

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS  
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS  
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



**ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA VARIACIÓN A LARGO PLAZO  
DEL NIVEL DEL MAR EN EL AREA COSTERA  
DE LA PROVINCIA DEL CHUBUT**

**Marzo, 2015**

**Informe LHA- 350-01-15**

**LABORATORIO DE HIDRAULICA**

# **ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA VARIACIÓN A LARGO PLAZO DEL NIVEL DEL MAR EN EL AREA COSTERA DE LA PROVINCIA DEL CHUBUT**

## **RESUMEN**

Se presenta una evaluación preliminar de la variación del nivel del mar por efecto del cambio climático en la costa atlántica de la provincia del Chubut, sobre la base de algunas bases de datos generadas a partir de datos altimétricos satelitales. Se presenta una breve síntesis del marco de situación general, el estado actual del conocimiento y de la proyección futura.

## **PALABRAS CLAVE**

Cambio climático – Nivel del mar - Chubut

Informe	LHA-350-01-15
Fecha	Marzo, 2015
PROYECTO	1301
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Infraestructura

# **INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA**

**Presidente**

Dr. Raúl A. LOPARDO

**Vicepresidente**

Ing. Oscar N. BRONZINA

**Gerente de Programas y Proyectos**      Ing. Jorge A. MAZA

## **Laboratorio de Hidráulica**

**Director**

Ing. Julio De LIO

**Jefe del Programa de Hidráulica Marítima**      Ing. Roberto D. CASTELLANO

### **Informe Producido por**

Ing. Roberto D. CASTELLANO

### **EQUIPO DE TRABAJO**

Ing. Nicolás Tomazin

Lic. Carlos Haspert

Arq. Sebastián Peralta

## **TABLA DE CONTENIDOS**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCES</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>MARCO GENERAL</b> .....	<b>5</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>5</b>
<b>4.2</b>	<b>TENDENCIAS GLOBALES DEL CAMBIO CLIMATICO</b> .....	<b>6</b>
<b>4.3</b>	<b>EL NIVEL DEL MAR ENTRE 1870 Y 2004</b> .....	<b>8</b>
<b>4.4</b>	<b>TENDENCIAS REGIONALES</b> .....	<b>11</b>
4.4.1	Algunas anomalías climáticas en gran escala.....	11
4.4.2	Fusión de los casquetes polares .....	16
<b>5</b>	<b>EVALUACION DE LAS TENDENCIAS LOCALES</b> .....	<b>18</b>
5.1.1	Variación del Nivel del mar.....	19
5.1.2	Oleaje.....	27
5.1.3	Régimen de vientos .....	28
5.1.4	Temperatura.....	36
<b>6</b>	<b>PROYECCION FUTURA</b> .....	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>Escala Global</b> .....	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>Escala local</b> .....	<b>44</b>
6.2.1	Nivel medio del mar .....	44
6.2.2	Oleaje.....	45
<b>7</b>	<b>EFFECTOS SOBRE LA COSTA DEL CHUBUT Y ESTRATEGIAS</b> .....	<b>47</b>
<b>7.1</b>	<b>Efectos previsibles en las costas</b> .....	<b>48</b>
<b>7.2</b>	<b>Efectos previsibles sobre obras marítimas</b> .....	<b>48</b>
<b>7.3</b>	<b>Estrategias de adaptación</b> .....	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>54</b>

# **ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA VARIACIÓN A LARGO PLAZO DEL NIVEL DEL MAR EN EL AREA COSTERA DE LA PROVINCIA DEL CHUBUT**

**Marzo, 2015**

## **1 INTRODUCCION**

El cambio climático global es, desde hace décadas, motivo de investigación por numerosos grupos de la comunidad científica internacional. Ello ha sido motivado tanto por la alteración observada en el sistema climático y el ambiente, como por la necesidad de establecer tendencias a futuro de esas variaciones, de estimar las potenciales consecuencias socio-económicas de ello derivadas, y de formular medidas de mitigación adecuadamente fundamentadas.

A pesar de esos esfuerzos, las causas y efectos de esos cambios no se conocen en profundidad debido a la enorme complejidad de los procesos, a la gran cantidad de variables involucradas y a la escala temporal y espacial en que se desarrollan.

Los impactos del cambio climático sobre el ambiente son muchos y muy diversos. Puede mencionarse la afectación a las masas oceánicas (nivel del mar, salinidad temperatura, corrientes, etc.), a la criósfera (las masas de hielo polares tanto terrestres como flotantes y los glaciares), al régimen climático (régimen de vientos, de lluvias, temperatura atmosférica, etc.), a los ecosistemas en general (biósfera) y en particular a las áreas costeras, donde se concentra un porcentaje significativo de la población mundial.

