de SST (escala vertical en °C) en el océano Pacífico durante El Niño 2009-10. Las anomalías positivas llegan hasta las costas mexicanas del Pacífico oriental (Modificado de Hsu, 2013).

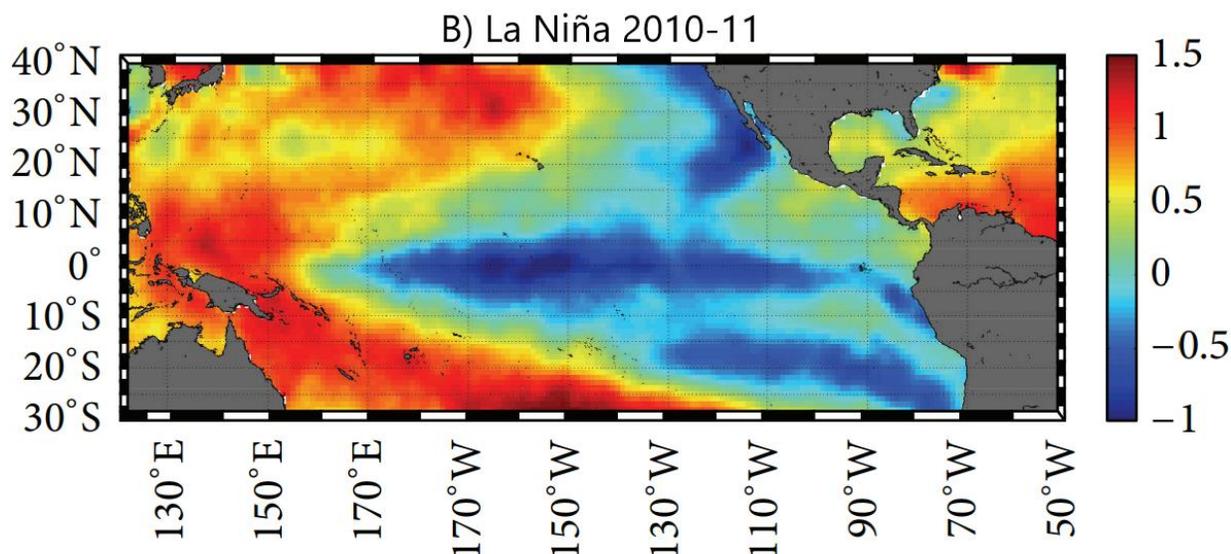


Fig. 1.3. Anomalía de SST (escala vertical en °C) en el océano Pacífico durante La Niña 2010-11. Se observa una zona de anomalías negativas que se desprende de la Península de Baja California, Pacífico oriental (Modificado de Hsu, 2013).

Durante el periodo comprendido entre 2007 y 2016 se presentaron dos eventos El Niño (2009-10 y 2015-16) y dos eventos La Niña (2007-09, 2010-12), descritos en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Descripción de eventos ENSO ocurridos entre 2007 y 2016.

Evento	Descripción	Referencia
La Niña 2007-09	Se divide en dos partes: un evento intenso en 2007 – 2008 con anomalías de SST menores a -2.0 °C en el Pacífico ecuatorial central, seguido de un evento corto y débil entre 2008 – 2009 con anomalías entre 0.5 y 1.0 °C.	(Australia Government Bureau of Meteorology, 2017a)
El Niño 2009-10	Fue un evento corto pero intenso, con anomalías de SST mayores a 1.5 °C en el Pacífico ecuatorial. Marcó una rápida transición a un evento La Niña.	(Kim <i>et al.</i> , 2013; Australia Government Bureau of Meteorology, 2017b)
La Niña 2010-12	Es considerado uno de los eventos La Niña más intensos registrados. Puede dividirse en dos partes: el primer evento muy intenso entre 2010 – 2011 con anomalías de SST menores a -2.0 °C, seguido de un evento de intensidad moderada entre 2011 – 2012 con anomalías menores a -1.0 °C.	(Australia Government Bureau of Meteorology, 2017a)

El Niño 2015-16

Es considerado uno de los eventos El Niño más intensos y duraderos desde que se tiene registro. Comenzó a manifestarse desde finales de 2014, alcanzando su máxima intensidad entre 2015 – 2016 con anomalías de SST mayores a 2.5 °C.

(Kogan & Guo, 2016; Australia Government Bureau of Meteorology, 2017b)

Ondas internas

El fenómeno ENSO está relacionado con la propagación de ondas internas oceánicas conocidas como ondas de Kelvin ecuatoriales y ondas de Rossby ecuatoriales. Las ondas de Kelvin ecuatoriales son un tipo de ondas internas (*ondas atrapadas al ecuador*) que se propagan a través de un océano estratificado con dirección hacia el este. Estas ondas presentan una velocidad característica de entre 2 a 3 metros por segundo, por lo que una onda de Kelvin ecuatorial generada en el Pacífico occidental tardaría unos 2 meses en llegar hasta las costas del Pacífico oriental (Stewart, 2008; Mosquera-Vásquez, 2014). La perturbación inicial de estas ondas puede ser generada por la acción de los vientos en el Pacífico occidental o por el rebote de otras ondas ecuatoriales en la frontera occidental (Mosquera-Vásquez, 2014). Al desplazarse, las ondas de Kelvin ecuatoriales generan una ligera perturbación en la altura del nivel del mar y una mayor variación en la profundidad de la termoclina, generando un hundimiento o afloramiento de la misma, lo que resulta en anomalías positivas o negativas de la SST (Stewart, 2008; Kim & Kim, 2002; Mosquera-Vásquez, 2014).

Cuando las ondas de Kelvin ecuatoriales arriban a la frontera continental en el Pacífico oriental, una parte de estas pueden ser reflectadas de vuelta como ondas de Rossby, las cuales se desplazan en dirección contraria y se caracterizan por provocar anomalías negativas en la SST (Stewart, 2008). La propagación de las ondas de Kelvin ecuatoriales y su reflexión como ondas de Rossby ecuatoriales tienen un papel fundamental en el comienzo, desarrollo, retroalimentación y/o atenuación de cada evento ENSO (Kim & Kim, 2002; Dewitte *et al.*, 2014). Sin embargo, estas ondas internas no explican toda la variabilidad observada en cada evento ENSO, pues es el resultado de la compleja interacción entre el océano y la atmósfera (Kim & Kim 2002).

Al llegar al continente americano, otra parte de las ondas de Kelvin ecuatoriales se refleja como ondas de Kelvin atrapadas a la costa, las cuales viajan hacia el norte y el sur paralelas a la costa de América. Al igual que las ecuatoriales, las ondas de Kelvin atrapadas a la costa también ocasionan variaciones en la profundidad de la termoclina y por consecuencia también genera anomalías en la SST (Stewart, 2008). Estas ondas atrapadas a la costa representan una conexión entre el Pacífico ecuatorial oriental y las costas subtropicales, tanto en el hemisferio norte como en el sur (Stewart, 2008; Pizarro, 2016). En particular para el caso del Pacífico mexicano, las ondas atrapadas a la costa representan uno de los dos mecanismos por los cuales llega la señal del ENSO desde el Pacífico ecuatorial. El otro mecanismo está relacionado con los cambios en los patrones regionales de viento, los cuales también modulan la profundidad de la termoclina y la intensidad de las surgencias costeras (Luch-Cota *et al.*, 2001; Herrera-Cervantes *et al.*, 2007).

1.1.2. Cambio climático antropogénico

Además de la variación climática natural del planeta a lo largo de toda su historia, y en especial los ciclos glaciales e interglaciales del Cuaternario, en la actualidad el clima se encuentra influenciado por cambios inducidos por la actividad humana, a los que en conjunto se denomina cambio global. El cambio global se caracteriza por alteraciones sustanciales en los sistemas planetarios, entre los que destacan la modificación del sistema climático, cambios en los ciclos biogeoquímicos y pérdida de biodiversidad (Vitousek, 1994). El inicio del cambio global suele situarse a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, con el comienzo de la revolución industrial, pero a partir de 1950, con la gran expansión demográfica, el cambio global influye en los sistemas planetarios con tanta intensidad que en algunos de ellos se ha vuelto el agente dominante y los ha alterado hasta niveles críticos (Vitousek, 1994; Magaña & Gay, 2002; Steffen *et al.*, 2007; Foley, 2010).

Se sabe con certeza que el sistema climático del planeta está experimentando un calentamiento, y es sumamente probable (95% de certeza) que éste sea provocado por la actividad humana (Stocker *et al.*, 2013). Las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO₂, han aumentado hasta un 40% respecto a la era preindustrial, causado principalmente por la quema de combustibles fósiles. La concentración actual de CO₂ es mayor a la registrada durante al menos los últimos 800 000 años. Este aumento tiene un claro origen antropogénico y se ha convertido en la principal contribución al aumento del forzamiento radiativo total, y por lo tanto, del cambio climático actual (Stocker *et al.*, 2013).

Entre 1880 y 2012 la superficie del planeta ha sufrido un aumento de 0.85 °C, con una incertidumbre entre 0.65 – 1.06 °C, mientras que la superficie oceánica ha experimentado una velocidad de calentamiento de 0.11 °C por década, con una incertidumbre entre 0.09 – 0.13 °C, entre 1971 y 2010 (Stocker *et al.*, 2013). Esta tasa de calentamiento actual contrasta con los cambios registrados durante los ciclos glaciales e interglaciales, donde la temperatura media global varió entre unos 4 a 7 °C, pero que tomaba unos 5 000 años para alcanzar dicho cambio. De alcanzar un calentamiento global aproximado de 5 °C en este siglo, entonces el sistema climático de la Tierra habría alcanzado un calentamiento similar al experimentado al final del último periodo glacial (Jansen *et al.*, 2007). Se calcula que más del 60% del aumento neto de energía en el sistema climático entre 1971 y 2010 ha sido absorbido por la capa superficial del océano, esto está causando un calentamiento en la SST (Stocker *et al.*, 2013).

Las zonas costeras presentan una dinámica compleja y se encuentran sujetas a intensa presión antropogénica derivada de la urbanización y múltiples actividades económicas, por lo que son una de las regiones más vulnerables a los impactos del cambio global y climático (Wong *et al.*, 2014). El aumento de la SST es uno de los impactos con mayores repercusiones para las zonas costeras, entre los que destacan el aumento en el nivel del mar y cambios en la distribución y abundancia de especies fundamentales para el funcionamiento ecológico de estos sistemas (Pörtner *et al.*, 2014; Wong *et al.*, 2014; Páez-Osuna *et al.*, 2016). Conocer el comportamiento climático actual las regiones costeras, así como su respuesta a las presiones del cambio climático, es fundamental para generar posibles escenarios futuros, y con ello mejorar la capacidad de adaptación y resiliencia de las poblaciones que habitan y dependen de estas zonas (OMM, 2011; Wong *et al.*, 2014).

1.2. Monitoreo de SST

La SST es la medida de la temperatura de la capa más superficial del océano, aunque el espesor de dicha capa puede variar dependiendo del método de medición; los satélites, por ejemplo, registran la temperatura de los primeros milímetros de espesor, mientras que las mediciones *in situ* realizadas con estaciones, boyas de deriva o barcos pueden variar entre 3 y 5 metros de profundidad. En cualquier caso dicha *capa superficial* se encuentra por encima de la termoclina, en la capa de mezcla (Soloviev & Lukas, 2014).

La SST es una de las principales variables climáticas (Barbosa & Andersen, 2009). Monitorear la SST es indispensable para el estudio del clima y el cambio global (MacKenzie & Schiedek, 2007), por lo que es necesario disponer de series de tiempo largas que permitan conocer su comportamiento, y el de otras variables como temperatura atmosférica y nivel del mar, a lo largo del tiempo. Para lograrlo se requiere llevar a cabo esfuerzos de recuperación de registros históricos, y el monitoreo sistemático a mediano y largo plazo (OMM, 2011; Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018).

Para el monitoreo de la SST existen diversas estrategias. El monitoreo en campo (*in situ*) consiste en registrar las temperaturas del agua directamente mediante algún tipo de sensor autónomo. La calidad de la información obtenida depende de la calidad del sensor y su operación. Este método presenta dificultades para obtener series de tiempo largas y completas, especialmente debido a fallos y pérdida de los sensores. Otra desventaja de este método es que las mediciones son puntuales en el espacio y requieren de gran cantidad de recursos económicos y humanos, además es necesario implementar un sistema para el monitoreo en campo de la SST en grandes extensiones.

Las campañas oceanográficas también permiten registrar la temperatura del agua *in situ*. Por medio de una embarcación se puede registrar la temperatura del agua mediante sondas. La principal ventaja de este método es la capacidad de realizar mediciones de temperatura a distintas profundidades y a lo largo de transectos. Las principales desventajas son que estas mediciones son puntuales en el tiempo y un mayor costo de implementación respecto a otros métodos.

Otro método ampliamente utilizado en la actualidad es el monitoreo remoto de la SST mediante sensores instalados en satélites. Entre las principales ventajas de este método está la posibilidad del monitoreo en prácticamente toda la superficie del planeta, logrando así generar estudios en grandes escalas espaciales. Las principales desventajas son que i) la SST corresponde a una capa de agua superficial muy delgada, de apenas el primer milímetro de espesor, ii) la longitud y resolución temporal de estas series son bajas y iii) que la calidad de las mediciones depende de las condiciones atmosféricas, por lo que en ocasiones pueden existir datos faltantes. Un ejemplo de esto es el satélite MODIS-aqua, el cual monitorea distintas variables oceánicas, terrestres y atmosféricas con el propósito de estudiar los procesos del ciclo del agua a través de estos sistemas. Sus series comienzan a partir de 2002, tienen una resolución temporal de ~2 días y resolución espacial de ~ 1 000 m (NASA, 2014).

Ante la necesidad de disponer series de datos climáticos en periodos largos de tiempo se han desarrollado los reanálisis, los cuales son modelos climáticos que pretenden reproducir el comportamiento del sistema atmosférico y/u oceánico. Los reanálisis utilizan procesadores de cómputo para resolver modelos numéricos que simulan dichos sistemas y cuyas condiciones iniciales son alimentadas con datos reales para los lugares y tiempos en que estén disponibles,

mientras que como resultado generan datos climáticos consistentes, con mallas espaciales (latitud, longitud y altitud) y temporales (mensuales, diarios, etc.) constantes. Estos modelos pueden ser globales o regionales, así como estar enfocados únicamente al sistema oceánico o atmosférico (NCAR, 2017). Los modelos de reanálisis son muy útiles para el estudio del clima, en particular del cambio climático, debido a su capacidad de generar series de datos largas (del orden de décadas), además pueden ofrecer datos para regiones con baja o nula disponibilidad (Bengtsson *et al.*, 2004). Sin embargo, estos productos son el resultado de simulaciones y pueden no reproducir satisfactoriamente el comportamiento de ciertas variables en algunas regiones, por lo que deben ser validados para cada variable y región mediante el contraste con datos de campo (Decker *et al.*, 2012).

Con el propósito de generar información climática de largo plazo, accesible y de calidad, que permita estudiar los efectos del cambio global en distintas zonas costeras de México, se está desarrollando el proyecto “Observatorios Costeros del Cambio Global” en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este proyecto implementó observatorios en tres zonas costeras de México en donde el ICMyL tiene presencia: Mazatlán, Sinaloa, en la entrada al Golfo de California; Ciudad del Carmen, Campeche, en el Golfo de México; y Puerto Morelos, Quintana Roo, en el Mar Caribe. En estos observatorios se instalaron estaciones donde se monitorean variables meteorológicas y oceánicas de interés para el estudio del cambio global, como la SST, oxígeno disuelto y salinidad, entre otros. Este proyecto también incorpora información de otras fuentes como las satelitales, registros históricos y reanálisis (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018).

1.3. Motivación y objetivos

Este trabajo responde a la necesidad de estudiar el comportamiento de la SST en el observatorio costero de Mazatlán, como variable clave para el estudio del clima en este sistema. Para ello se construyó una base de datos *in situ*, satelitales y de reanálisis con datos desde 1973, a partir de los cuales se establecieron normales de referencia para los últimos 10 años (2007-2016). Los datos de SST fueron analizados para estudiar su respuesta al ENSO durante el periodo de referencia, y su tendencia durante las últimas 3 décadas, como posible efecto del cambio climático. Se eligieron estos dos fenómenos por ser los de mayor importancia para la variabilidad climática interanual moderna (Magaña & Gay, 2002; Carré *et al.*, 2014; Páez-Osuna, 2016).

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo fue estudiar el comportamiento de la SST de Mazatlán, la posible influencia del ENSO durante el periodo 2007-2016 y su posible tendencia de calentamiento durante las últimas 3 décadas.

1.3.2. Objetivos particulares

- Construir una base de datos de campo, satelitales y reanálisis de SST en Mazatlán.
- Establecer los valores medios y extremos mensuales y trimestrales de SST para el observatorio.
- Estudiar el efecto del ENSO sobre la SST en Mazatlán.
- Determinar la tendencia de SST en Mazatlán durante las últimas 3 décadas.

2. Área de estudio

2.1. Observatorio Costero de Mazatlán

Un observatorio costero es un sistema de monitoreo permanente que utiliza redes de estaciones con sensores de bajo costo para monitorear variables ambientales, atmosféricas y oceánicas. El objetivo principal de estos observatorios es generar series de tiempo de mediano y largo plazo (varias décadas) de variables relevantes para el estudio y adaptación del cambio global, como la temperatura atmosférica, nivel del mar, SST, entre otras. Para complementar la información, los observatorios también incorporan datos de otras fuentes como la percepción remota y los archivos históricos (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018).

El observatorio se encuentra situado a la en la zona costera adyacente a la ciudad de Mazatlán, Sinaloa, en las costas mexicanas del Océano Pacífico, en el este de la entrada del Golfo de California (GC) (23°14'29" N, 106°24'35") (Fig. 2.1). La ciudad cuenta con una población aproximada de 500 mil habitantes y entre sus principales actividades económicas se encuentran el turismo, la pesca y la acuicultura (INEGI, 2015).

2.1.1. Estero de Urías

El observatorio costero incluye a una laguna costera ubicada al sur de la ciudad de Mazatlán (21°10'36" - 23°13'00" N, 106°20'00" - 106°25'35" W), denominada Estero de Urías. Se trata de un sistema costero de 17 km de longitud y 18 km² de área (Ochoa-Izaguirre *et al.*, 2002), que presenta una barrera de plataforma interna, cuyos ejes de orientación corren paralelos a la línea de costa (Lankford, 1977) (Fig. 2.1). La temperatura superficial media reportada es de 25 °C, con medias estacionales que varían de 28.7 °C para el otoño y 23.4 °C para el invierno. La salinidad promedio es de 34.5 ‰ con variaciones desde 28 ‰ hasta 38.8 ‰ (Álvarez-León, 1980).

La circulación en el estero está dominada por la marea astronómica, cuyo régimen es de tipo mixto semidiurno con una amplitud promedio de 1 m (Montaño-Ley *et al.*, 2008), y también por la topografía y la salinidad. La ausencia de aportes de agua dulce y la elevada evapotranspiración producen un alto gradiente en salinidad desde la parte alta del estero hasta la boca, provocando una circulación antiestuarina (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2015a). Con base en la morfología y la hidrodinámica varios autores han identificado tres áreas en el estero (Ochoa-Izaguirre *et al.*, 2002; Montaño-Ley *et al.*, 2008; Cardoso-Mohedano *et al.*, 2015b):

- El *área de entrada*, conectada permanentemente con el Océano Pacífico, tiene la mayor profundidad (13 m) y las mayores velocidades de corriente.
- El *área intermedia*, separada de la entrada por un giro de casi 90° y un considerable estrechamiento, es la zona más grande y presenta los mayores gradientes de temperatura y salinidad. La profundidad varía entre 1 y 3 m.
- El *área de fondo* es la zona más alejada de la boca, presenta las mayores salinidades y las menores corrientes. De ella se desprenden tres canales y se encuentra rodeada de bosque de mangle.

Además de albergar un puerto comercial en la zona de entrada, el estero también recibe descargas residuales de aguas de enfriamiento por parte de una central termoeléctrica en la zona media (Fig. 2.1) (Ochoa-Izaguirre *et al.*, 2002). Debido a las descargas de la central termoeléctrica, la temperatura del agua aumenta en 1.23 ± 0.02 °C respecto al resto de la parte media del estero (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2015b).

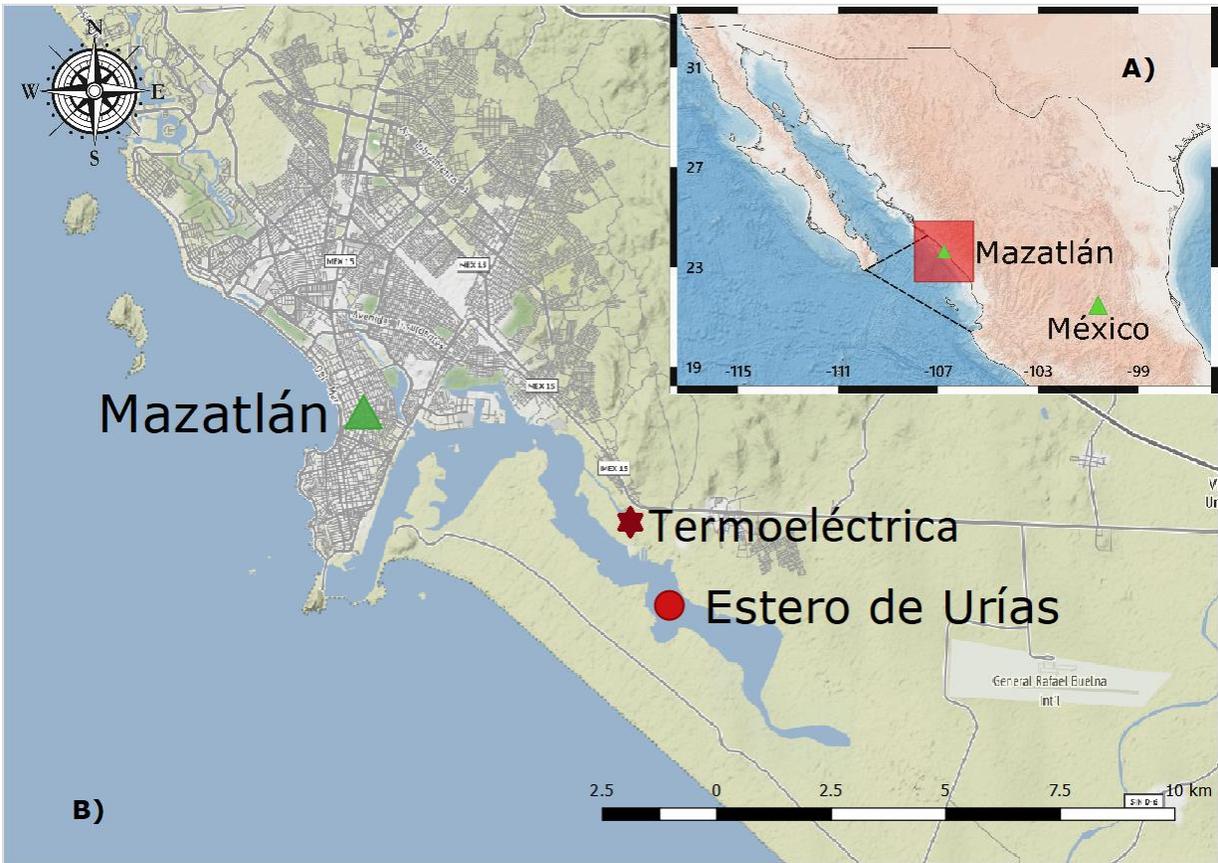


Fig. 2.1. Ubicación de la ciudad de (A) Mazatlán, Sinaloa, en la entrada del Golfo de California (líneas discontinuas) y (B) ubicación del Estero de Urías.

2.2. Meteorología del área de estudio

El clima en la zona es tropical/subtropical de tipo húmedo-cálido, con una temperatura media reportada de 25 °C (Álvarez-León, 1980), aunque con dos estaciones contrastantes (García, 1973), debido a ubicarse en el área de transición climática del Trópico de Cáncer. Los vientos predominantes vienen del noroeste en invierno y del suroeste en verano, estos últimos asociados ocasionalmente a tormentas tropicales (Montaño-Ley et al., 2008). Cuenta con una precipitación promedio anual de 850 mm, que se concentra principalmente entre finales de verano y principios de otoño. A pesar de esto, la humedad permanece relativamente constante durante todo el año, con un promedio de 83 % (Álvarez-León, 1980).

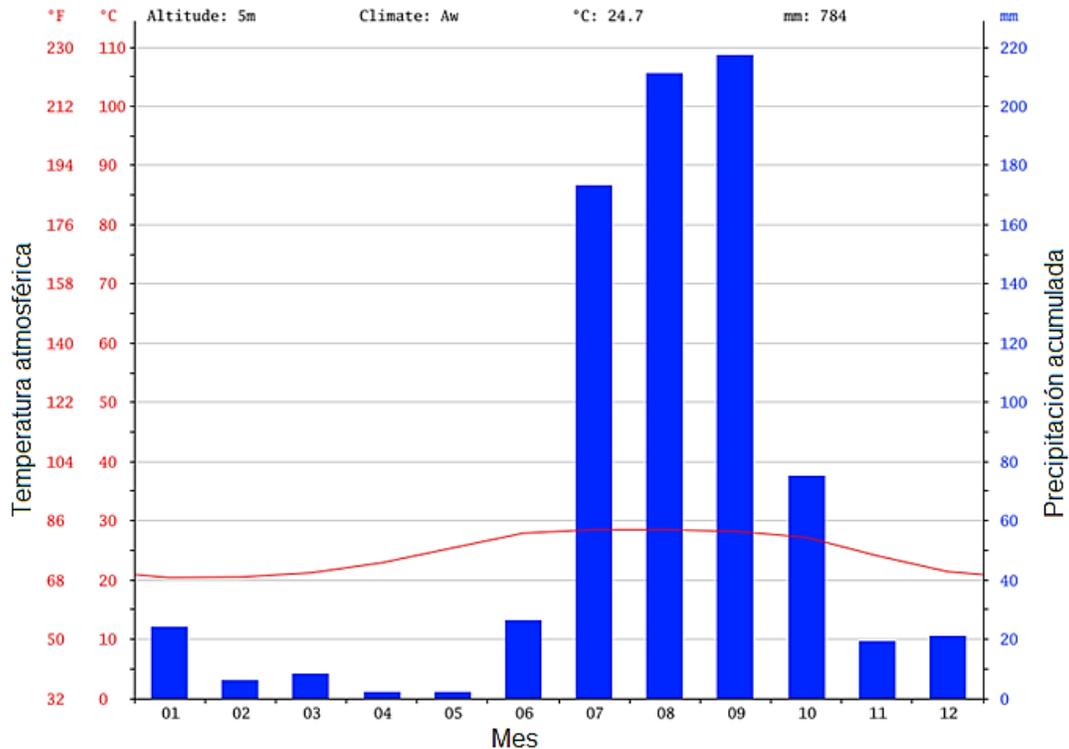


Fig. 2.2. Climograma de Mazatlán, Sinaloa. Línea roja: temperatura atmosférica mensual media, barras azules: precipitación mensual media (Modificado de Climate-Data.org, 2018).

2.3. Contexto oceanográfico

El área de estudio se encuentra a la entrada del Golfo de California, definida por dos líneas: una que va de Cabo San Lucas (Baja California) a Cabo Corrientes (Jalisco) y otra que va de Cabo San Lucas a El Dorado (Sinaloa). A su vez, esta zona forma parte del Pacífico Tropical del Este (ETP, por sus siglas en inglés) (Lavín *et al.*, 2003).

La masa de agua característica del área de estudio es la Masa de Agua Superficial del Pacífico Tropical del Este (ETPSW, por sus siglas en inglés), que a su vez se encuentra bajo la influencia de las corrientes oceánicas del ETP. Estas corrientes presentan un comportamiento estacional muy marcado, en consonancia con los cambios meteorológicos. Los cambios estacionales en la posición de la zona de convergencia intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés) determinan qué tan al sur llega la Corriente de California y qué tan al norte llega la Corriente Costera de Costa Rica (Fig. 2.3) (Lavín *et al.*, 2003). Otra característica importante de esta región es que en ella se presenta una de las zonas de mínimo oxígeno más importantes a nivel global (Fig. 2.4) (Stramma *et al.*, 2010).

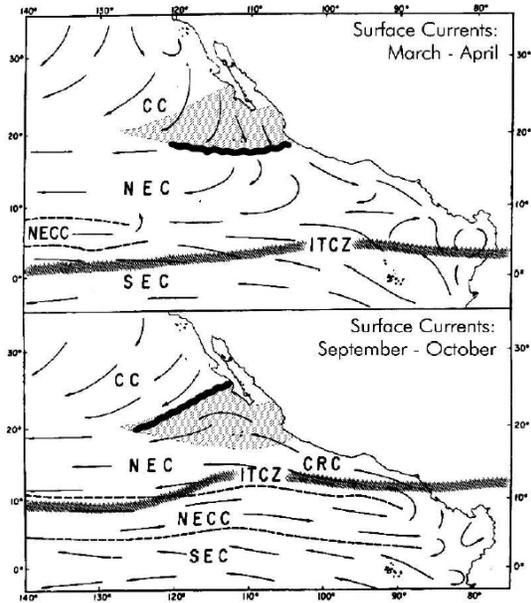


Fig. 2.3. Corrientes superficiales del Pacífico Tropical del Este en (a) Marzo-Abril y (b) Septiembre-October. Las flechas indican las principales corrientes superficiales: SEC = Corriente Sur Ecuatorial, NECC = Contracorriente Nor-equaatorial, NEC = Corriente Nor-equaatorial, CRC= Corriente de Costa Rica, CC = Corriente de California. Se aprecia el desplazamiento al norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) y de la Corriente de California durante septiembre y octubre, así como la influencia de la Corriente de Costa Rica en las mismas fechas. Durante marzo y abril la Corriente de California llega a menores latitudes, bañando con sus aguas frías la zona de entrada al Golfo de California (de Lavín et al., 2003).

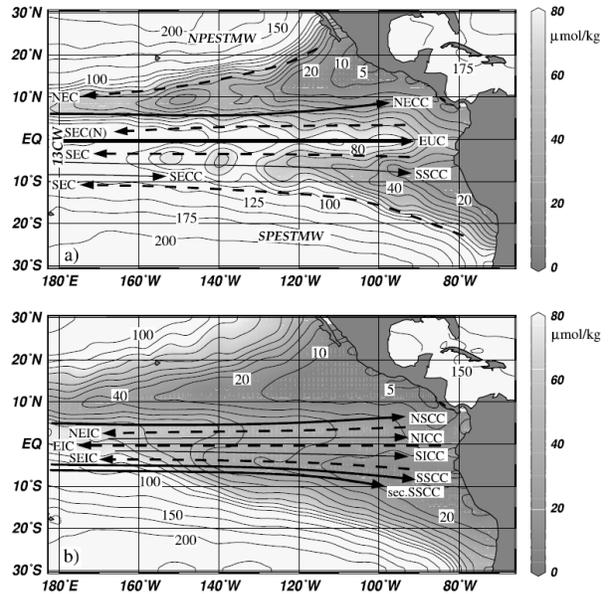


Fig. 2.4. Distribución de oxígeno disuelto en el Pacífico Tropical del Este entre (a) 150-300 m y (b) 350-450 m de profundidad. En ambas imágenes se puede apreciar que el área de estudio se encuentra en zonas con concentraciones menores a $20 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (de Stramma et al., 2010).

3. Metodología

3.1. Fuentes de datos

Para realizar este estudio se conjuntó una base de datos conformada por series de tiempo de SST en el Observatorio costero de Mazatlán, obtenidas de tres fuentes distintas: mediciones *in situ*, datos satelitales y resultados de re-análisis. Cada una de estas fuentes tiene distintas ventajas y desventajas asociadas, así como diferencias en la longitud temporal y frecuencias de medición. Debido a sus diferencias, algunas fuentes resultan mejores que otras para distintos análisis, por lo que todas se tomaron en cuenta para conformar la base de datos, mientras que solo algunas fueron consideradas para cada análisis. La fecha de inicio de cada serie es variable, mientras que la fecha final de todas fue fijada el 31 de diciembre de 2016. A continuación se comentan las características de cada una.

3.1.1. Datos satelitales

Los datos satelitales fueron registrados mediante el sensor remoto MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) instalado en el satélite Aqua (EOS-PM1), que forma parte del Sistema de Observación Terrestre (EOS, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés). Este satélite proporciona datos desde 2002-07-04, con una resolución espacial de 1,000 m y un periodo de muestreo aproximada de dos días (NASA, 2014).

Los datos son procesados, validados, archivados y distribuidos por el Grupo de Procesamiento de Biología Oceánica (OBPG, por sus siglas en inglés) y son puestos a disposición mediante el sitio OceanColor (NASA, 2014). Los datos fueron descargados mediante el software SeaDas por personal de la Unidad de Informática Marina (UNINMAR) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL). Se escogió la serie de datos del pixel satelital más cercano a la boca del Estero de Urías (Fig. 3.4).

3.1.2. Datos de reanálisis

Los reanálisis climáticos son un modo sistemático de producir conjuntos de datos que representan el estado atmosférico/oceánico sobre una malla espacio-temporal regular. Para generarlos se utiliza un conjunto de herramientas que incluye modelos fisicomatemáticos de pronóstico y la asimilación de datos observacionales, los cuales pueden ser irregulares espacial y temporalmente (NCAR, 2017). Se incorporaron dos distintos productos de reanálisis a la base de datos: i) ERA-Interim, que es un reanálisis global con un enfoque atmosférico, aunque también considera variables oceánicas, y ii) Copernicus, también de extensión global, pero con un enfoque netamente oceánico.

ERA-Interim

ERA-Interim es un reanálisis global de observaciones climáticas proporcionado por el Centro Europeo de Pronóstico Meteorológico a Mediano Rango (ECMWF, por sus siglas en inglés). Este reanálisis utiliza una versión mejorada para del Sistema Numérico de Predicción Meteorológica (NWP) para generar los datos. Esta versión mejorada se asegura de no generar tendencias espurias causadas por la evolución del sistema NWP o debido a cambios en los sistemas de observación (ECMWF, 2016).

Este reanálisis proporciona una gran cantidad de variables climáticas desde 1979. Cuenta con una resolución temporal de 3 horas y una resolución espacial aproximada de 1/8 de grado y 37 niveles verticales atmosféricos, que contemplan desde la superficie hasta 0.1 hPa (ECMWF, 2016). Se descargó la variable SST del punto geográfico más cercano a la boca del Estero de Urías (Fig. 3.4).

Copernicus

Se descargó también la variable SST del Análisis de Pronóstico Global Phy 001 024, proporcionado por el Programa Europeo de Observación Terrestre Copernicus (en adelante Copernicus). Este análisis, enfocado en parámetros oceánicos, asimila observaciones de SST, nivel del mar, cobertura de hielo, perfiles de temperatura y salinidad. Presenta una resolución de 1/12 de grado y 50 niveles de profundidad, desde la superficie hasta 5 500 metros. Este modelo proporciona promedios diarios desde 2016-12-27 a la fecha (Copernicus, 2017). Para la descarga se escogió el punto geográfico más cercano a la boca del Estero de Urías (Fig. 3.4).

3.1.3. Datos *in situ*

La colecta de los datos *in situ* se llevó a cabo en estaciones de monitoreo permanente que forman parte del proyecto de Observatorios Costeros del Cambio Global, las cuales están distribuidas en la Bahía de Mazatlán, y en la boca y zona media del Estero de Urías (Fig. 3.4) (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018).

En estas estaciones se instalaron sondas de bajo costo (Hobo®), a una profundidad entre 1 y 5 m y con una frecuencia de registro de 30 minutos. Las características de las sondas utilizadas son:

- La sonda Hobo Conductivity logger U24-002 (Fig. 3.1) mide la temperatura y conductividad eléctrica del agua. Su rango de medición de temperatura va de -2 a 36 °C, con una resolución de 0.01 °C y exactitud de ± 0.01 °C. Este sensor se encuentra instalado en la estación Boya Recalada (Fig. 3.4).
- La sonda Hobo Water Temp Pro v2 U22-001 (Fig. 3.2) mide temperatura del agua en un intervalo de -40 a 80 °C, con una resolución de 0.02 °C y exactitud de ± 0.2 °C. Este sensor se encuentra instalado en la Boya SENI y Boya 24 (Fig. 3.4).
- La sonda Hobo Titanium Water Level U20-001-01-Ti (Fig. 3.3) mide temperatura y presión barométrica. Su rango de medición de temperatura va de -20 a 50 °C, con una resolución de 0.1 °C y exactitud de 0.37 °C. Este sensor se encuentra instalado en el Mareógrafo (Fig. 3.4).



Fig. 3.1. Sonda Hobo U24-002



Fig. 3.2. Sonda Hobo U22-001



Fig. 3.3. Sonda Hobo U20-001-01-Ti

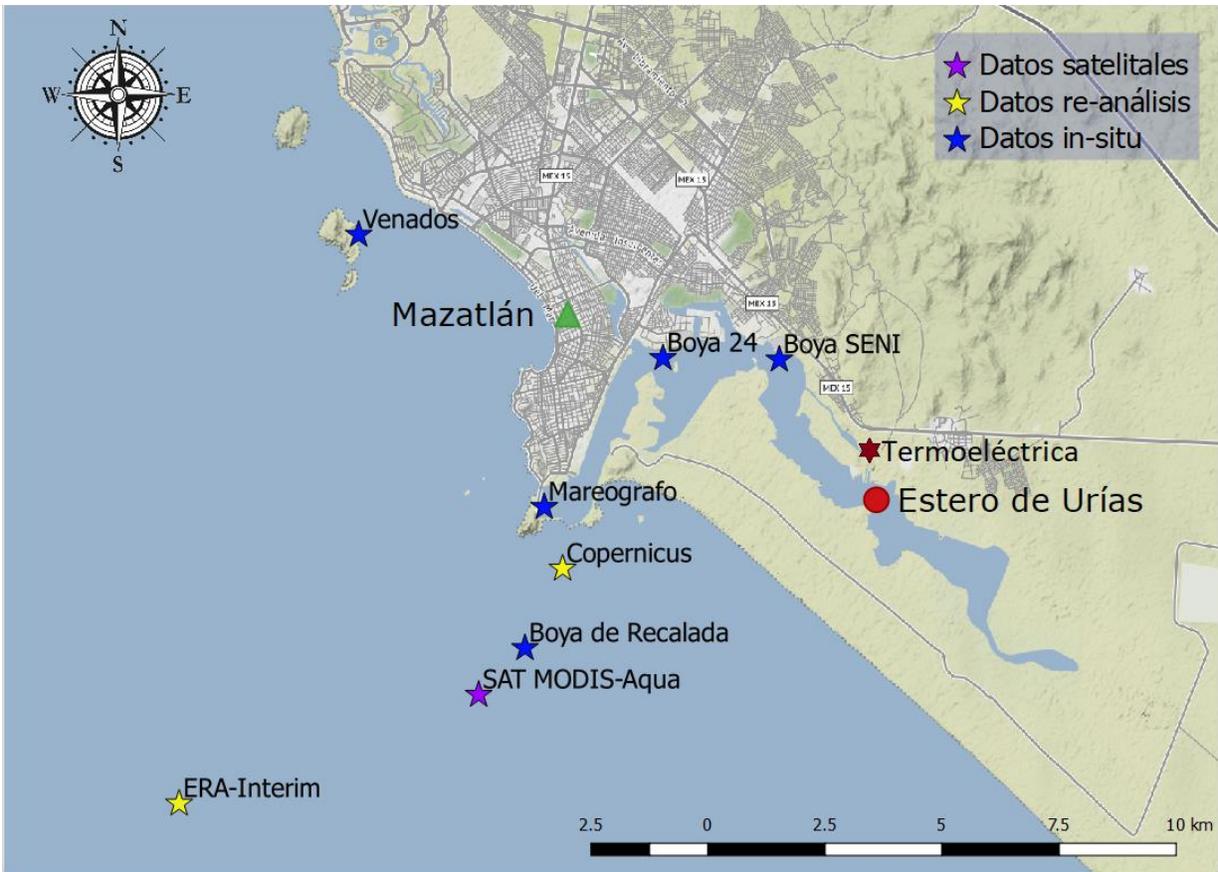


Fig. 3.4. Mapa del Observatorio costero de Mazatlán. Se muestra la distribución de las estaciones para observaciones in situ y centro del pixel elegido para series de reanálisis y satelitales.