Como se ha indicado, el nivel medio del mar es una de las variables afectadas. Numerosas investigaciones muestran que, a escala global, el nivel medio del mar se ha incrementado particularmente en las últimas décadas.

En particular la provincia del Chubut, entre los paralelos 42 y 46 de latitud S con un frente atlántico de unos 1.300 Km de desarrollo y una población que supera los 500.000 habitantes (2010), la mayoría de

los cuales se han localizado en la zona marítima del este y en los valles cordilleranos del oeste, donde el clima es más benigno.

Así, el ascenso del nivel del mar como así también la modificación de otras variables climáticas y ambientales pueden tener a largo plazo un impacto socio-económico muy importante.

La implementación de medidas de mitigación son costosas y de largo plazo y requieren estar fundamentadas en un análisis exhaustivo de los numerosos procesos físicos abarcados, y en una estimación confiable de su evolución a largo plazo.

La tarea encomendada se realiza mediante Acta Complementaria N° 13 al Convenio Marco suscripto en 2002 y renovado en 2007 y 2013.

## **2 OBJETIVOS Y ALCANCES**

El propósito de este estudio es realizar un primer análisis de la variación del nivel medio del mar en la región costera de la Provincia del Chubut debido al cambio climático, una descripción general del marco de referencia relativo al cambio climático, las fuentes de información disponibles, las tendencias y magnitud estimadas del cambio en el mediano o largo plazo, y especialmente delinear un plan de acción a futuro para abordar la problemática.

### **3 METODOLOGIA**

La evaluación realizada se basó en la búsqueda, revisión y análisis de algunos de los numerosos estudios que a nivel global se desarrollan en esta temática como así también en la consulta de bases de datos de suficiente extensión temporal relativas a variables climáticas, oceanográficas y particularmente al nivel medio del mar, específicamente para el área costera de la Provincia.

Sobre la base indicada se elaboró el presente Informe Final conteniendo una descripción de las fuentes de información consultadas, las bases de datos analizadas, y las conclusiones y recomendaciones generales que permitan encarar etapas posteriores, y orientar futuros estudios.

## **4 MARCO GENERAL**

### **4.1 INTRODUCCION**

El cambio del nivel del mar es un aspecto relevante del cambio climático e implica potencialmente significativos impactos para nuestra moderna sociedad costera (Church, J.A et al. 2011).

Como consecuencia de ello hay una enorme demanda de la proyección futura del cambio de nivel del mar, particularmente a nivel local y regional. Dada esta fuerte demanda, resulta natural que la evaluación de esas proyecciones para el siglo XXI, con las incertezas propias del actual conocimiento del problema, pueda resultar en una cuestión de muy difícil interpretación.

En consecuencia las proyecciones deben ser realizadas con extrema prudencia y ser descriptas sobre bases científicas sólidas, y las incertezas evaluadas con el mayor cuidado de manera de permitir reducirlas al mínimo posible.

El cambio del nivel del mar es esencialmente una ciencia interdisciplinaria. Además de las observaciones del nivel del mar en múltiples escalas de tiempo, es esencial considerar otros aspectos interrelacionados: cambios en el océano, la criósfera, la tierra, el almacenamiento terrestre de agua, hasta aspectos geológicos y etc.

Para formular proyecciones que cubran un amplio rango de posibilidades, también es necesario considerar las futuras emisiones de gases invernadero y sus concentraciones, ya sean de origen natural o antropogénico, la sensibilidad del sistema climático a esas emisiones y los cambios atmosféricos resultantes.

En particular, la confiabilidad en las proyecciones del cambio del nivel del mar depende fuertemente de una mejor comprensión de todo el conjunto de aspectos que constituyen la base del problema, de la prueba rigurosa de modelos que describen cada uno los aspectos del sistema climático que contribuye al cambio de nivel del mar, y de la compleja tarea de combinar estos términos.

## 4.2 TENDENCIAS GLOBALES DEL CAMBIO CLIMATICO

El presente informe se ha basado en gran medida en los reportes periódicos del *Intergovernmental Panel on Climate Change*, (IPCC; [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)). El mismo fue establecido en 1988 bajo el auspicio de las Naciones Unidas, la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (United Nations Environment Programme (UNEP)

El IPCC produce reportes que dan respaldo al Convenio Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC), que es el principal tratado internacional sobre cambio climático, y cuyo objetivo final es el de estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que evite la peligrosa interferencia antropogénica con el sistema climático.

El IPCC no lleva a cabo sus propias investigaciones ni monitorea el clima global, sino que basa sus publicaciones en la evaluación crítica de literatura científica publicada.

El objetivo del IPCC es evaluar la información científica más relevante en relación al cambio climático inducido por el hombre, a los impactos del cambio climático de origen antropogénico y las opciones para adaptación o mitigación.

El IPCC ha publicado 5 reportes de evaluación (1990, 1995, 2001, 2007 y 2013) conteniendo una revisión de los últimos avances en la ciencia del clima, así como también un número de reportes especiales sobre temas específicos.

Cada informe se compone de la tarea de distintos grupos de trabajo, siendo el Grupo de Trabajo I (Working Group 1) el que cubre los aspectos científicos del cambio climático.

El Grupo de Trabajo II evalúa los impactos y estrategias de adaptación y vulnerabilidad relacionados con el cambio climático. El Grupo III desarrolla las estrategias de mitigación.

En el Reporte 5 (AR5) el WG1 ha considerado nueva evidencia del cambio climático, basada en el análisis de numerosos estudios científicos independientes derivados de la observación del sistema

climático, de registros del paleoclima, de estudios teóricos de los procesos climáticos y de la simulación utilizando modelos climáticos numéricos, incorporando así nuevos hallazgos e investigaciones respecto del Reporte previo de 2007 (IPCC, Working Group I, 2013).

Las observaciones del sistema climático se basan en mediciones directas y en observaciones remotas mediante adecuados sensores instalados en satélites. Aunque algunas mediciones a escala global comenzaron a mediados del siglo XIX (presión atmosférica, temperatura, vientos y otras variables), a partir de 1950 se dispone de conjuntos de registros observacionales considerablemente más amplio. Algunos registros han podido ser extendidos hacia el pasado en varios miles o millones de años mediante reconstrucciones paleoclimáticas.

Todo el conjunto de esta información provee de una amplia visión de la variabilidad a largo plazo en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre. A ello se suma el aporte de simulaciones numéricas globales apoyadas en los registros existentes y dirigidas a realizar una proyección a futuro de la evolución del sistema climático y otras variables asociadas.

Las principales conclusiones incorporadas en AR5 (2013) son:

- El calentamiento del sistema climático y los océanos es inequívoco. Muchos de los impactos asociados (como el nivel del mar) han ocurrido a tasas sin precedentes a partir de 1950. La atmósfera y los océanos se han calentado, la cantidad de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar ha aumentado y la concentración de gases invernadero se ha incrementado.
- A escala global, el calentamiento de los océanos es máximo en la superficie, habiéndose calentado la capa superficial de 75 m  $0,11^{\circ}\text{C}$  por década en el período de 40 años comprendido entre 1971 y 2010.
- En las últimas dos décadas las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida han perdido masa, los glaciares se han reducido en casi todo el mundo, y el hielo ártico flotante se ha reducido.
- La tasa de incremento de nivel del mar desde mediados del siglo XIX ha sido mayor que la tasa promedio durante los dos milenios previos. Entre 1901 y 2010 el nivel medio del mar se incrementó en 0,19 m.

- Es muy probable que la tasa media de incremento del nivel del mar fuera de 1,7 mm/año entre 1901 y 2010, de 2,0 mm entre 1971 y 2010 y de 3,2 mm/año entre 1993 y 2010. Es posible que también hubiera tasas altas entre 1920 y 1950.
- Desde principios de 1970 la pérdida de masa de glaciares y la expansión termal dan cuenta de aproximadamente el 75% de incremento del nivel del mar observado. En el período 1993 a 2010 el incremento de nivel de mar global es consistente con la suma de las contribuciones observadas de expansión termal del océano, cambios en los glaciares, fusión de los hielos polares y pérdida de agua terrestre almacenada.
- La concentración en la atmosfera de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) se han incrementado a niveles sin precedentes desde hace 800.000 años. El dióxido de carbono se ha incrementado desde la época pre-industrial (1750) debido primariamente a emisiones originadas en combustibles fósiles y debido a la modificación del uso de la tierra (deforestación, etc.).
- En 2011 las concentraciones de esos gases invernadero eran de 391 ppm, 1803 ppm y 324 ppm respectivamente, representando ello un incremento de 40%, 150% y 20% en cada uno respectivamente.
- Los océanos han absorbido alrededor del 30% del  $\text{CO}_2$  de origen antropogénico, causando acidificación de las aguas.
- Hay una clara influencia de la actividad humana sobre el clima.
- Es muy probable que la actividad humana ha sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de 1950.