3.1.4. Índices ENSO

Para el estudio del ENSO se han delimitado un conjunto de áreas a lo largo del Pacífico ecuatorial, en las cuales se monitorean variables como la temperatura del agua, temperatura atmosférica y presión. A partir de estas variables se calculan índices que se relacionan con el desarrollo de eventos tipo La Niña o El Niño. Estas regiones son: Niño 1+2 (0-10S, 90W-80W), Niño 3 (5N-5S, 150W-90W), Niño 3.4 (5N-5S, 170W-120W) y Niño 4 (5N-5S, 160E-150W) (Fig. 3.5) (Trenberth *et al.*, 2016). Para este estudio se descargaron los índices ENSO que consideran la SST, descritos en la Tabla 3.1, todos ellos con frecuencia mensual (NOAA 2017a; 2017b; 2017c).

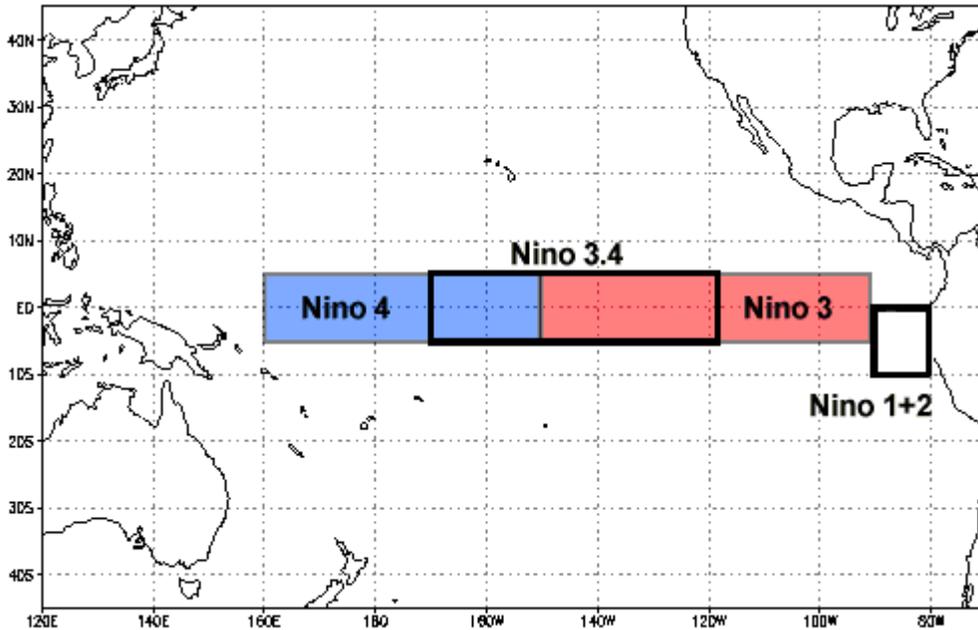


Fig. 3.5. Regiones Niño 1+2, 3, 3.4 y 4, en la zona ecuatorial del Océano Pacífico (NOAA, 2017d).

Tabla 3.1. Descripción de los índices ENSO utilizados en este trabajo.

Índice	Descripción	Fecha inicio	Fase El Niño	Fase La Niña
<i>Oceanic Niño Index (ONI)</i>	Media móvil de 3 meses de la anomalía en la temperatura superficial del agua (SST) en la región Niño3.4 respecto a periodo base de 30 años. Es el índice operativo de la NOAA (NOAA, 2017b)	1950	(Valores positivos) Anomalía > 0.5 °C durante 5 meses consecutivos	(Valores negativos) Anomalía < 0.5 °C durante 5 meses consecutivos
<i>Multivariate ENSO Index (MEI)</i>	Relación multivariada de presión atmosférica, dirección del viento, temperatura superficial del mar, temperatura superficial de la atmósfera y fracción de nubosidad del cielo. Cálculo mediante media móvil de dos meses (NOAA, 2017c)	1950	Valores positivos	Valores negativos
Niño 3	Anomalía de SST en la región 3 (Pacífico oriental) (NOAA, 2017d)	1982	Valores positivos	Valores negativos

Niño 3.4	Anomalía de SST en el Pacífico central (misma región que el ONI), calculada con media móvil de 5 meses (NOAA, 2017d)	1982	(Valores positivos) Anomalía > 0.4 °C durante 5 meses consecutivos	(Valores negativos) Anomalía < 0.4 °C durante 5 meses consecutivos
Niño 4	Anomalía de SST en la región más al oeste del Pacífico central (NOAA, 2017d)	1982	Valores positivos	Valores positivos

3.2. Análisis de calidad y validación de datos

Las observaciones pueden contener datos erróneos provocados por fallos en los instrumentos de medición, durante la captura de la información o su procesamiento, por lo que se realizó un análisis de calidad para validar las series y discriminar posibles datos erróneos.

El proceso de validación consistió en aplicar tres filtros a las series temporales. En el primer filtro se discriminaron todas las observaciones con valores fuera de los rangos de medición de los instrumentos. En el segundo filtro se consideraron dudosos los datos que se encuentran fuera del intervalo 3σ calculado para cada mes. En el tercer filtro se identificaron saltos en los registros mediante el cálculo del intervalo 3σ del promedio de diferencias de cada dato respecto al anterior y se consideraron dudosos aquellos fuera de dicho intervalo. Finalmente se inspeccionaron visualmente los datos dudosos para discriminarlos definitivamente o considerarlos válidos. En total se descartaron 33 datos, cifra despreciable respecto al total de datos.

3.3. Métodos estadísticos

Previo a todos los análisis estadísticos se comprobó por medio el test de Shapiro-Wilk que todas las series de SST son no-normales, por lo que se utilizaron métodos no paramétricos para todos los análisis. De hecho, las series de tiempo muestran un comportamiento bi-modal, lo que refleja un comportamiento dominante de dos estaciones: invierno y verano. Todos los procedimientos descritos se implementaron mediante el software R (R Core Team, 2017).

3.3.1. Creación de una serie de referencia

Un problema común para el establecimiento de normales climatológicas es la dificultad de obtener series completas y continuas a lo largo de un periodo de al menos 30 años. Ante esta situación, Trewin (2007) sugiere que se pueden utilizar periodos más cortos (de al menos 10 años) y tener resultados igual de aceptables que los promedios de 30 años. También propone definir una nueva forma de normales climatológicas, llamadas normales operacionales, que pueden ser calculadas para cualquier serie con al menos 10 años de datos, incluso si los años no son consecutivos.

Se compararon las series de reanálisis ERA-Interim y Copernicus, del satélite MODIS-Aqua y de la serie *in situ* Venados, por ser las de mayor longitud temporal (> 10 años), para definir una serie de referencia a partir de la cual establecer las normales operacionales de 10 años (2007 – 2016) de SST en Mazatlán. Para comparar el comportamiento de estas series y elegir la que mejor

reproduce la SST de Mazatlán se comparó la distribución mensual de las mismas (Fig. 3.6). En principio, esta comparación muestra que el reanálisis ERA-Interim no reproduce satisfactoriamente el comportamiento de la SST durante el verano, por lo que se descartó para establecer la serie de referencia. También se observa que las series *in situ* Venados, la satelital y la del reanálisis Copernicus presentan un comportamiento similar, aunque la satelital presenta una mayor variabilidad que Venados y Copernicus, sobre todo en los meses cálidos. Finalmente se eligió la serie Venados para establecer la serie de referencia debido a que i) se considera la más representativa por ser *in situ*, ii) debido a su frecuencia (3 y 6 horas) durante el periodo de referencia (entre 2007 y 2016), la serie Venados presenta mayor abundancia de datos respecto al reanálisis Copernicus (con frecuencia de 1 día) y del Satélite (con frecuencia de 2 días).

La serie de Venados presentó algunos intervalos de datos faltantes (huecos) ente 2007-06-27 y 2007-09-19, entre 2011-06-23 y 2011-09-05, entre 2014-08-06 y 2014-09-29, entre 2015-04-15 y 2015-06-23 (Fig. 3.7). Ante esta situación Trewin (2007) sugiere que es posible completar las series con otras cercanas cuando alguna presente datos faltantes y no complete 10 años de observaciones (Trewin, 2007)

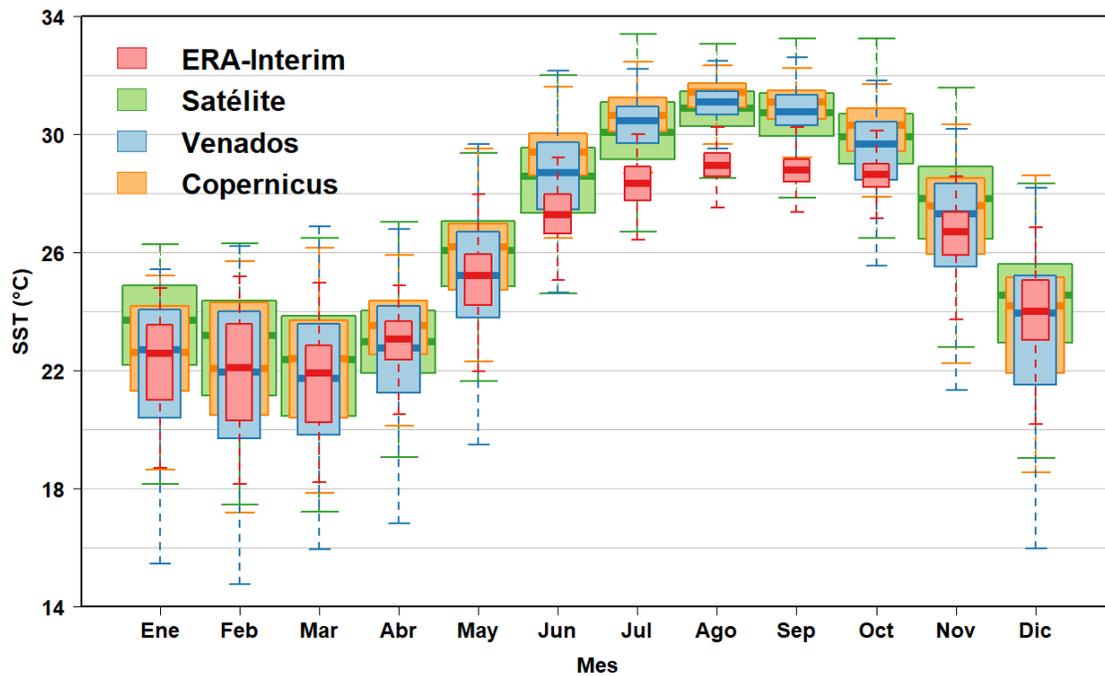


Fig. 3.6. Diagramas de caja de la distribución mensual de las series Era-Interim, Satélite, Copernicus y Venados, para el periodo entre 2007 y 2016. Se aprecia el sesgo negativo que sufre la serie ERA-Interim entre los meses de junio a octubre.

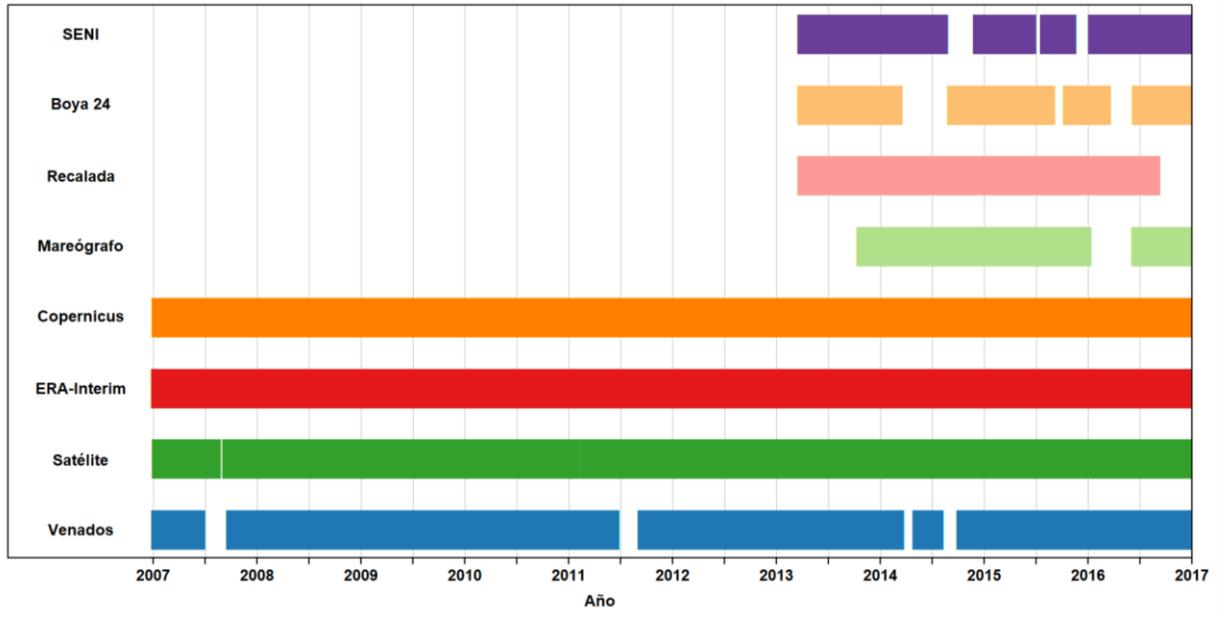


Fig. 3.7. Gráfico de presencia de datos de SST en el observatorio de Mazatlán, de 2007 a 2017.

Los datos faltantes de la serie Venados fueron completados a partir de la serie reanálisis Copernicus, la cual se eligió por ser la que mayor coeficiente de correlación de Spearman mostró con la serie de Venados ($\rho = 0.97$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$). Se compararon ambas series mediante el test de Kruskal-Wallis, obteniendo como resultado $H = 3255.5$, grados de libertad = 2954 y $p < 0.001$, con lo que se confirmó la equivalencia estadística de ambas series (Fig. 3.8). Finalmente se realizó una interpolación lineal para obtener una serie completa durante la última década (de 2007-01-01 a 2016-12-31), con frecuencia de 3 horas, titulada *serie de referencia*.

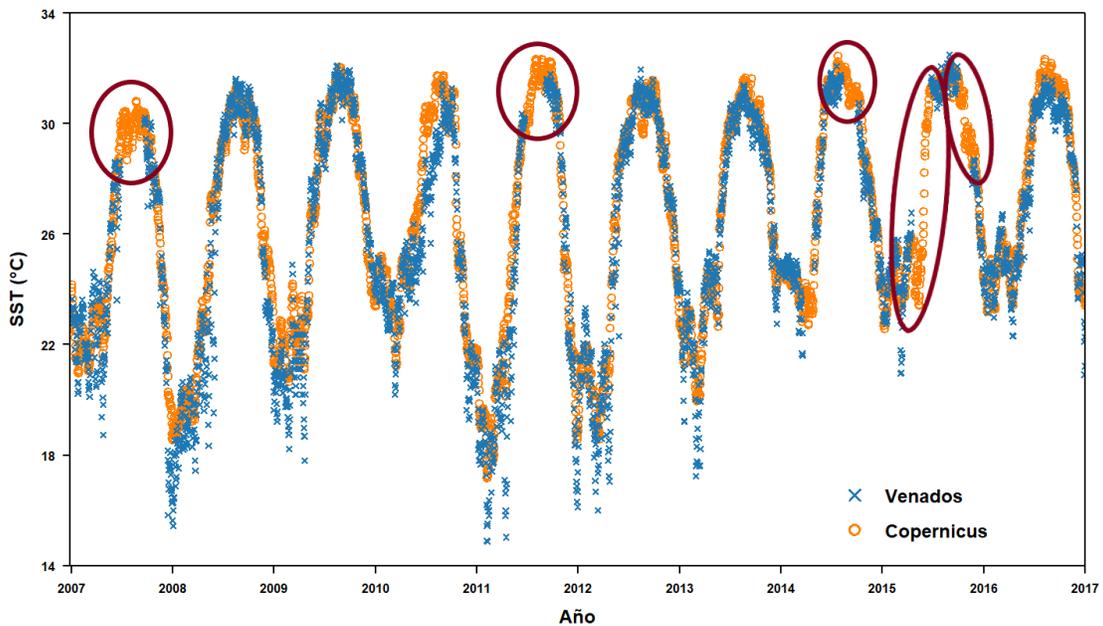


Fig. 3.8. Gráfico superpuesto de serie de Venados y Copernicus. Las elipses marcan los faltantes de la serie Venados que fueron completados con la serie Copernicus.

3.3.2. Establecimiento de normales operativas

La media aritmética de una variable climática es solo una descripción parcial de su comportamiento, por lo que se recomienda el uso de más parámetros que describan mejor la distribución de probabilidad de la variable, tales como los cuantiles o percentiles (Trewin, 2007). Sin embargo, no existe un consenso para el cálculo de los cuantiles, ni de su uso para la caracterización climatológica de alguna variable: En algunos estudios se utilizan los percentiles 10, 22, 50, 66 y 90, considerando a los percentiles 10 y 90 como los valores extremos (Vincent *et al.* 2005; WMO 2009; Castaño *et al.*, 2011), mientras que en otros se utiliza el percentil 99 para el estudio de los eventos extremos (Marbà *et al.*, 2015).

En este trabajo se utilizó el percentil 50, que corresponde a la mediana, como indicador del comportamiento medio de la SST. Como indicadores del comportamiento medio de las temperaturas mínimas y máximas se eligieron los percentiles 2.5 y 97.5 respectivamente, de modo que, estos límites contienen al intervalo de confianza del 95 % de los datos y reflejan el comportamiento de las temperaturas extremas, tanto mínimas como máximas en los distintos periodos de tiempo calculados. Se utilizó la serie de referencia para establecer las normales operativas de SST en Mazatlán durante la última década (2007-2016). Estas normales se calcularon de modo mensual, trimestral (enero-marzo, abril-junio, julio-septiembre y octubre-diciembre) y para la década completa.

3.3.3. Cálculo de desviaciones

Se compararon las series de SST *in situ* respecto a la serie de referencia mediante sus desviaciones mensuales y trimestrales. Para comprobar la homogeneidad de las series *in situ* respecto a la de referencia se calcularon las diferencias punto a punto entre estas, posteriormente se realizó una corrección de cada serie *in situ* mediante la resta de la mediana de dichas diferencias, cuando la mediana fuera diferente de cero.

Para estimar las desviaciones se calcularon las medianas, los percentiles 2.5 y 97.5, mensuales y trimestrales de cada serie *in situ* previamente corregida y posteriormente se calculó la diferencia respecto a las normales operativas correspondientes, establecidas con la serie de referencia.

3.3.4. Cálculo de tendencias

El cálculo de las tendencias de SST en Mazatlán se realizó mediante un modelo de regresión lineal simple aplicado a los datos originales y parámetros mensuales de las dos series de mayor longitud temporal (Venados y ERA-Interim), en el periodo entre 1981 y 2010. Se eligió dicho periodo para disponer de datos en ambas series durante tres décadas completas y poder comparar sus resultados entre sí. Stocker *et al.* (2013) advierte que las tendencias calculadas en periodos cortos son muy sensibles a las condiciones del principio y final de la serie. En este caso el periodo elegido deja fuera los últimos seis años de observaciones (2011-2016), cuyo aumento de temperaturas relacionado con El Niño 2015-16 podría influir en los resultados. El periodo elegido también coincide en su límite superior con el del periodo utilizado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su 5to reporte (Stocker *et al.*, 2013).

Se calculó la tendencia de SST de la serie Venados a partir de datos mensuales: datos originales entre 1981 y 2005, y mediana mensual entre 2005 y 2010. Para la serie ERA-Interim, la tendencia se calculó a partir de los datos originales, con frecuencia de 3 horas, a partir de los parámetros mensuales (mediana y percentiles, 2.5 y 97.5, respectivamente), en el periodo de 1981 a 2010.

4. Resultados

4.1. Base de datos

Se conjuntó una base de datos validados de temperatura superficial del mar (SST) en Mazatlán, compuesta por 5 series de observaciones *in situ* (Venados, Recalada, Mareógrafo, Boya 24 y SENI), 2 de reanálisis (ERA-Interim y Copernicus) y 1 satelital, que en conjunto contienen aproximadamente 361 mil datos (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Descripción de las series de SST incorporadas a la base de datos.

Serie	Tipo	Fecha inicio	Fecha final	Frecuencia
Venados* (Fig. 4.1)	<i>In situ</i>	1973-01-01	2016-12-31	1973-01-01 – 2005-03-01: 1 mes
				2005-03-01 – 2011-09-06: 6 horas
				2011-09-06 – 2016-12-31: 3 horas
Mareógrafo (Fig. 4.2)	<i>In situ</i>	2013-10-15	2016-12-31	30 minutos
Boya de Recalada (Fig. 4.3)	<i>In situ</i>	2013-03-21	2016-09-05	30 minutos
Boya 24 (Fig. 4.4)	<i>In situ</i>	2013-03-21	2016-12-31	30 minutos
Boya SENI (Fig. 4.5)	<i>In situ</i>	2013-03-21	2016-12-31	30 minutos
SAT MODIS-Aqua	Satelital	2002-07-10	2016-12-27	2 días aprox.
ERA-Interim	Reanálisis	1979-01-01	2016-12-31	3 horas
Copernicus	Reanálisis	2006-12-27	2016-12-31	1 día

* La serie Venados se compone de tres partes: de enero de 1973 a marzo de 2005 con un dato por mes, de marzo de 2005 a agosto de 2011 con un dato cada 6 horas y de agosto de 2011 a diciembre de 2016 un dato cada 3 horas.

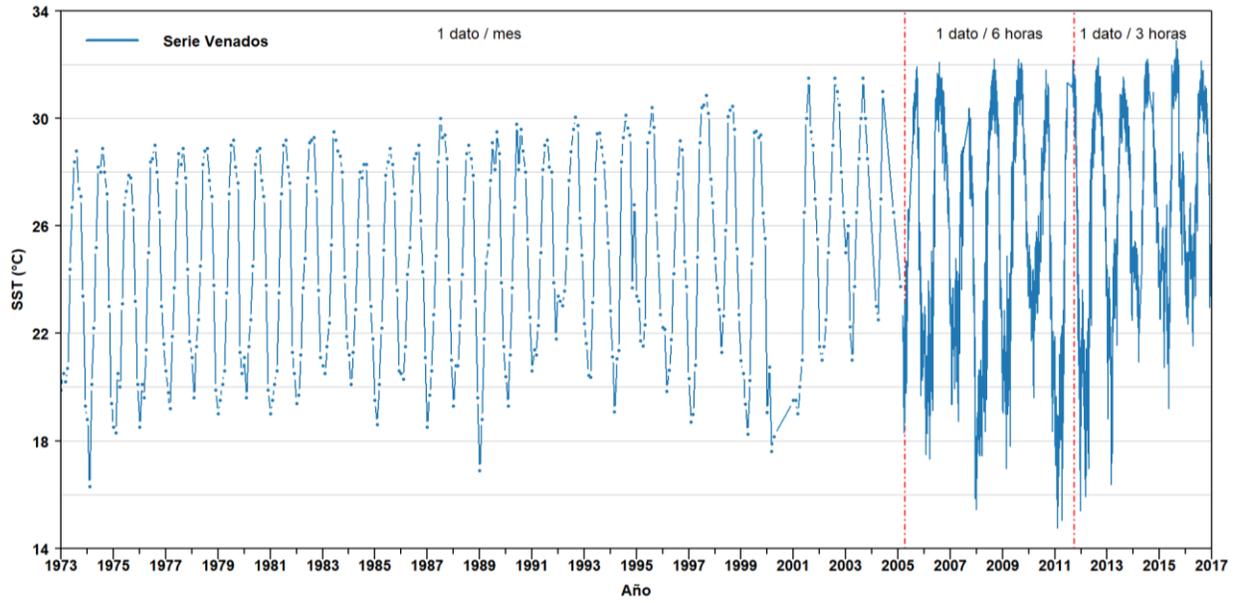


Fig. 4.1. Serie SST de la estación Venados, Observatorio costero de Mazatlán, Sin.

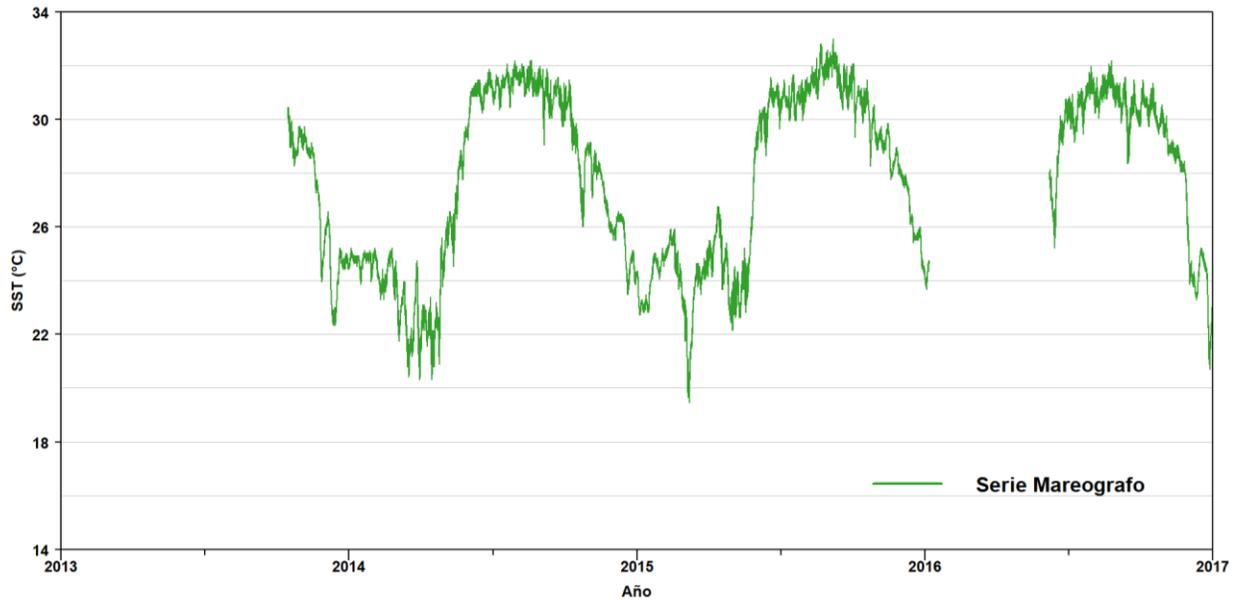


Fig. 4.2. Serie SST de la estación Mareógrafo, Observatorio costero de Mazatlán, Sin.

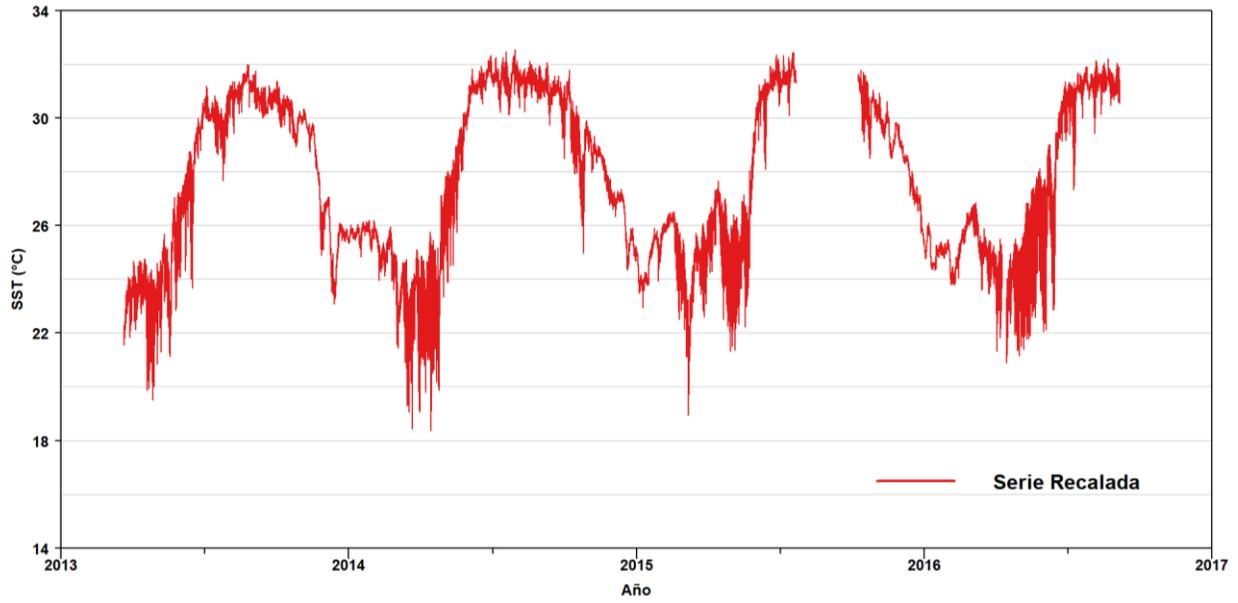


Fig. 4.3. Serie SST de la estación Recalada, Observatorio costero de Mazatlán, Sin.

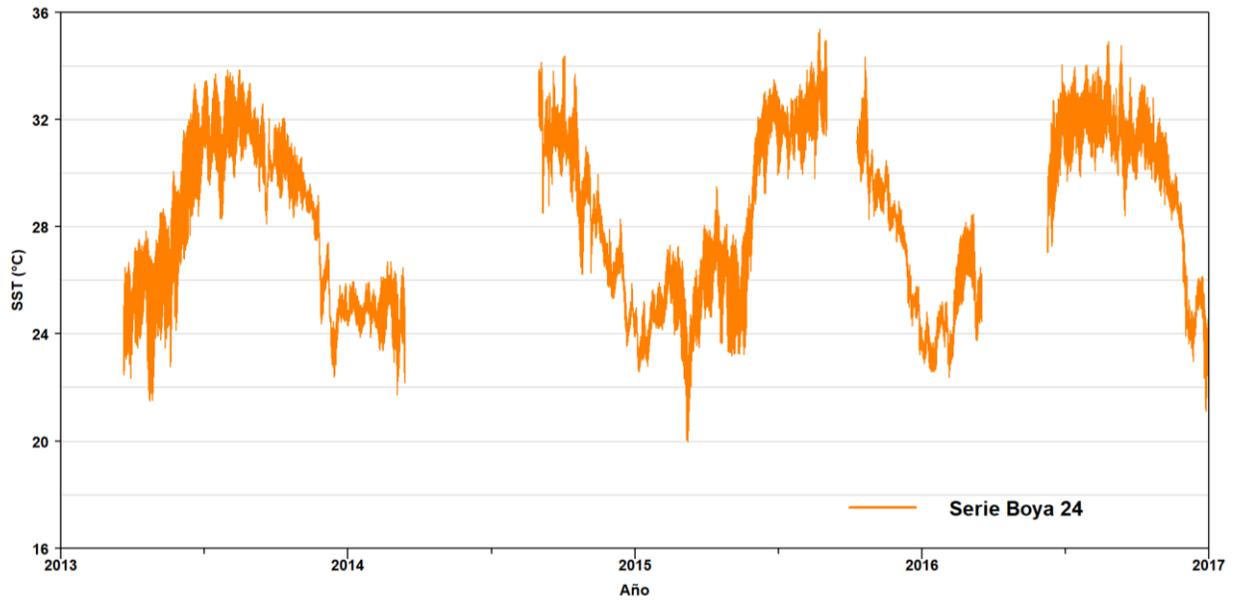


Fig. 4.4. Serie SST de la estación Boya 24, Observatorio costero de Mazatlán, Sin.

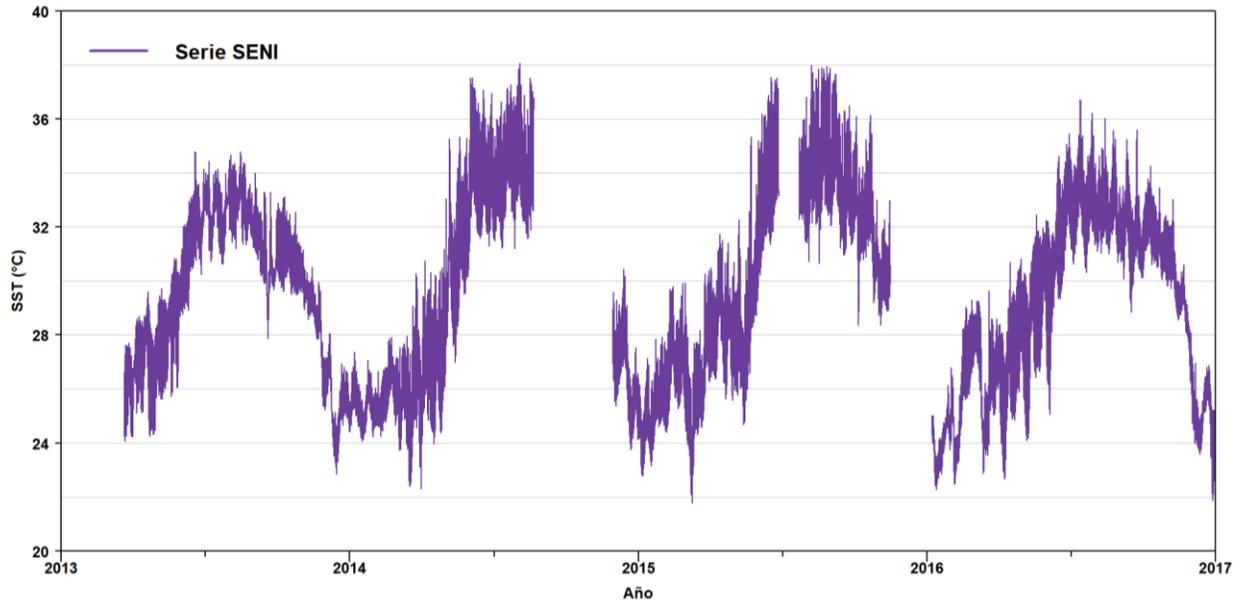


Fig. 4.5. Serie SST de la estación SENI, Observatorio costero de Mazatlán, Sin.

4.1.1. Serie de referencia

Tomando como base la serie Venados y completando sus datos faltantes con la serie Copernicus, se construyó una serie de referencia (Fig. 4.6) de 10 años de longitud, de 2007-01-01 a 2016-12-01, con datos cada 3 horas, a partir de la cual se establecieron las normales operativas.

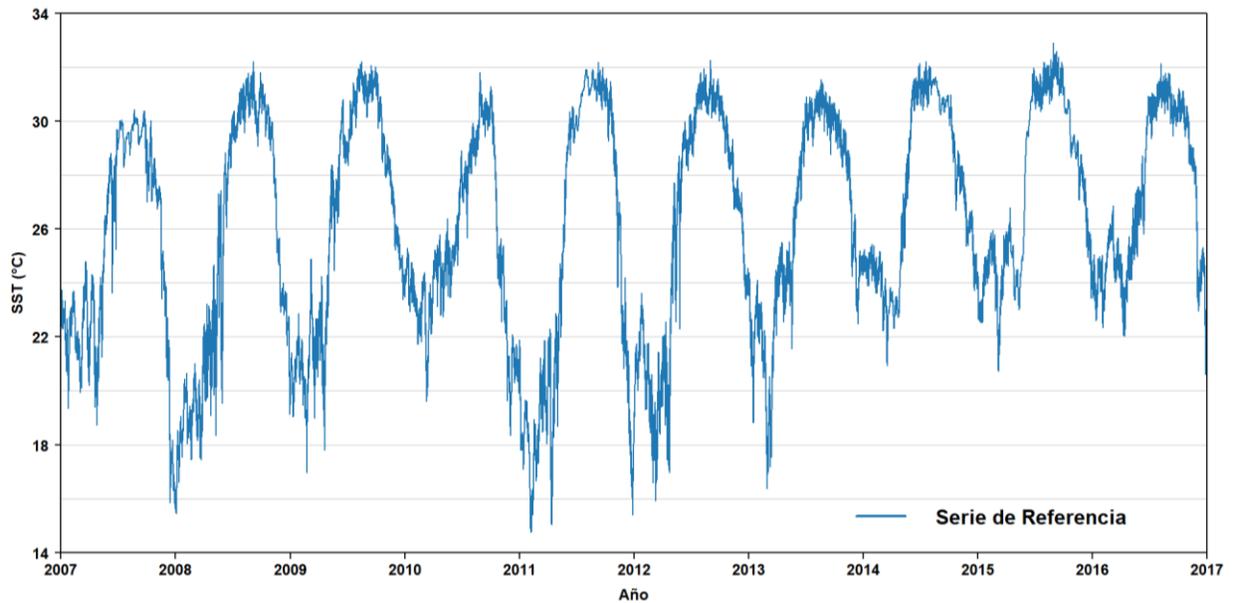


Fig. 4.6. Serie SST de referencia para el observatorio costero de Mazatlán, Sin.

4.2. Normales operativas

A partir de la serie de referencia, se estableció la climatología de SST en Mazatlán para la última década, compuesta por las siguientes normales operativas de distribución: mediana, mínima (percentil 2.5) y máxima (percentil 97.5). Estas normales operativas se establecieron de forma mensual (Fig. 4.7) (Tabla 4.2) y trimestral (Fig. 4.8) (Tabla 4.3). Se calcularon también las normales operativas para la serie completa (década de 2007 a 2016), obteniendo una mínima (percentil 2.5) de 17.99 °C, una mediana de 26.40 °C y una máxima (percentil 97.5) de 31.61 °C.

Tabla 4.2. Normales operativas mensuales de SST en Mazatlán, calculadas con la serie de referencia entre 2007 y 2016.

Mes	Mínima	Percentil 2.5	Mediana	Percentil 97.5	Máxima
Enero	15.44	17.39	22.68	24.97	25.43
Febrero	14.74	15.90	21.94	25.67	26.21
Marzo	15.91	17.56	21.82	25.67	26.87
Abril	15.03	17.72	23.06	25.70	26.79
Mayo	18.34	21.08	25.32	28.52	29.66
Junio	23.62	25.11	29.02	31.57	32.15
Julio	25.67	27.50	30.39	31.68	32.23
Agosto	28.05	28.89	31.13	31.97	32.91
Septiembre	28.07	29.29	30.70	31.98	32.60
Octubre	23.91	25.06	29.89	31.28	31.82
Noviembre	19.63	21.27	27.50	29.53	30.19
Diciembre	15.39	16.55	23.93	27.26	28.17

Tabla 4.3. Normales operativas trimestrales de SST en Mazatlán, calculadas con la serie de referencia entre 2007 y 2016.