### **4.3 EL NIVEL DEL MAR ENTRE 1870 Y 2004**

Los altímetros a bordo de los satélites TOPEX/Poseidón (T/P) y Jason-1 han producido datos de alta calidad del nivel del mar en casi todo el planeta (desde latitud  $66^\circ$  S a  $66^\circ$  N) desde 1993. La correlación espacial de este conjunto de datos, expresada como funciones ortogonales empíricas (Empirical

Orthogonal (Eigen) Functions, EOFs), conjuntamente con datos de mareógrafos (más extendidos en el tiempo pero con mucha menor resolución espacial) ha sido usada para producir estimaciones de la variación del nivel del mar global y reconstruir así el historial de la variación global del nivel del mar. (Church, J.A. et al 2006)

Desde el comienzo de la reconstrucción (enero 1870) hasta el final de la serie de valores altimétricos satelitales analizada (diciembre 2001, **Figura 1**), el período es de 135 años, y los resultados indican que el aumento de nivel medio global del mar (Global Mean Sea Level, GMSL) ha sido de 195 mm, es decir un promedio de 1,44 mm/año. Para el siglo XX el aumento es de 160 mm y el ajuste lineal (cuadrados mínimos) es de  $1,7 \pm 0,3$  mm/año. Desde 1950 al 2000 el ajuste arroja como resultado una tasa de 1,75 mm/año.

Si se ajusta con una función cuadrática la serie GMSL, resulta una aceleración de  $0,013 \pm 0,006$  mm/año<sup>2</sup> entre 1870 y 2001. La diferencia (o error) entre el ajuste cuadrático y la serie original tiene un valor medio cuadrático (RMS) de 7,5 mm

Otra aproximación para el análisis se apoya en el marcado cambio de pendiente registrado en la década de 1930, y consiste en realizar una regresión lineal para cada uno de los períodos: 1870-1935 y 1936-2001. Las pendientes resultantes son  $0,71 \pm 0,40$  mm/año y  $1,84 \pm 0,19$  mm/año para cada uno de los períodos indicados respectivamente, implicando ello una significativa aceleración de  $0,017 \pm 0,007$  mm/año<sup>2</sup> en el segundo período analizado.

La **Figura 1(a)** muestra los valores medios globales mensuales del nivel del mar (curva inferior), los valores medios globales anuales, (con un ajuste cuadrático superpuesto, curva central) y los valores medios anuales con los datos altimétricos satelitales (curva superior). Las tres curvas han sido separadas entre sí mediante un corrimiento de 150 mm (para mejor visualización).

Alrededor de los valores medios se ha indicado los valores de uno y dos desvíos standard:  $\pm \sigma$  (gris oscuro) y  $\pm 2\sigma$  (gris claro).

En la **Figura 1 (b)** se indica el apartamiento de los datos desde el ajuste cuadrático.

En la **Figura 1 (c)** los promedios móviles en períodos de 10 años. El valor de cada promedio ha sido asignado al centro del período.