Trimestre	Mínima	Percentil 2.5	Mediana	Percentil 97.5	Máxima
Ene-mar	14.74	17.13	22.20	25.48	26.87
Abr-jun	15.03	19.51	25.36	31.10	32.15
Jul-sep	25.67	28.37	30.75	31.92	32.91
Oct-dic	15.39	17.65	27.38	31.00	31.82

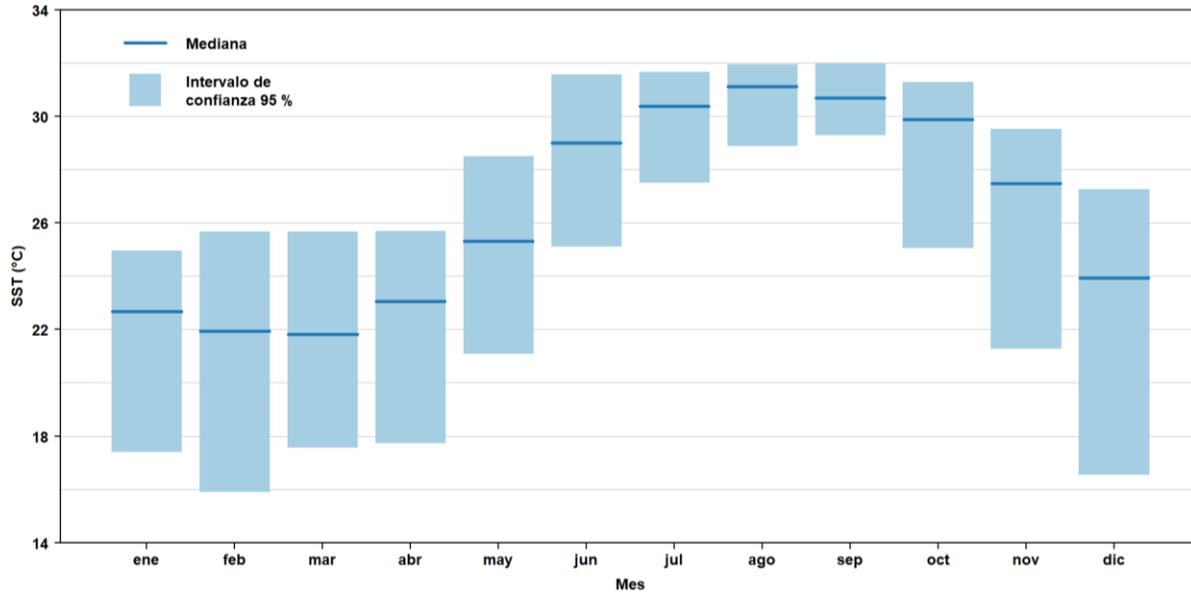


Fig. 4.7. Distribución mensual de SST en Mazatlán entre 2007 y 2016. Los bordes inferiores y superiores de los rectángulos están definidos por los percentiles 2.5 y 97.5 respectivamente.

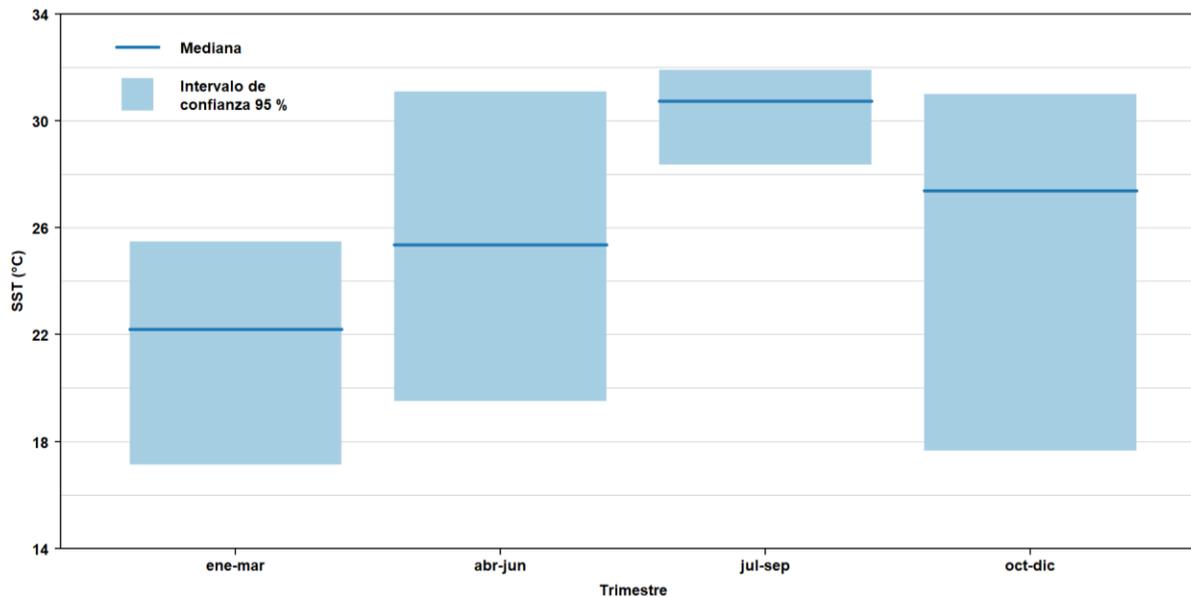


Fig. 4.8. Distribución trimestral de SST en Mazatlán entre 2007 y 2016. Los bordes inferiores y superiores de los rectángulos están definidos por el percentil 2.5 y 97.5 respectivamente.

4.3. Desviaciones

Para conocer la distribución de SST en el observatorio costero de Mazatlán se comparó la distribución de las series *in situ* y la serie de referencia. Para esto se consideraron únicamente los periodos en que hubo disponibilidad de datos en todas las series (Fig. 4.9). Se observó un aumento en la SST (mediana y percentiles) en las estaciones más internas del Estero de Urías

(Boya SENI y Boya 24) respecto a las más externas (Mareógrafo y Recalada) (Fig. 4.10). Posteriormente se analizó la homogeneidad entre cada serie *in situ* y la serie de referencia mediante las diferencias entre cada registro (*punto a punto*). Para corregir las series *in situ* se les restó la mediana de dichas diferencias cuando la mediana fue distinta de cero. El resultado de esta comparación se muestra en la Tabla 4.4.

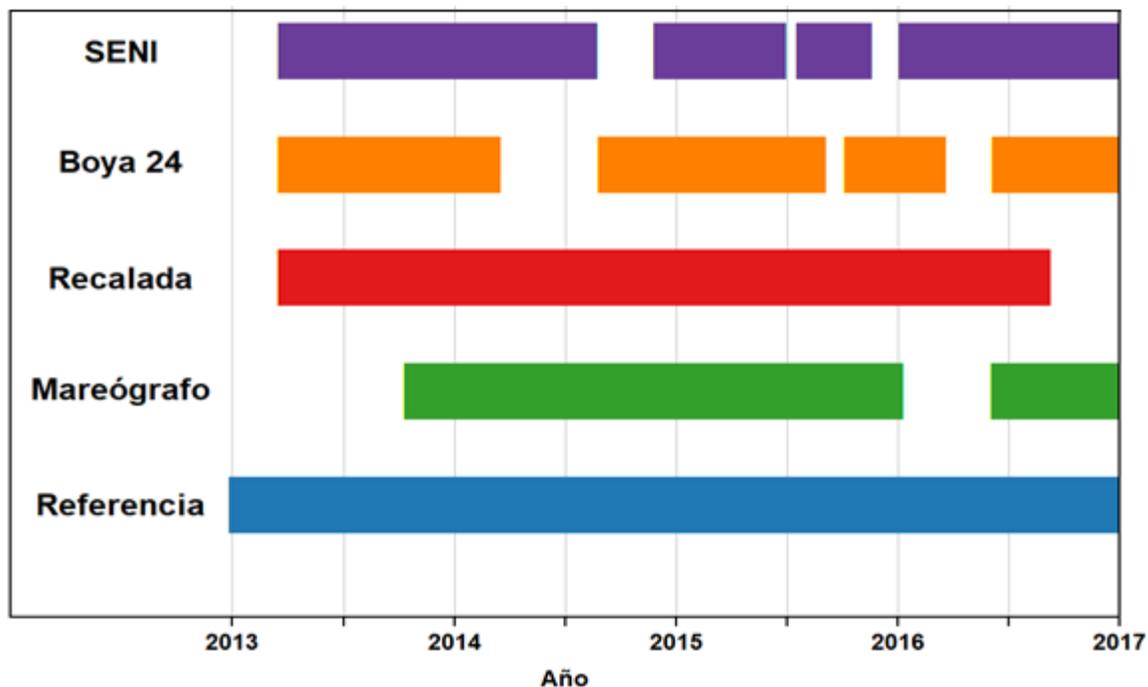


Fig. 4.9. Gráfico de presencia de datos *in situ* de 2013 a 2017.

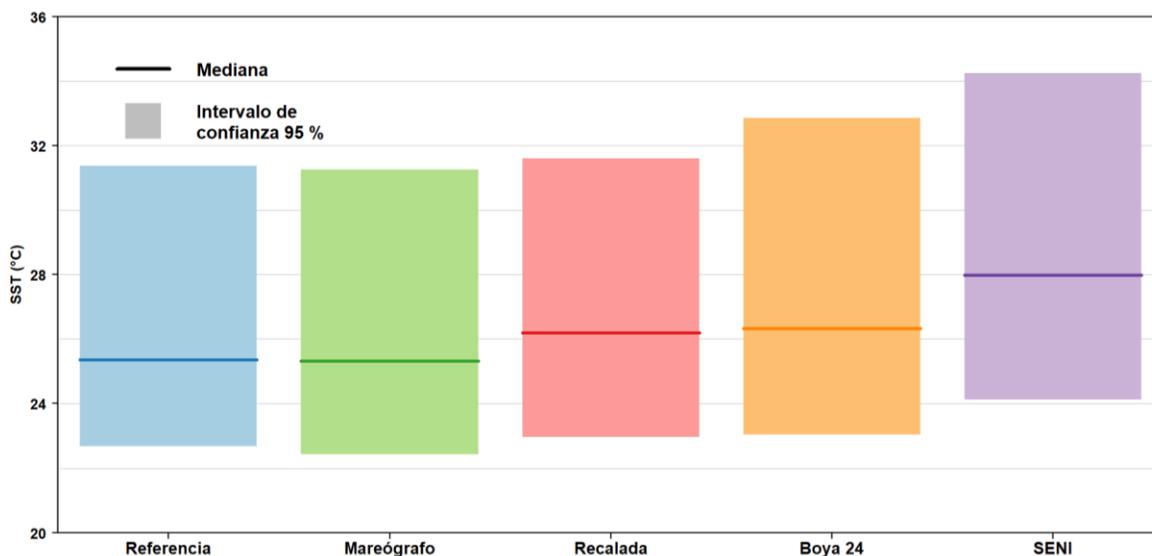


Fig. 4.10. Comparación de distribución de SST en series *in situ* con la serie de referencia.

Tabla 4.4. Comparación de series *in situ* respecto a serie de referencia: mediana de diferencias punto a punto.

Serie	Mediana de diferencias
Mareógrafo	0.00
Recalada	0.30
Boya 24	0.74
SENI	2.12

Se calcularon las desviaciones de los parámetros (mediana y percentiles) mensuales y trimestrales de cada serie *in situ*, previamente corregida (Tabla 4.4), respecto a las normales climatológicas trimestrales (Fig. 4.7) y mensuales (Fig. 4.8). En la figura 4.11 se muestran las desviaciones del percentil 97.5 trimestral, en la figura 4.12 las desviaciones del percentil 2.5 y en la figura 4.13 las desviaciones de la mediana. En la figura 4.14 se muestran las desviaciones del percentil 97.5 mensual, en la figura 4.15 las desviaciones del percentil 2.5 mensual y en la figura 4.16 las desviaciones de la mediana mensual.

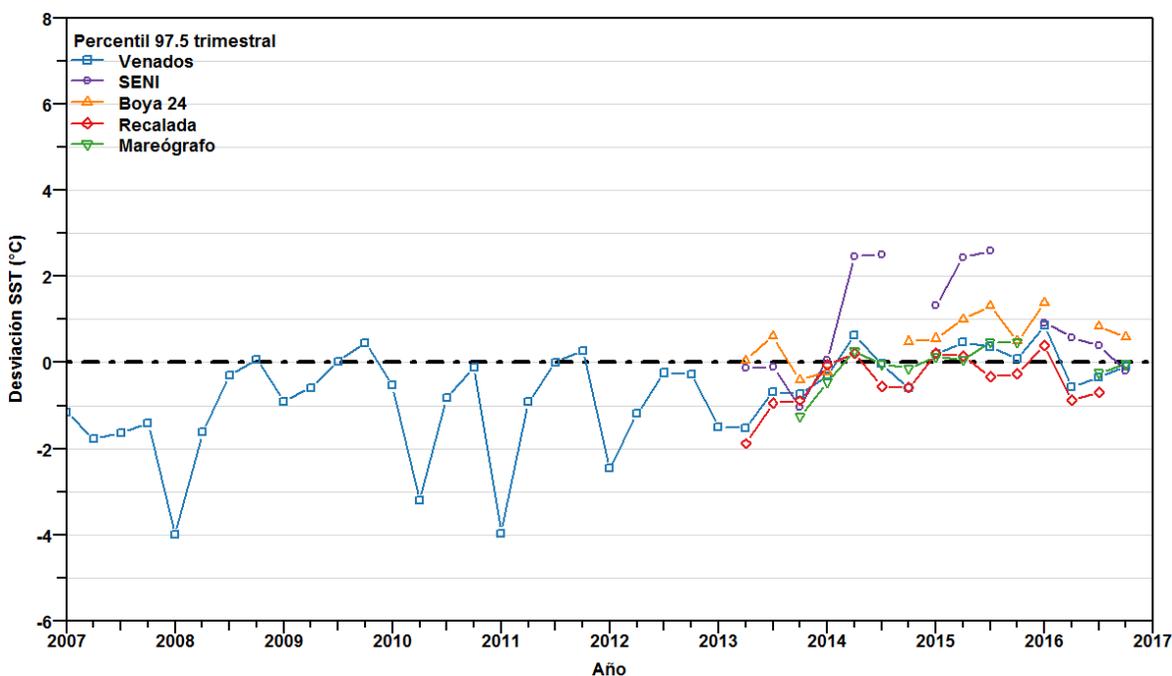
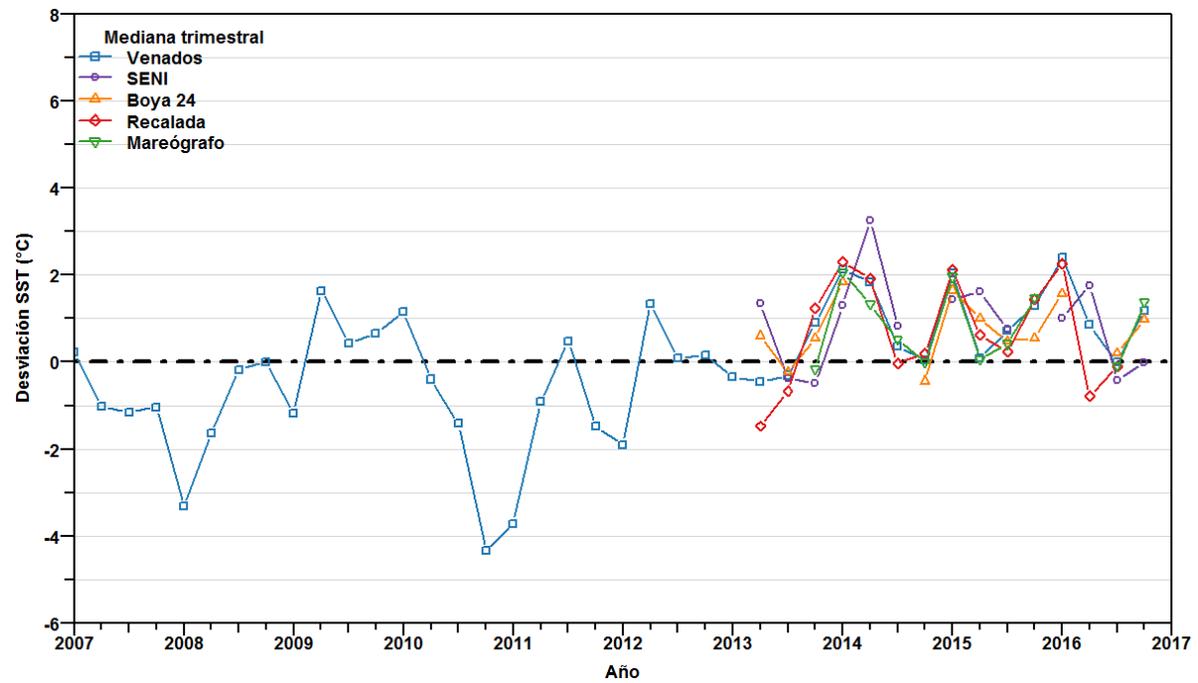
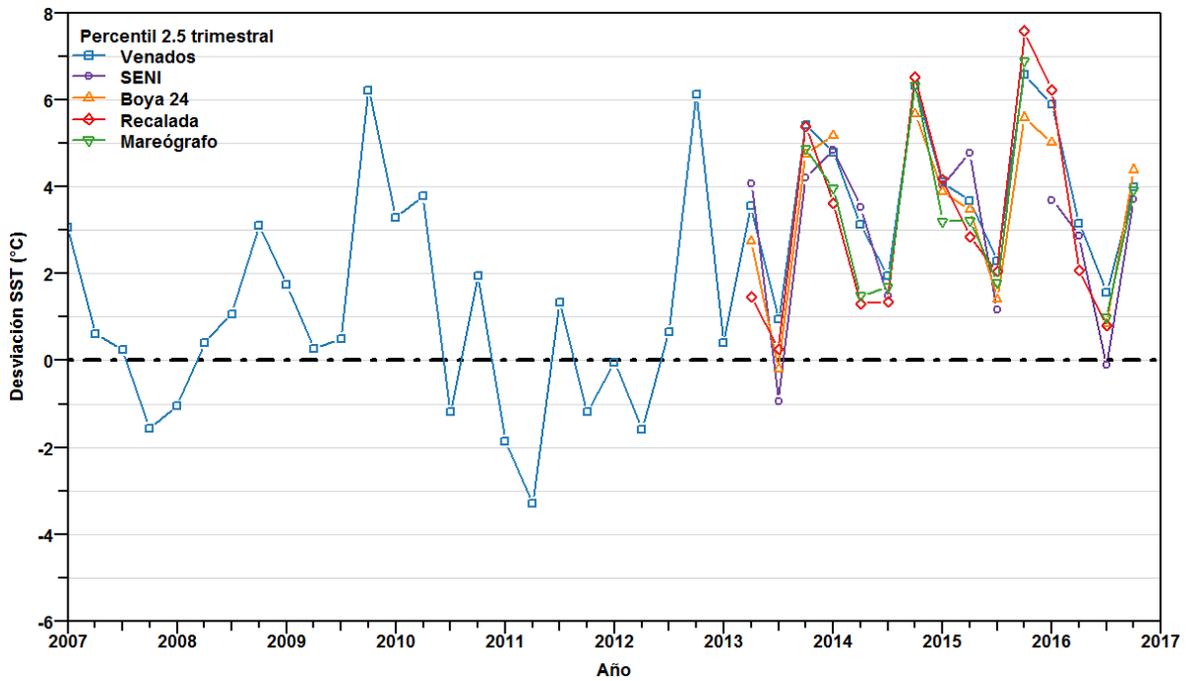


Fig. 4.11. Desviaciones del percentil 97.5 trimestral de las series *in situ* respecto a la serie de referencia.