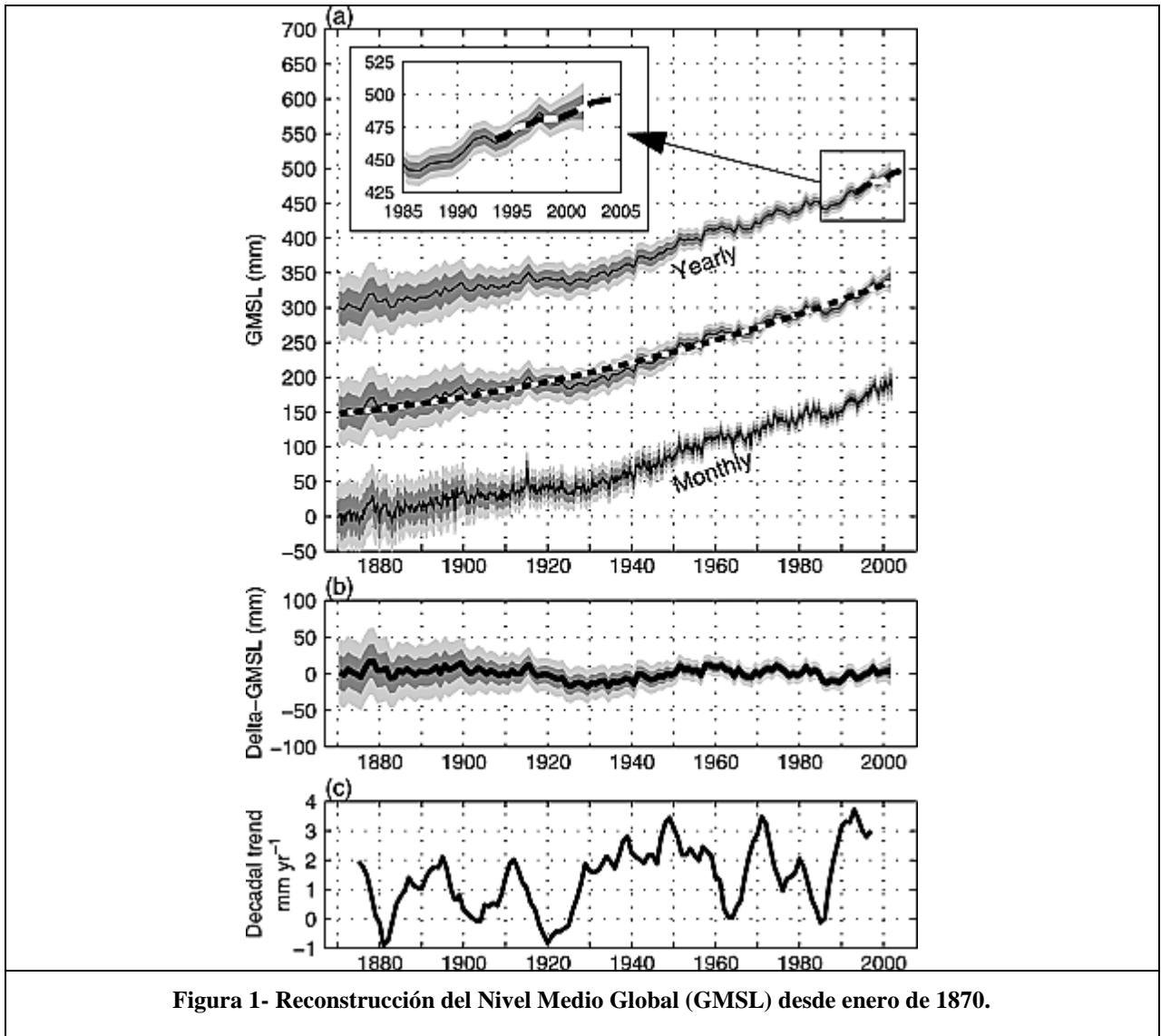


Figura 1- Reconstrucción del Nivel Medio Global (GMSL) desde enero de 1870.

Puede advertirse que desde comienzos del siglo XX al presente, el incremento del nivel medio global del mar resulta próximo a los 200 mm.

Puede notarse que según esta reconstrucción la tasa de modificación ha sufrido de importantes variaciones, desde -1 mm/año hasta + 3 mm/año, según se advierte en la **Figura 1(c)**.

#### 4.4 TENDENCIAS REGIONALES

El Calentamiento Global no genera el mismo incremento del nivel del mar en todas partes. En cambio hay más bien variaciones espaciales superpuestas a una tendencia media global. Estas variaciones son inducidas por procesos dinámicos, originados en la circulación y en las variaciones de la temperatura y/o salinidad de las masas oceánicas, y en procesos de equilibrio estáticos, originados en los cambios en el campo gravitatorio debidos a redistribución de la masa terrestre, y la rotación y forma de la tierra.

Algunos de esos procesos que contribuyen a las variaciones espaciales y temporales del nivel del mar se describen a continuación.

##### 4.4.1 Algunas anomalías climáticas en gran escala

Un *modo de variabilidad* climático es un patrón con características identificables, efectos específicos regionales y que presenta generalmente un comportamiento oscilatorio. Muchos de esos *modos de variabilidad* son utilizados por los científicos como índices para representar el estado general del sistema climático de una región afectada por un determinado patrón climático.

Algunas de estas variaciones cíclicas del clima en determinadas regiones del planeta tienen efectos importantes sobre el sistema climático en gran escala y se superponen a tendencias a largo plazo, enmascarando eventualmente efectos antropogénicos.

##### *El Niño*

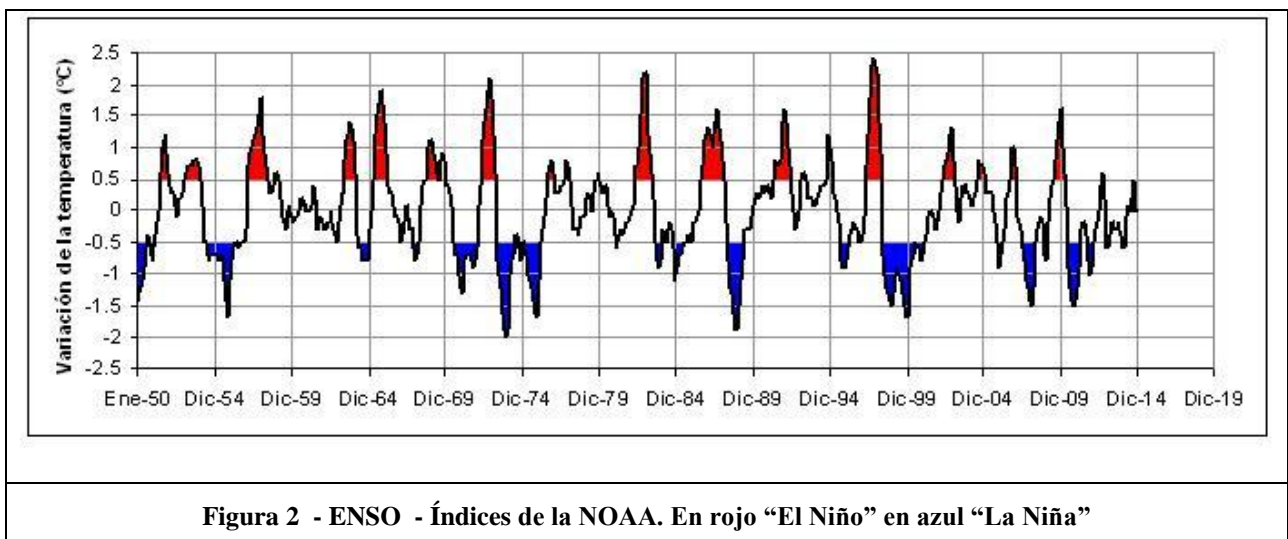
Tal es el caso de la oscilación El Niño, en el océano Pacífico (ENSO: El Niño South Oscillation), definida como un calentamiento prolongado de la temperatura superficial del Océano Pacífico con respecto a sus valores medios. La NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)) lo define como un calentamiento de al menos 0.5°C en la temperatura media de un trimestre en un área específica

del Pacífico Este y Central tropical; otras organizaciones lo definen de manera levemente diferente. (Figura 2)

Esta anomalía ocurre típicamente con intervalos de 2 a 7 años y dura entre 9 meses y dos años. En correspondencia con El Niño, la presión atmosférica en Tahití y el resto del Pacífico Central y Oriental disminuye. Se favorece la evaporación en la costa sudamericana (Perú) y se incrementa la precipitación pluvial. La modificación de las corrientes frías de Humboldt (rica en nutrientes) inducida por El Niño, pueden causar serios efectos negativos sobre la biósfera y en particular los recursos pesqueros.

La Niña describe un evento opuesto, es decir masas de agua oceánica cálidas ubicadas en el Pacífico Oeste, y con efectos opuestos.

Como resulta claro, esta anomalía tiene importantes efectos económicos en América del Sur, influenciando la pesca y la agricultura. También pueden rastrearse sus efectos en África, Europa y América del Norte, lo que proporciona una buena idea sobre la afectación al sistema climático global de estas anomalías regionales.



### *Oscilación Decadal del Pacífico (Pacific Decadal Oscillation, PDO)*

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) es una variación del clima del océano Pacífico semejante a la oscilación El Niño (ENSO), aunque con un comportamiento en el tiempo muy distinto. Puede consultarse <http://jisao.washington.edu/pdo/>. Mientras que los eventos El Niño persisten por 6 a 18 meses, los eventos PDO pueden persistir 20 a 30 años. Sus efectos son más notables en el Pacífico Noreste.

Algunas investigaciones coinciden en identificar dos ciclos completos PDO en el siglo XX: un ciclo PDO “frío” prevaleció entre 1890 y 1924 y nuevamente entre 1947 y 1976, mientras que el ciclo “cálido” prevaleció entre 1925 y 1946 y desde 1977 a por lo menos mediados de los 90.