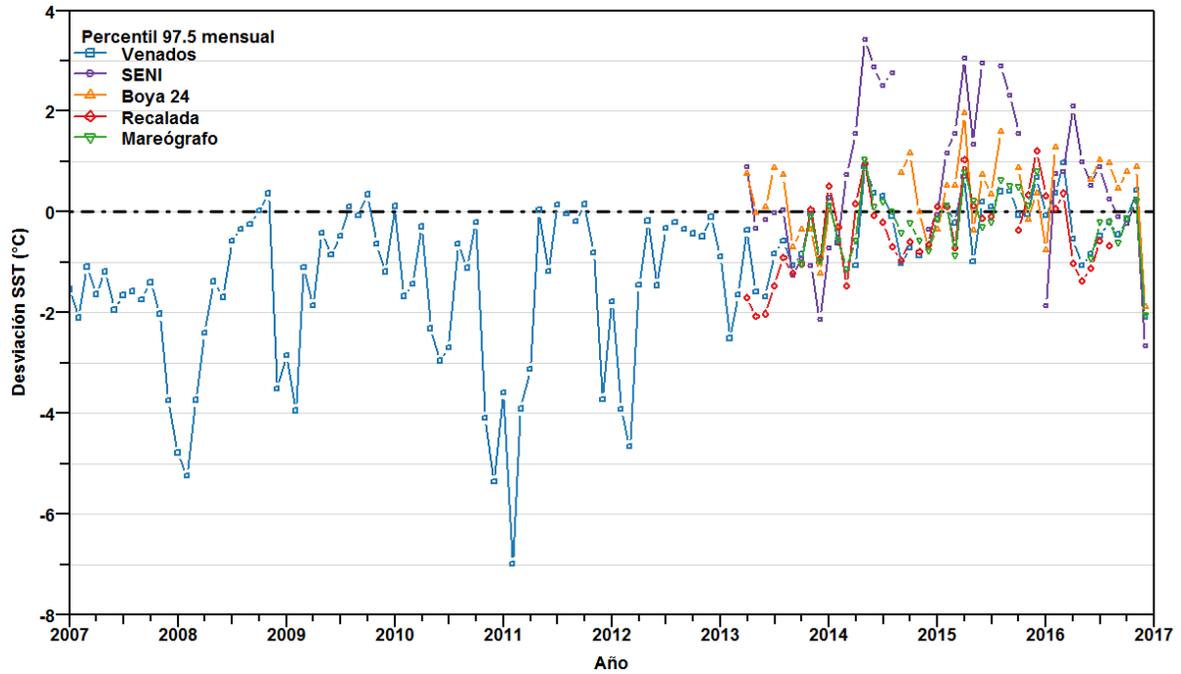


Fig. 4.14. Desviaciones del percentil 97.5 mensual de las series in situ respecto a la serie de referencia.

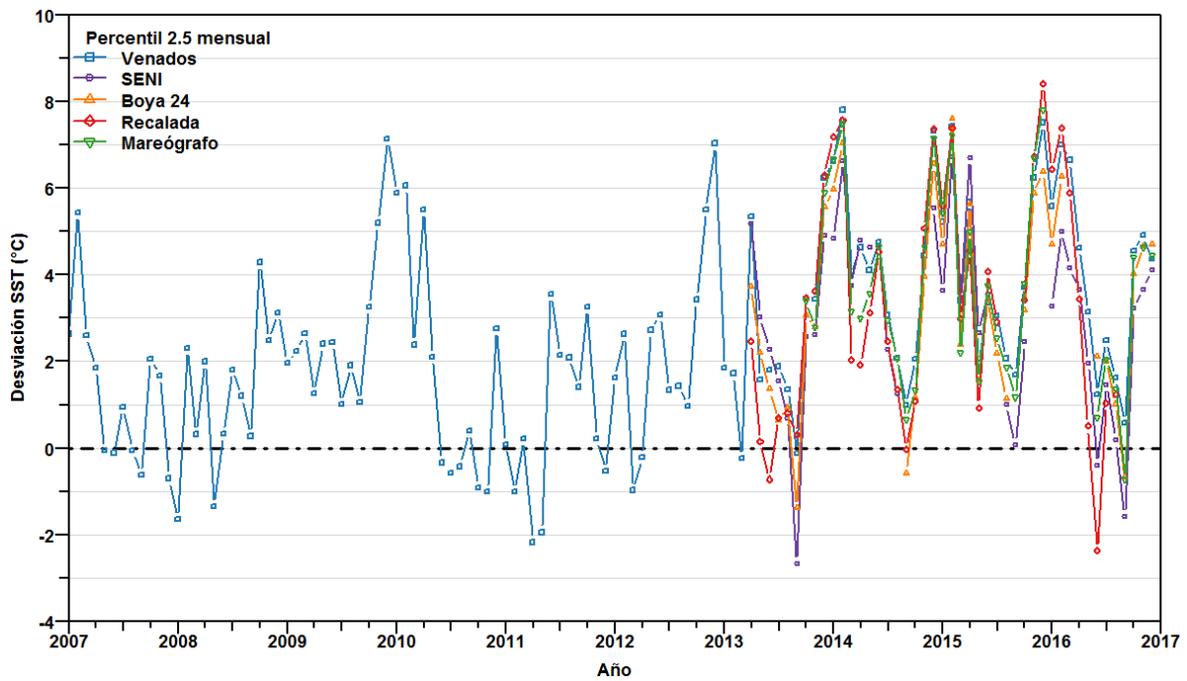


Fig. 4.15. Desviaciones del percentil 2.5 mensual de las series in situ respecto a la serie de referencia.

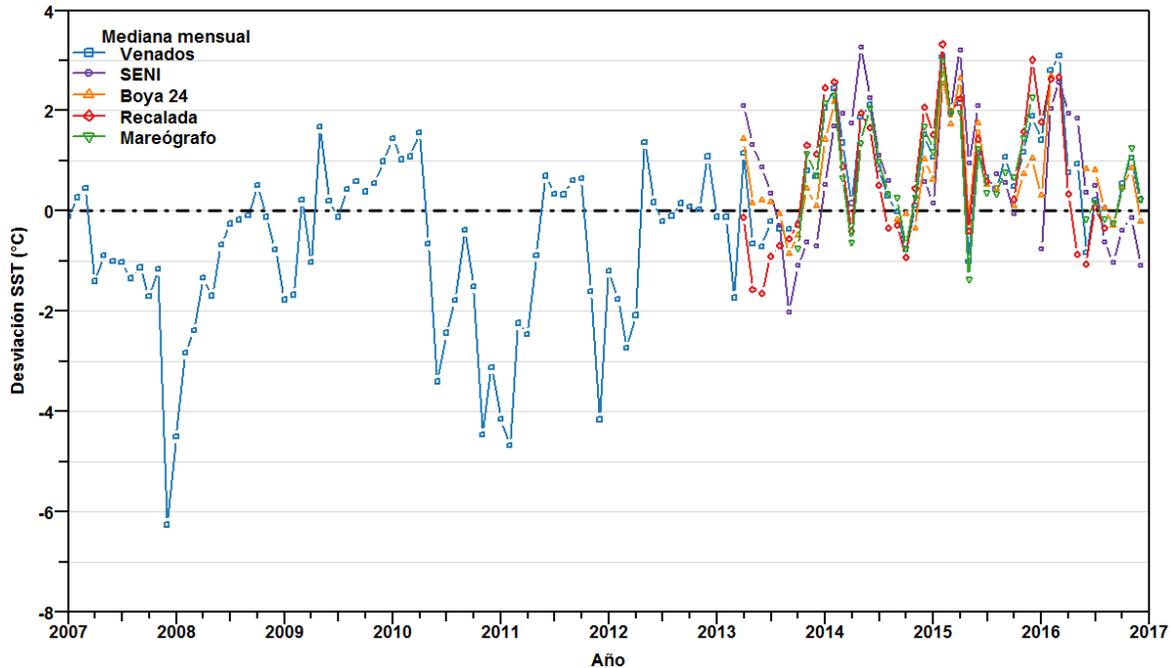


Fig. 4.16. Desviaciones de la mediana (percentil 50) mensual de las series in situ respecto a la serie de referencia.

4.4. Correlaciones índices ENSO – desviaciones

Para seleccionar el índice ENSO más apropiado para este trabajo, fueron comparados, mediante una correlación de Spearman, los índices ENSO descargados (Tabla 3.1) con las desviaciones mensuales de la serie Venados (mediana y percentil 2.5 y 97.5) respecto a las normales operativas. Para el cálculo de la correlación se utilizaron las desviaciones de la serie Venados por ser las de mayor longitud temporal. Todos los índices analizados mostraron una asociación fuerte ($\rho > 0.50$) y significativa ($p < 0.05$) (Tabla 4.5). Aunque el índice Niño 4 fue el que mayor asociación mostró respecto a cada normal, finalmente se eligió utilizar el índice ONI (*Oceanic Niño Index*) para los siguientes análisis, esto considerando que también es el índice operativo utilizado por la NOAA (NOAA, 2017b). En la figura 4.17 se muestra el gráfico de dispersión de las desviaciones de la serie Venados respecto al índice ONI.

Tabla 4.5. Coeficientes de correlación (ρ) de Spearman entre índices ENSO y desviaciones mensuales de la serie Venados respecto a las normales climatológicas (todas con $p < 0.05$ y $n = 120$).

	Desviación percentil 2.5	Desviación percentil 97.5	Desviación percentil 50 (mediana)
MEI	0.52	0.54	0.67
Niño 3	0.49	0.57	0.63
Niño 3.4	0.56	0.57	0.70
Niño 4	0.61	0.56	0.73
ONI	0.58	0.54	0.70

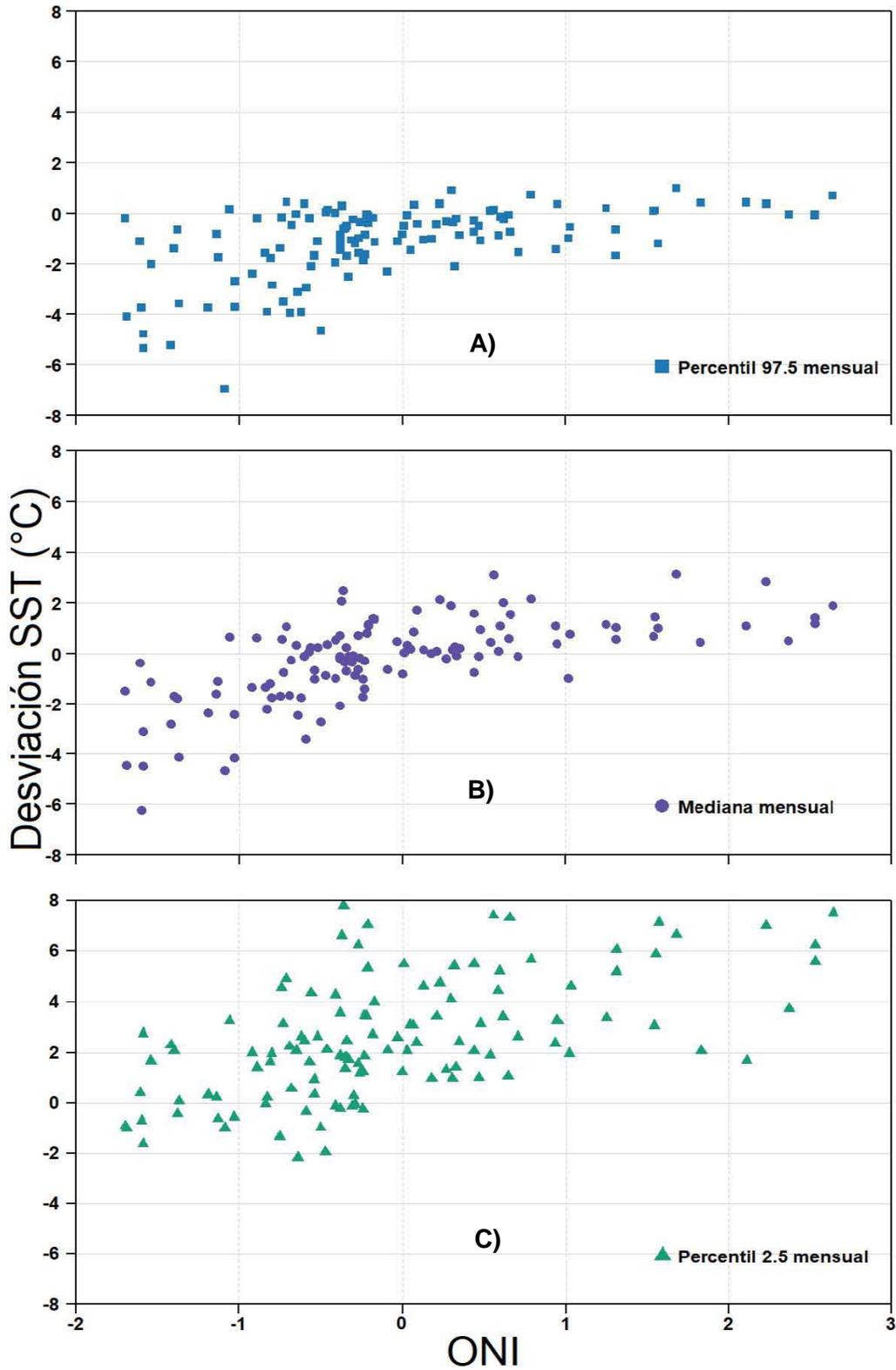


Fig. 4.17. Gráfico de dispersión de las desviaciones mensuales de la serie Venados respecto al índice ONI: (a) desviación del percentil 97.5, (b) desviación de la mediana y (c) desviación del percentil 2.5.

Se estudió también la asociación entre los valores mensuales del índice ONI y las desviaciones mensuales (mediana y percentil 2.5 y 97.5) de las series *in situ* respecto a las normales operativas mediante la correlación de Spearman (Tabla 4.6). Únicamente es significativa la correlación con las desviaciones de la serie Recalada y con la desviación del percentil 97.5 de la serie Mareógrafo.

Tabla 4.6. Resultados de correlación de Spearman entre índice ONI y desviaciones mensuales de las series *in situ* respecto a las normales operativas. Se **resaltan** las correlaciones significativas (valor $p < 0.05$).

Desviación mensual	ρ de correlación con índice ONI	p de correlación con índice ONI	n de correlación con índice ONI
Recalada percentil 2.5	0.50	$1.1 \cdot 10^{-3}$	39
Recalada percentil 97.5	0.55	$3.4 \cdot 10^{-4}$	39
Recalada mediana	0.46	$3.4 \cdot 10^{-3}$	39
Mareógrafo percentil 2.5	0.14	0.42	33
Mareógrafo percentil 97.5	0.49	$3.6 \cdot 10^{-3}$	33
Mareógrafo mediana	0.17	0.34	33
Boya 24 percentil 2.5	0.32	0.07	33
Boya 24 percentil 97.5	0.11	0.56	33
Boya 24 mediana	0.30	0.09	33
SENI percentil 2.5	0.11	0.50	38
SENI percentil 97.5	0.39	$1.5 \cdot 10^{-2}$	38
SENI mediana	0.29	0.07	38

4.5. Tendencias

Utilizando las dos series más largas (Venados y ERA-Interim) se calculó la tendencia de SST en Mazatlán, mediante un modelo de regresión lineal simple, entre 1981 y 2010.

4.5.1. Serie *in situ* Venados

La serie Venados presenta dos frecuencias de muestreo durante el periodo entre 1981 y 2010: 1 dato por mes de 1981 a 2005 y 1 dato cada 6 horas entre 2005 y 2010. Para calcular la tendencia de SST se homogeneizó toda la serie a una frecuencia mensual, para lo que se utilizaron los datos originales en el periodo de 1981 a 2005 y las medianas mensuales a partir de 2005 a 2010. Como resultado se encontró una tendencia positiva y significativa, de 0.55 ± 0.23 °C/década y un valor $p = 0.02$ (Fig. 4.18).

4.5.2. Serie de reanálisis ERA-Interim

La tendencia de SST en la serie ERA-Interim se calculó a partir de los datos originales, con frecuencia de 3 horas, y a partir de los parámetros mensuales y anuales calculados (mediana, percentil 2.5 y 97.5), entre 1981 y 2010. A partir de los datos originales se encontró una tendencia positiva y significativa, de 0.24 ± 0.01 °C/década y con un valor $p < 2.2 \cdot 10^{-16}$ (Fig. 4.19). A partir

de los parámetros mensuales únicamente se encontró una tendencia significativa para el percentil 97.5 mensual, de 0.40 ± 0.17 °C/década y un valor $p = 0.02$ (Fig. 4.20). Para la mediana mensual se encontró una tendencia positiva de 0.25 ± 0.17 °C/década, aunque no fue significativa ($p = 0.16$), mientras que no se encontró tendencia alguna para el percentil 2.5 (0.06 ± 0.17 °C/década, $p = 0.74$).

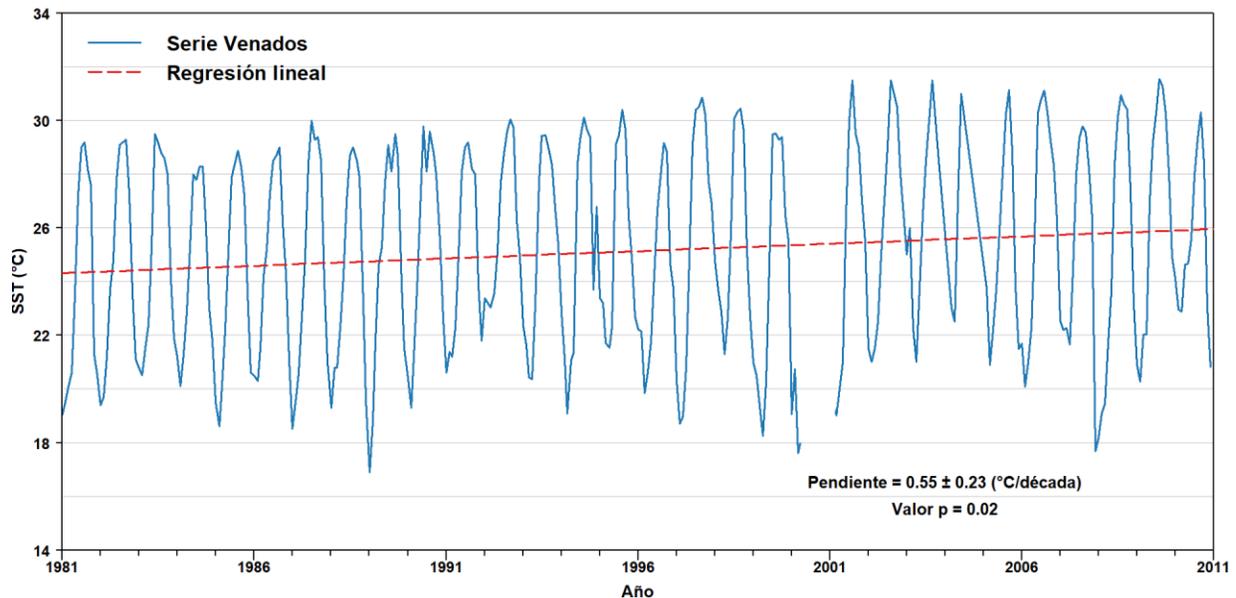


Fig. 4.18. Valores de SST mensuales de la serie Venados (línea continua) y recta ajustada mediante una regresión lineal simple (línea punteada).

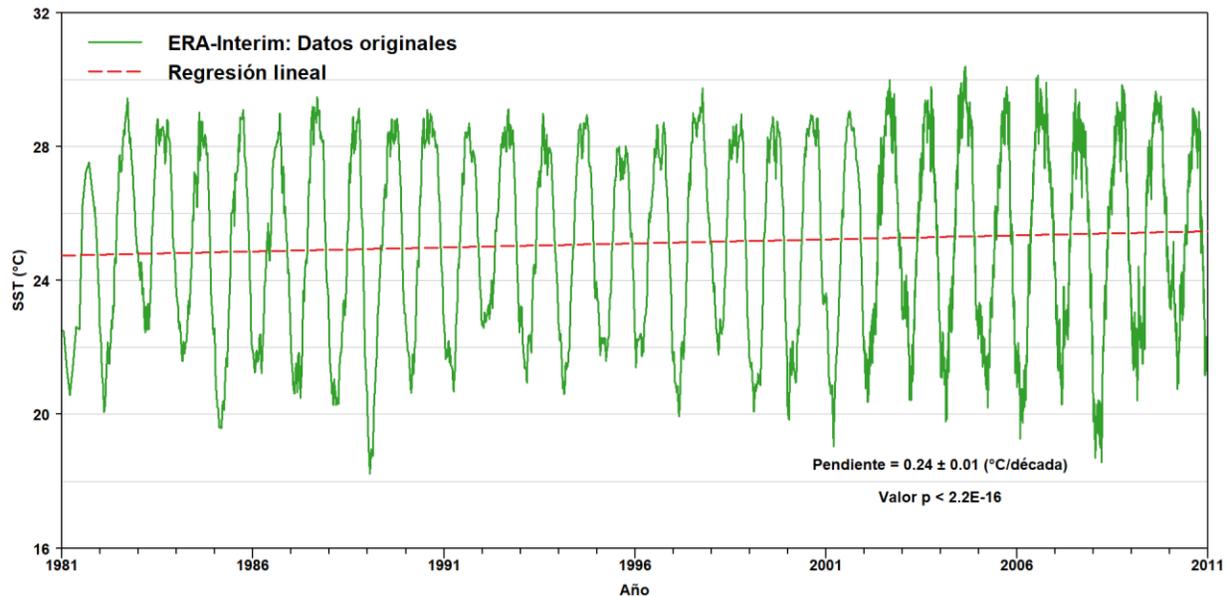


Fig. 4.19. Valores de SST originales de la serie ERA-Interim (línea continua) y recta ajustada mediante una regresión lineal simple (línea punteada).