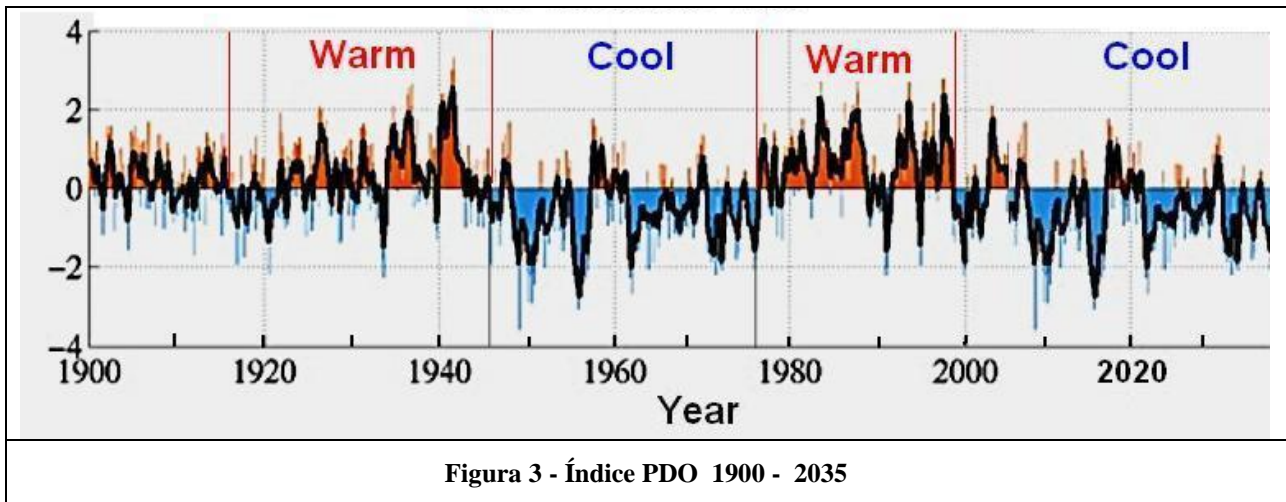
Estos ciclos han sido correlacionados con sustanciales cambios en el ecosistema del Pacífico NE.

Las causas de PDO no se conocen en la actualidad, y por lo tanto la potencial predictibilidad de esta oscilación climática no es posible y, aunque algunos modelos climáticos producen oscilaciones de ese tipo, a menudo sus causas son diferentes. La comprensión de los mecanismos que dan origen a PDO determinará eventualmente si las predicciones a largo plazo son posibles.

Desde el punto de socio-económico el reconocimiento de PDO es importante porque muestra que las condiciones de clima “normales” pueden mostrar patrones cíclicos de variación en escala de tiempo de la vida humana, con significativa influencia sobre actividades económicas (pesca, agricultura).

Teniendo en cuenta la variabilidad reflejada por PDO, algunos científicos tienen visiones diferentes sobre las tendencias de evolución del sistema climático predichas por el IPCC (Eastbrooke, D.J., 2008).

La circunstancia de que la PDO ha pasado en la actualidad de su ciclo “cálido” al “frío” (**Figura 3**) resulta consistente con el historial de cambios del clima y PDO observados en el pasado, y no es una singularidad que se superpone y enmascara el severo calentamiento global predicho por IPCC. Esto tiene significativas implicancias a futuro e indica que (a juicio de algunos investigadores) los modelos climáticos presentados por IPCC están equivocados en la predicción de un incremento de 1 °F por década para el resto del siglo XXI.



Como puede observarse en la **Figura 3**, a partir de 1980 y hasta aproximadamente 2005/2010 se ha desarrollado un ciclo “cálido”. Puede esperarse que a partir de 2010/2020 prevalezca un ciclo “frío”. Esta situación puede tener importantes consecuencias sobre el clima global y las tendencias a futuro predichas.

#### *Oscilación del Atlántico (AMO: Atlantic Multidecadal Oscillation)*

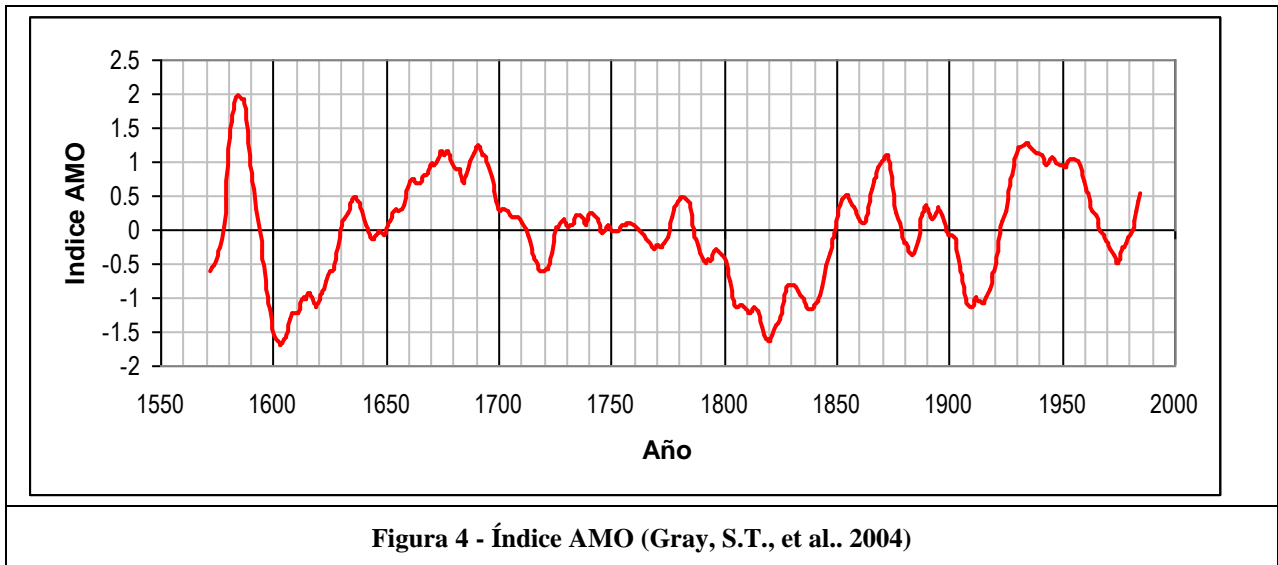
La Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO: Atlantic Multidecadal Oscillation) es un modo de variabilidad que ocurre en el Atlántico Norte y se manifiesta primordialmente en la temperatura superficial del mar. Aunque este modo es respaldado en parte por modelos matemáticos, y observaciones históricas, hay controversia respecto de su amplitud y en particular con respecto a su origen antropogénico.