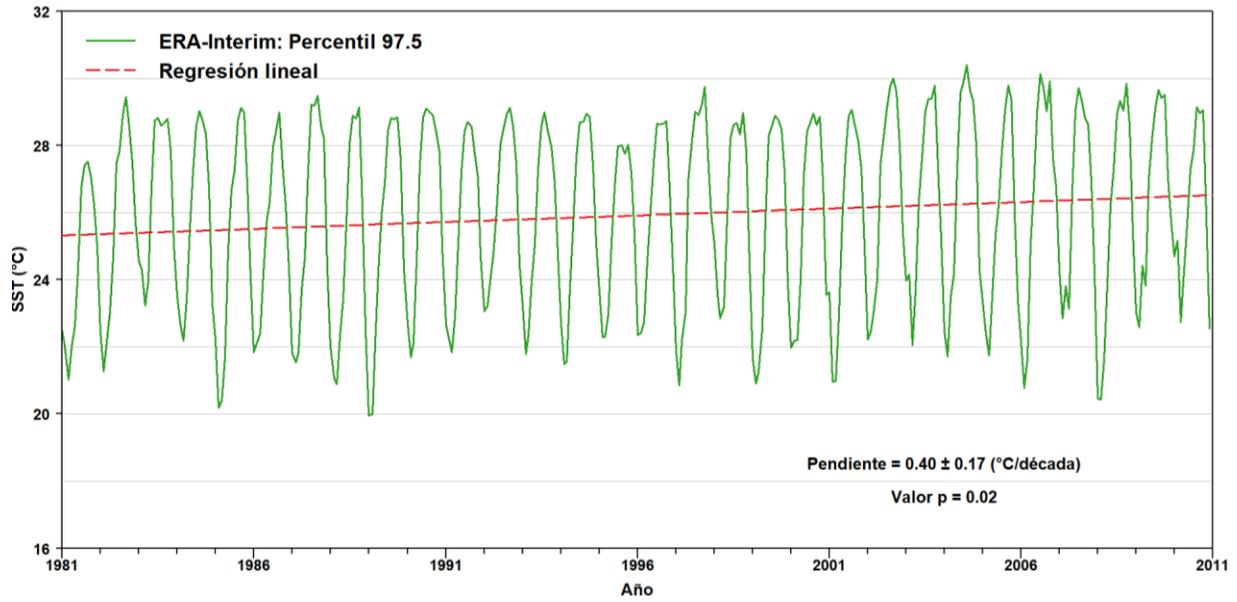


Fig. 4.20. Valores del percentil 97.5 mensual de la serie ERA-Interim (línea continua) y recta ajustada mediante una regresión lineal simple (línea punteada).

5. Discusión

En su último reporte, el IPCC confirma que el sistema climático del planeta está sufriendo un calentamiento, el cual es atribuido con certeza a un origen antropogénico, esto es causado principalmente por el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Stocker *et al.*, 2013). El aumento promedio de la temperatura superficial global desde 1880 es de 0.07 °C/década, desde 1970 es de 0.17 °C/década. También se tiene suficiente evidencia para asegurar que la superficie del océano (hasta 700 m de profundidad) también se ha calentado. Sin embargo, las tendencias a nivel regional pueden variar debido a efectos locales más complejos, como pueden ser islas de calor urbanas o dinámicas de circulación (Stocker *et al.* 2013). Por lo tanto, es necesario impulsar el esfuerzo de monitoreo y estudio del clima en escalas locales y regionales, que permita conocer mejor su comportamiento y respuesta a fenómenos globales como el Cambio Climático o el ENSO, esto con el propósito de mejorar los planes de mitigación y adaptación (Jones *et al.*, 2014).

5.1. Base de datos

La base de datos disponible incorpora series de datos de tres distintas fuentes: *in situ*, satelitales y de reanálisis. Cada tipo de series ofrece ciertas ventajas y desventajas. En las series *in situ*, se tiene información de SST desde 1973 (serie Venados), pero con frecuencia mensual hasta 2005, y una frecuencia de varias horas (3 o 6 horas) a partir de entonces. Las otras 4 series *in situ* (Recalada, Mareógrafo, Boya 24 y SENI) inician en 2013, cuando las sondas fueron instaladas en el contexto del proyecto Observatorios costeros del cambio global (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2018) y toman datos con una frecuencia de 30 minutos. Sin embargo, una situación común y recurrente en estas series es la ausencia de datos en periodos de tiempo del orden de semanas o meses. Esta situación suele presentarse debido a fallos o pérdidas de los instrumentos de medición. Estos fallos pueden eventualmente obstaculizar el manejo y la obtención de información a partir de estas series.

Las series obtenidas a partir de reanálisis presentan la ventaja de ofrecer series de tiempo completas con frecuencias de muestreo constantes. ERA-Interim ofrece datos desde 1979 (38 años) con una frecuencia de 3 horas, lo que permitiría establecer normales climatológicas de acuerdo con Trewin (2007). Sin embargo se observó que, al menos en el área del observatorio, el reanálisis subestima los valores de SST durante los meses cálidos (entre junio y octubre) Fig. 3.6). Esto puede deberse a una dificultad por parte de ERA-Interim de reproducir la complejidad dinámica de las zonas costeras, sumado a que ERA-Interim es un modelo global de enfoque atmosférico, a diferencia de Copernicus que está enfocado al sistema oceánico.

Por otra parte, se comprobó mediante el análisis visual mostrado en la figura 3.6 y 3.8, junto con el test de Kruskal-Wallis y la correlación de Spearman con la serie *in situ* Venados, que el modelo de reanálisis Copernicus reproduce satisfactoriamente el comportamiento de la SST en el observatorio. Por esta razón fue utilizada para establecer las normales operativas. Por otro lado, la resolución temporal de Copernicus (1 día) es menor respecto a otras series como el reanálisis ERA-Interim (3 horas) u algunas series *in situ* (30 minutos), por lo que podría ser inadecuada para otro tipo de análisis que consideren la variación diurna o la generada por las mareas. También tiene una longitud temporal menor (10 años) lo que la inhabilita para ser utilizada en el cálculo de tendencias a mediano plazo (del orden de décadas).

La serie satelital ofrece datos desde 2002 y ofrece una buena representación de la SST en Mazatlán, como se muestra al compararla con la serie *in situ* Venados (Fig. 3.6). Si bien su frecuencia de muestreo (1 – 2 días) es aceptable, se dispuso de series con mayor frecuencia como Venados (3 horas) para establecer la serie de referencia. De igual forma no fue tomada en cuenta para el análisis de tendencias debido a su longitud (15 años). Por estas razones no fue útil para los análisis realizados en este trabajo, sin embargo los datos satelitales presentan otras ventajas como la cobertura espacial y podrían resultar útiles para otros análisis, por lo que no se descartó de la base de datos creada.

5.2. Serie de referencia y normales climatológicas

Se construyó satisfactoriamente una serie de referencia de al menos 10 años de longitud, que permitió establecer las normales operativas de SST en el observatorio de acuerdo con las recomendaciones de Trewin (2007). Para el establecimiento de esta serie de referencia se utilizó como base la serie Venados, se complementaron los vacíos de datos con la serie Copernicus, para esto se utilizó la recomendación de incorporar series de distintas fuentes para este tipo de estudios (Trewin, 2007).

El test de Shapiro-Wilk mostró de las series de SST no son normales, lo que sugirió la necesidad de utilizar métodos estadísticos no paramétricos. Siguiendo la recomendación de Trewin (2007), se utilizaron parámetros de distribución (percentiles) para el establecimiento de las normales y su comparación durante el resto de los análisis. Las normales de SST en Mazatlán (Fig. 4.7 y 4.8) se muestran a través de las distribuciones mensuales y trimestrales de los percentiles 2.5 (mínimo), 50 (mediana) y 97.5 (máximo). Si bien las normales trimestrales presentan un comportamiento similar a las normales mensuales y reproducen bien el máximo de temperatura mensual, no es el caso con el mínimo de temperatura mensual, por lo que su uso no es recomendado.

5.2.1. Distribución de SST en el observatorio

Las series de SST *in situ* (Fig. 4.10) muestran un comportamiento similar entre ellas, en todas resalta la falta de simetría entre los percentiles 2.5 y 97.5 respecto a la mediana. También se aprecia un mayor aumento en la SST en las estaciones más internas del Estero de Urías (Fig. 3.4), tanto en el percentil 2.5 y la mediana, y aún más evidente en el percentil 97.5, que muestra una diferencia de casi 3 °C entre la serie SENI y de Referencia. Este aumento también se observa en las gráficas de las series originales, donde la serie SENI presenta un máximo de 38.09 °C, en comparación con el máximo de la Boya 24 de 35.30 °C, o el de la serie Venados, de 32.91 °C. Este aumento en las temperaturas registrado en la serie SENI se debe muy probablemente a la descarga de aguas de enfriamiento por parte de la central termoeléctrica (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2015a), a la que se debe añadir el posible efecto de sobrecalentamiento de aguas más someras.

5.3. Relación del índice ONI y SST en Mazatlán

Existe una correlación fuerte y significativa entre los índices ENSO y las desviaciones de la serie Venados respecto a las normales operativas mensuales (Tabla 4.5). Aunque el índice Niño 4 fue el de mayor correlación, se eligió el índice ONI pues además de mostrar buena correlación, es el índice operativo de la NOAA. Este resultado confirma la relación de las fases del ENSO y el comportamiento de la SST en Mazatlán, y que dicha relación puede encontrarse en cualquiera de los índices marinos de dicho fenómeno.

Para las series *in situ* se observa que únicamente las 3 desviaciones de la serie Recalada y la del percentil 97.5 de la serie Mareógrafo presentan correlaciones significativas con el índice ONI (Tabla 4.6). Esta falta de correlación del índice ONI con el resto de las series del observatorio podría deberse a que: i) las series de datos no tienen aún la longitud necesaria para este tipo de análisis, ii) que la señal del ENSO no se aprecia claramente dentro del estero, debido a la complejidad de los fenómenos que influyen en la temperatura de aguas costeras semi-confinadas, y/o iii) que dentro del estero la SST no es el parámetro más sensible al ENSO: debido a la influencia continental podría encontrarse más susceptible a otros indicadores que consideren otras variables, como la presión atmosférica.

5.3.1. Análisis de desviaciones durante eventos ENSO

En el periodo utilizado para el análisis de las desviaciones y el índice ONI (2007-2016) se presentaron dos eventos cálidos (El Niño; 2009-10 y 2015-16) y dos eventos fríos (La Niña: 2007-09 y 2010-12) (Australia Government Bureau of Meteorology, 2017a & 2017b). En la serie de referencia (Fig. 4.6) se observa que las temperaturas máximas para cada año son similares, alrededor de 32 °C, independientemente de la presencia de eventos El Niño o La Niña, salvo por el año 2007, cuyos máximos rondan los 30 °C. Sin embargo, las temperaturas mínimas sí presentan variaciones considerables (de hasta 6 °C) entre distintos años.

El evento El Niño que se presentó entre 2015 y 2016 es considerado como uno de los más intensos de los que se tiene registro (Kogan & Guo, 2016). En el observatorio de Mazatlán, el evento El Niño 2015-16 coincidió con el aumento de la SST, que se reflejó en el incremento en todos los parámetros de distribución, pero principalmente en el percentil 2.5. Es decir, El Niño 2015-16 causó especialmente un aumento de las temperaturas mínimas.

De igual modo, en la serie de referencia (Fig. 4.6) se muestra una notable elevación en los valores de las temperaturas mínimas para los años 2014, 2015 y 2016 (>20 °C), en comparación con otros años, cuyos mínimos se encuentran alrededor de los 16 °C. En 2010 también se aprecia una elevación en los valores mínimos hasta unos 20 °C, que coincide con el evento El Niño 2009-10, el cual se caracterizó por ser intenso (con una fuerte anomalía de SST) pero efímero (una rápida transición a un evento tipo La Niña) (Kim *et al.*, 2011). Esta condición también se observa en el comportamiento de las desviaciones trimestrales del percentil 2.5 de la serie Venados y Recalada, mostradas en paralelo con el desarrollo del índice ONI (Fig. 5.1), con el que mantienen una correlación fuerte y positiva ($R > 0.5$, $p < 0.01$). Se observa que los valores más altos del índice ONI coinciden con los valores más altos de las desviaciones, tanto de la serie Venados como Recalada.

El evento de La Niña 2007-09 se caracterizó por una anomalía moderadamente intensa entre 2007-08, seguida de un pico de una anomalía de débil a moderada (Fig. 5.1b). El evento de La Niña 2010-12 ha sido considerado como uno de los más intensos registrados. De igual manera presenta dos picos, el primero (2010-11) muy intenso, seguido de uno moderado (Fig. 5.1b) (Australian Government, Bureau of Meteorology, 2017a). En las desviaciones del percentil 2.5 de la serie venados, se observan valores negativos que coinciden con los eventos de La Niña, tanto en 2007-08, como en 2010-12. Sin embargo, es en las desviaciones de la mediana donde se aprecia con mayor claridad. En la figura 5.2 se observa que los valores más negativos de la desviación de la mediana coinciden con los eventos de La Niña en 2007-09, 2010-11 y 2011-12, mientras que las desviaciones más positivas coinciden con los eventos El Niño de 2009-10 y 2015-16.

Las mayores desviaciones se presentan en las temperaturas mínimas (percentil 2.5) durante el 3er y 4to trimestre en presencia de eventos ENSO (Fig. 5.1), lo que también se aprecia en la variación de los valores de SST durante el invierno (Fig. 4.6). Esta observación puede explicarse mediante los dos mecanismos de comunicación con eventos El Niño en la región. En primer lugar, la advección causada por el arribo de ondas atrapadas a la costa provenientes del sur (desde el Pacífico ecuatorial), las cuales generan el hundimiento de la termoclina (Lluch-Cota *et al.*, 2001; Herrera-Cervantes *et al.*, 2007). En segundo lugar, la disminución de los vientos hacia el sur y el aumento de los vientos hacia el norte, como resultado de cambios en la circulación oceánica de las latitudes medias, lo cual también favorece el hundimiento de la termoclina e inhibe la formación de surgencias (Lluch-Cota *et al.*, 2001; Herrera-Cervantes *et al.*, 2007; Turi *et al.*, 2017). Por el contrario, durante eventos La Niña, los vientos hacia el sur del sistema de la Corriente de California se intensifican favoreciendo la ocurrencia surgencias y el aporte de aguas frías a la región (Turi *et al.*, 2017). Ambos mecanismos producen un efecto sobre la profundidad de la termoclina y la ocurrencia de surgencias, afectando así el aporte de aguas frías provenientes del fondo.

Entre 2013 y 2014 se observan desviaciones positivas en las temperaturas mínimas que no coinciden con algún evento ENSO positivo (Fig. 5.1) que sugieren un calentamiento previo a la ocurrencia de El Niño 2015-16. Este comportamiento podría deberse a un fenómeno local o a la superposición otras teleconexiones como la PDO (*Pacific Decadal Oscillation*), por lo que se requiere de más análisis para explicarlo. Cabe mencionar que el mecanismo de las ondas atrapadas a la costa, uno de los que transmite la señal del ENSO hacia esta región, no es inmediato, si no que puede tardar varias semanas en llegar dicha señal. Por esto se sugiere el uso de análisis que consideran el desfase de tiempo, como la correlación cruzada.

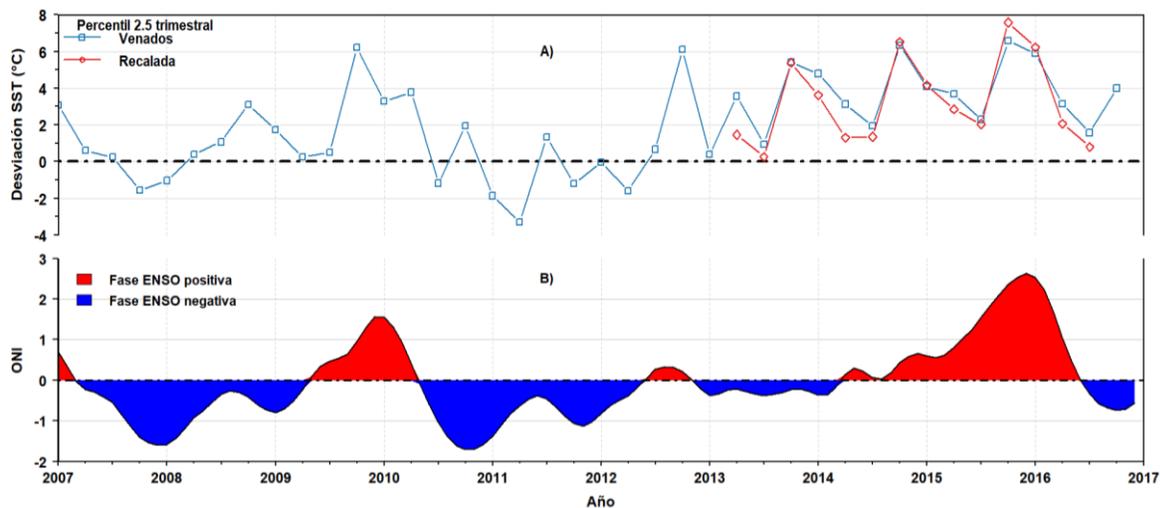


Fig. 5.1. Comparación de las desviaciones del percentil 2.5 de las series Venados y Recalada (A) y el índice ONI (B).

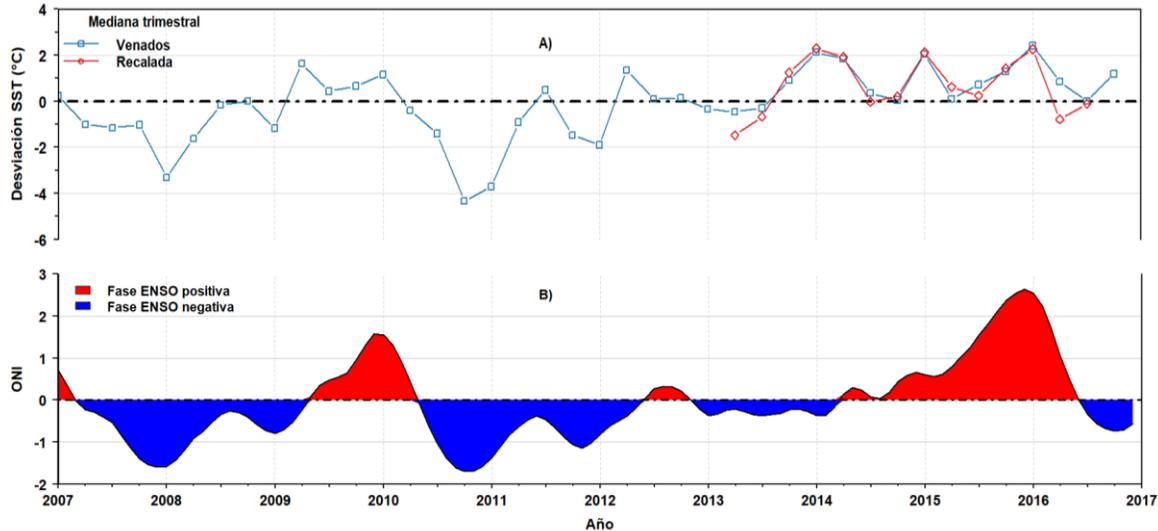


Fig. 5.2. Comparación de las desviaciones de la mediana de las series Venados y Recalada (A) y el índice ONI (B).

5.4. Análisis de las tendencias

Se calcularon las tendencias de SST en Mazatlán durante las últimas tres décadas (1981-2010) mediante un modelo de regresión lineal simple, a partir de parámetros de distribución: mediana, para la serie *in situ* Venados y el reanálisis ERA-Interim; percentiles 2.5 y 97.5 en el reanálisis ERA-Interim. La tendencia de SST de la serie Venados (0.55 ± 0.23 °C/década, $p = 0.02$) (Fig. 4.18) es significativa pero considerablemente mayor a la reportada de 0.17 °C/década para el Hemisferio Norte. Esta divergencia puede deberse a efectos de dinámica costera, influencia antropogénica local e incluso a la calidad de la serie de datos en sus primeros años, donde se dispone de una medición por mes.

En la serie del reanálisis ERA-Interim se observaron tendencias positivas significativas para los datos originales (0.24 ± 0.01 °C/década, $p < 2.2 \times 10^{-16}$) (Fig. 4.19) y para el percentil 97.5 mensual (0.40 ± 0.17 °C/década, $p = 0.02$) (Fig. 4.20), si bien no se observaron tendencias significativas para el percentil 2.5, ni para la mediana mensual. Aunque la tendencia de la mediana mensual no es estadísticamente significativa (0.25 ± 0.17 °C/década), es estadísticamente indistinguible de la obtenida a partir de los datos originales (0.24 ± 0.01 °C/década). La tendencia del percentil 97.5 de la serie ERA-Interim (0.40 ± 0.17 °C/década) tampoco es distinta a la calculada con la mediana mensual de la serie Venados (0.55 ± 0.23 °C/década). Estos resultados indican que el calentamiento en el observatorio se refleja más en el aumento de las temperaturas máximas y que, por el contrario, no se manifiesta en las temperaturas mínimas, las cuales están especialmente afectadas por los eventos El Niño.

5.5. Alcances, limitaciones y perspectivas

Las series de SST disponibles en la base de datos fueron suficientes y permitieron establecer las normales operativas para el Observatorio Costero de Mazatlán, con datos de los últimos 10 años. También fue posible conocer los patrones de distribución de la SST a lo largo del Observatorio, la relación con el ENSO y las tendencias en las últimas tres décadas.

La incorporación de datos de distintas fuentes (*in situ*, satelitales y de reanálisis) fue fundamental para lograr los objetivos de este trabajo: cada distinto tipo de datos ofrece distintas ventajas y sufre de ciertas desventajas. Las series *in situ* permiten conocer el comportamiento de la SST con muy alta resolución temporal y espacial, aunque sus limitaciones derivan de la dificultad de obtener series completas, sin huecos por fallos o pérdidas. En ese sentido resulta conveniente continuar con la incorporación de series de reanálisis, pues se comprobó que éstas pueden llegar a reproducir satisfactoriamente el comportamiento observado en el observatorio, principalmente el reanálisis Phy 001 024 (Copernicus), proporcionado por el Programa Europeo de Observación Terrestre Copernicus. A pesar de que la serie satelital no resultó útil para los análisis de este trabajo, no debería dejar de incorporarse a la base de datos del observatorio, su resolución y cobertura espacial podría significar una ventaja para análisis posteriores.

Una de las principales limitaciones de este trabajo fue la incapacidad para establecer normales climatológicas, para las cuales es necesario disponer datos durante al menos 30 años. En este caso se disponía de dos series con esa longitud: Venados, aunque con muy baja periodicidad de datos (1 mes) y ERA-Interim, que no reproduce satisfactoriamente el comportamiento de la SST. Esta situación se resolvió mediante el establecimiento de normales operativas, calculadas en un periodo de 10 años. Sin embargo, este tipo de normales solo pueden ser usadas para hacer comparaciones dentro del mismo periodo.

Otra de las limitaciones presentadas fue la corta longitud de la mayoría de las series *in situ*, lo que posiblemente impidió encontrar una correlación con el índice ONI en las series más internas al estero. Cabe resaltar que a partir de 2013, cuando comienzan las series SENI, Boya 24, Mareógrafo y Recalada, únicamente se presentó un evento El Niño fuerte, y ningún evento tipo La Niña.

En contraste con otro tipo de variables ambientales, como la temperatura atmosférica, resalta la poca disponibilidad de observaciones de temperatura del mar en décadas anteriores, y aún en el presente para las zonas costeras del país, situación poco deseable tomando en cuenta la importancia que ésta tiene para factores climáticos y ambientales.

Por todos estos motivos es recomendable continuar y redoblar los esfuerzos realizados hasta ahora para el monitoreo *in situ*. Sin bien es deseable incrementar el número de estaciones de monitoreo, es primordial aumentar el esfuerzo en mantener series de tiempo continuas en las estaciones existentes, probablemente con un sistema de redundancia de sensores en lugares próximos. Este esfuerzo debe ser garantizado a medio y largo plazo. Este esfuerzo puede permitir en el futuro conocer mejor los impactos del ENSO y el calentamiento global en esta zona.

6. Conclusiones

Se incorporó una base de datos de temperatura superficial del mar (SST) en Mazatlán constituida por: i) 5 series de observaciones *in situ*, 4 con datos desde 2013 y 1 con datos mensuales desde 1973; ii) 2 series de reanálisis con datos desde 1979 y 2007; y iii) 1 serie satelital con datos desde 2002.

A partir de la comparación entre las series *in situ* y las series de reanálisis se comprobó que el reanálisis *Global Phy 001 024* (Copernicus) es el que mejor reproduce el comportamiento observado de la SST en Mazatlán. Por el contrario se advirtió que el reanálisis ERA-Interim tiene deficiencias para reproducir el comportamiento observado durante el verano.

A partir de la serie *in-situ* Venados y del reanálisis Copernicus fue posible crear una serie referencia para el Observatorio Costero de Mazatlán, de 10 años de longitud, entre 2007 y 2016 y con datos cada 3 horas. A partir de esta serie se definieron las normales operativas de SST en Mazatlán, establecidas a partir de tres parámetros de distribución: percentil 2.5, como indicador del comportamiento de las temperaturas mínimas, percentil 50, como indicador del comportamiento medio y percentil 97.5, como indicador de las temperaturas máximas.

Se calcularon las desviaciones de los parámetros de distribución de cada serie *in situ* respecto a las normales establecidas. Las mayores desviaciones positivas se encontraron en el percentil 2.5 de todas las series, principalmente en el 4to trimestre (octubre a diciembre) de 2009, y entre 2015 y 2016. Las mayores desviaciones negativas se encontraron en la mediana de la serie Venados, principalmente entre el 4° trimestre de 2010 y el 1° trimestre de 2011, y en el 1° trimestre de 2008.

A partir de la correlación entre estas desviaciones y el índice ONI (*Oceanic Niño Index*) se comprobó la asociación entre la ocurrencia de las fases cálidas o frías del ENSO (El Niño o La Niña respectivamente) y la variación (aumento o disminución) de SST en Mazatlán, dicha variación se manifiesta principalmente en las temperaturas mínimas. Sin embargo, esta correlación únicamente es significativa en las series de las sondas más externas (Venados y Recalada). No se observó ninguna asociación significativa con las series dentro del estero, esto indica que la SST dentro del estero de Urías está dominado por otros procesos, como las mareas y la variación diurna de radiación solar, además de la incidencia de las descargas de agua caliente de la central termoeléctrica.

Mediante un modelo de regresión lineal simple aplicado a las medianas mensuales de la serie Venados y a los parámetros de distribución de la serie ERA-Interim, se calcularon las tendencias de SST entre 1980 y 2010 en Mazatlán. Se encontraron tendencias significativas de calentamiento (positivas) en la mediana mensual de la serie Venados (0.55 ± 0.23 °C/década) y en el percentil 97.5 (0.40 ± 0.17 °C/década) y datos originales (0.24 ± 0.01 °C/década) de la serie ERA-Interim. Estas tendencias son mayores al promedio global (0.11 ± 0.02 °C/década) y del Hemisferio norte (~ 0.17 °C/década), entre 1971 y 2010, reportado por el IPCC (Stocker *et al.*, 2013), lo que indica esta zona está experimentando un calentamiento más rápido que el promedio global y del Hemisferio norte.

7. Bibliografía

- Álvarez-León, R. (1980). Hidrología y zooplancton de tres esteros adyacentes a Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales Del Centro de Ciencias Del Mar Y Limnología-UNAM*, 7(1), 177-194.
- Australian Government, Bureau of Meteorology. (2017a) La Niña – Detailed Australian Analysis. Recuperado de: <http://www.bom.gov.au/climate/enso/Inlist/index.shtml>. Consultado en 2018-01-25.
- Australian Government, Bureau of Meteorology. (2017b) El Niño – Detailed Australian Analysis. Recuperado de: <http://www.bom.gov.au/climate/enso/Inlist/index.shtml>. Consultado en 2018-01-25.
- Barbosa, S. M., & Andersen, O. B. (2009). Trend patterns in global sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 29(14), 2049-2055.
- Bengtsson, L., Hagemann, S., & Hodges, K. I. (2004). Can climate trends be calculated from reanalysis data?. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D11).
- Cardoso-Mohedano, J. G., Bernardello, R., Sanchez-Cabeza, J. A., Ruiz-Fernández, A. C., Alonso-Rodríguez, R., & Cruzado, A. (2015a). Thermal impact from a thermoelectric power plant on a tropical coastal lagoon. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(1), 2202.
- Cardoso-Mohedano, J. G., Bernardello, R., Sanchez-Cabeza, J. A., Molino-Minero-Re, E., Ruiz-Fernández, A. C., & Cruzado, A. (2015b). Accumulation of conservative substances in a subtropical coastal lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 164, 1-9.
- Carré, M., Sachs, J. P., Purca, S., Schauer, A. J., Braconnot, P., Falcón, R. A., Julien, M. & Lavallée, D. (2014). Holocene history of ENSO variance and asymmetry in the eastern tropical Pacific. *Science*, 345(6200), 1045-1048.
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., Aunchayna, R., & Bidegain, M. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009* (No. 551.58: 631 CAR).
- Climate-Data.org. (2018). Clima: Mazatlán. Recuperado de: <https://es.climate-data.org/location/871696/> Consultado en 2018-03-30.
- Copernicus. (2017). Access to products - Copernicus. [online] Descargado de: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024. Consultado en: 2017-11-27.
- Decker, M., Brunke, M. A., Wang, Z., Sakaguchi, K., Zeng, X., & Bosilovich, M. G. (2012). Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations. *Journal of Climate*, 25(6), 1916-1944.
- Dewitte, B., Takahashi, K., Goubanova, K., Montecinos, A., Mosquera, K., Illig, S., ... & Flores, R. (2014). Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú.

ECMWF. (2016) What is ERA-Interim? Recuperado de: <https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/What+is+ERA-Interim>. Consultado en 2017-11-27.

Foley, J. (2010). Boundaries for a healthy planet. *Scientific American*, 302(4), 54-57.

García de Miranda, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana) (No. QC 981. G37 1973).

Gornitz, V. (2009). Sea level change, post-glacial. In *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments* (pp. 887-893). Springer Netherlands.

Hanley, D. E., Bourassa, M. A., O'Brien, J. J., Smith, S. R., & Spade, E. R. (2003). A quantitative evaluation of ENSO indices. *Journal of Climate*, 16(8), 1249-1258.

Herrera-Cervantes, H., Lluch-Cota, D. B., Lluch-Cota, S. E., & Gutiérrez-de-Velasco, S. (2007). The ENSO signature in sea-surface temperature in the Gulf of California. *Journal of Marine Research*, 65(5), 589-605.

Hsu, P. C., Ho, C. R., Liang, S. J., & Kuo, N. J. (2013). Impacts of two types of El Niño and La Niña events on typhoon activity. *Advances in Meteorology*, 2013.

INEGI. (2015). *Panorama Sociodemográfico de Sinaloa*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes.

Jansen, E., J. Overpeck, K.R. Briffa, J.-C. Duplessy, F. Joos, V. Masson-Delmotte, D. Olago, B. Otto-Bliesner, W.R. Peltier, S. Rahmstorf, R. Ramesh, D. Raynaud, D. Rind, O. Solomina, R. Villalba and D. Zhang. (2007). Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jones R., Patwardhan A., Cohen S., Dessai S., Lammel A., Lempert R., Mirza M., von Storch H. (2014). Fundamentos para la toma de decisiones. En *Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Evaluación del IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, E.U.A.

Kim, K. Y., & Kim, Y. Y. (2002). Mechanism of Kelvin and Rossby waves during ENSO events. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 81(3-4), 169-189.

Kim, W., Yeh, S. W., Kim, J. H., Kug, J. S., & Kwon, M. (2011). The unique 2009–2010 El Niño event: A fast phase transition of warm pool El Niño to La Niña. *Geophysical Research Letters*, 38(15).

Kogan, F., & Guo, W. (2017). Strong 2015–2016 El Niño and implication to global ecosystems from space data. *International Journal of Remote Sensing*, 38(1), 161-178.

Kuhlmann, J., Asioli, A., Trincardi, F., Klügel, A., y Huhn, K. (2015). Sedimentary response to Milankovitch-type climatic oscillations and formation of sediment undulations: evidence from a

shallow-shelf setting at Gela Basin on the Sicilian continental margin. *Quaternary Science Reviews*, 108, 76-94.

Lankford, R. R. (1977). Coastal lagoons of Mexico their origin and classification. In *Estuarine Processes: Circulation, Sediments, and Transfer of Material in the Estuary* (pp. 182-215).

Lavín, M. F., & Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics* (pp. 173-204). Springer, Dordrecht.

Lluch-Cota, D. B., Wooster, W. S., & Hare, S. R. (2001). Sea surface temperature variability in coastal areas of the northeastern Pacific related to the El Niño-Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2029-2032.

MacKenzie, B. R., & Schiedek, D. (2007). Long-term sea surface temperature baselines—time series, spatial covariation and implications for biological processes. *Journal of Marine Systems*, 68(3-4), 405-420.

Magaña Rueda, V. O., & Gay García, C. (2002). Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta ecológica*, (65).

Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica internacional*, 42(3), 313-330.

Marbà, N., Jordà, G., Agustí, S., Girard, C., & Duarte, C. M. (2015). Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Frontiers in Marine Science*, 2, 56.

Milankovitch, M. (1930). Mathematische klimalehre und astronomische theorie der klimaschwankungen. *Handbuch der Klimatologie* 1.

Montaño-Ley, Y., Peraza-Vizcarra, R., & Páez-Osuna, F. (2008). Tidal hydrodynamics and their implications for the dispersion of effluents in Mazatlán Harbor: an urbanized shallow coastal lagoon. *Water, air, and soil pollution*, 194(1-4), 343.

Mosquera-Vásquez, K. (2014). Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico. Instituto Geofísico del Perú. Boletín técnico Vol. 1.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group; (2014): MODIS-Aqua Ocean Color Data; NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. http://dx.doi.org/10.5067/AQUA/MODIS_OC.2014.0 Consultado en 2017-11-25.

NCAR. (2017). Atmospheric Reanalysis: Overview & Comparison Tables. Recuperado de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>. Consultado en 2017-11-27

NOAA. (2017a). SST Indices. Recuperado de: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices> Consultado en 2017-11-27.

NOAA. (2017b). Cold & Warm Episodes by Season. Recuperado de: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php Consultado en 2017-11-27.

NOAA. (2017c). MEI Index. Recuperado de: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html> Consultado en 2017-11-27.

NOAA. (2017d). Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures. Recuperado de: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst.php> Consultado en 2017-11-27.

NOAA: Pacific Marine Environmental Laboratory (2018a). What is El Niño? Recuperado de: <http://www.pmel.noaa.gov/elnino/what-is-el-nino>. Consultado en 2018-01-10.

NOAA: Pacific Marine Environmental Laboratory (2018b). What is La Niña?. Recuperado de: <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/what-is-la-nina> Consultado en: 2018-01-25.

NOAA: Pacific Marine Environmental Laboratory (2018c). Explaining El Niño: Schematic Diagrams. Recuperado de: <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/schematic-diagrams>. Consultado en: 2018-02-12.

Ochoa-Izaguirre, M. J., Carballo, J. L., & Páez-Osuna, F. (2002). Qualitative changes in macroalgal assemblages under two contrasting climatic conditions in a subtropical estuary. *Botanica Marina*, 45(2), 130-138.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2011). Guía de Prácticas Climatológicas. OMM-Nº 100. Ginebra.

Páez-Osuna, F., Sanchez-Cabeza, J. A., Ruiz-Fernández, A. C., Alonso-Rodríguez, R., Piñón-Gimate, A., Cardoso-Mohedano, J. G., Flores-Verdugo, F.J., Carballo, J.L., Cisneros-Mata, M.A. & Álvarez-Borrego, S. (2016). Environmental status of the Gulf of California: A review of responses to climate change and climate variability. *Earth-Science Reviews*, 162, 253-268.

Pizarro, O. (2016). Ondas Atrapadas: Una autopista que une el océano Pacífico ecuatorial con las costas de Perú y Chile. . Instituto Geofísico del Perú. Boletín técnico Vol. 3.

Pörtner, H.-O., D.M. Karl, P.W. Boyd, W.W.L. Cheung, S.E. Lluch-Cota, Y. Nojiri, D.N. Schmidt, and P.O. Zavialov, 2014: Ocean systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 411-484.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.

Sánchez-Cabeza J.A., Álvarez Sánchez L.F., Cardoso-Mohedano J.G., Escalante Mancera E., Díaz-Asencio M., López-Rosas H., Machain-Castillo M.L., Merino-Ibarra M., Ruiz-Fernández A.C., Alonso-Rodríguez R., Gómez-Ponce M.A., Ávila-Torres E., Serguei Rico-Esenaro S.,

Gómez-Realí M. A., Herrera-Becerril C.A., Grutter M. A low-cost long-term model of coastal observatories of global change (En Revisión).

Sheinbaum, J. (2003). Current theories on El Niño-southern oscillation: a review. *Geofísica internacional*, 42(3), 291-305.

SMN. (2018). ENOS: ¿Qué es “El Niño”? Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/enos>. Consultado en 2018-02-12.

Soloviev, A. & Lukas, R. (2014). *The Near-Surface Layer of the Ocean: Structure, Dynamics and Applications*. 2nd ed. Springer Netherlands.

Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(8), 614-621.

Stewart, R. (2008). Equatorial Processes. In *Introduction to Physical Oceanography*.

Stocker, T.F., Qin, G.-K., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V., Bex, P.M., Midgley, P. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Stramma, L., Johnson, G. C., Firing, E., & Schmidtko, S. (2010). Eastern Pacific oxygen minimum zones: Supply paths and multidecadal changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C9).

Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777.

Trenberth, Kevin & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2016). *The Climate Data Guide: Niño SST Indices (Niño 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)*. Recuperado de: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>. Consultado en 2017-11-27.

Trewin, B. C. (2007). Función de las normales climatológicas en un clima cambiante. *National Climate Centre. Australian Bureau of Meteorology. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra*.

Turi, G., Alexander, M., Lovenduski, N. S., Capotondi, A., Scott, J., Stock, C., Dunne, J., John, J. & Jacox, M. (2018). Response of O₂ and pH to ENSO in the California Current System in a high-resolution global climate model. *Ocean Science*, 14(1), 69.

Vincent, L.A., T.C. Peterson, V.R. Barros, M.B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L.M. Alves, T. Ambrizzi, M.A. Berlato, A.M. Grimm, J.A. Marengo, L. Molion, D.F. Moncunill, E. Rebello, Y.M. Anunciação, J. Quintana, J.L. Santos, J. Baez, G. Coronel, J. Garcia, I. Trebejo, M. Bidegain, M.R. Haylock, and D. Karoly. (2005). Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960–2000. *J. Climate*, 18, 5011–5023, <https://doi.org/10.1175/JCLI3589.1>.

Vitousek, P. M. (1994). Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 75(7), 1861-1876.

World Meteorological Organization (WMO). (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Geneva 2, Switzerland.

Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito, and A. Sallenger, (2014). Coastal systems and low-lying areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 361-409.