El índice AMO se determina a partir de las anomalías de la temperatura superficial del mar (SST, Sea Surface Temperature), y es el promedio móvil decadal de los valores medios de SST.

El Índice AMO se correlaciona con la temperatura del aire, precipitación en gran parte del hemisferio norte, incluyendo Norteamérica, Europa, África del norte y el noreste de Brasil. Se lo relaciona con la frecuencia de ocurrencia de huracanes severos y sequías en America del Norte.

Aunque hay solo 130 a 150 años de registros (lo cual resulta escaso para un análisis estadístico) algunas reconstrucciones (Gray, S.T., et al. 2004) para períodos prolongados muestran que el mayor período del ciclo es del orden de 10 a 20 años (**Figura 4**). Puede advertirse que a partir de 1980 la tendencia del

índice se invierte. Pero Suponiendo que AMO continúa con su patrón cíclico, el pico de la actual fase “cálida” podría esperarse para 2020.



#### *Antartic Osillation AAO*

Esta oscilación climática refleja la variabilidad en la distribución de vientos en torno del casquete antártico. En su fase positiva los vientos del Oeste se contraen hacia la Antártida, mientras que en la fase negativa este cinturón de vientos se mueve hacia el ecuador. Algunos investigadores sugieren que la oscilación se encuentra en una fase positiva extrema en por lo menos 1.000 años, y que esta tendencia positiva es atribuible al nivel de concentración de gases invernadero, y a la reducción de la capa de ozono.

#### *Artic Oscillation AO*

Esta oscilación refleja la variación periódica de la presión atmosférica. El grado en el cual el aire ártico penetra en latitudes medias está cuantificado por el índice AO, que está definido por patrones de presión atmosférica en superficie. Cuando el índice AO es positivo la presión atmosférica de superficie es baja en la región polar Norte. Esto permite que las corrientes de chorro (*jet streams*) sean fuertes y constantes de Oeste a Este, manteniendo el aire frío ártico encerrado en la región polar norte.

Cuando AO es negativo la tendencia es de haber presión atmosférica alta en el polo norte, corrientes de vientos más débiles, y mayor movimiento de aire ártico hacia latitudes medias.

#### ***4.4.2 Fusión de los casquetes polares***

El término criósfera se refiere a la acumulación de nieve, el hielo en ríos y lagos, el hielo en océanos y continentes, glaciares, etc. y desempeña un papel primordial en el sistema climático.

Aunque numerosas investigaciones se realizan en el ártico, acá se presentan los resultados de algunos estudios llevados a cabo en el antártico, por considerarse que sus efectos sobre el área costera sudamericana, y en particular la Patagonia argentina podrían ser más evidentes.

Los mares antárticos subpolares constituyen una región de intensas y complejas interacciones entre la atmósfera, el océano y la criósfera, con una influencia sobre la totalidad del clima terrestre que no resulta proporcional a su extensión. La interacción entre la atmósfera y el océano resultan centrales para la estabilidad de la capa de hielo y el nivel del mar global, el volumen y extensión de la capa antártica de hielo flotante, el albedo terrestre, y la generación del agua antártica de fondo, que refrigera y oxigena muchas de las profundidades marinas en el planeta.

Los mares subpolares experimentan al presente un significativo incremento en el flujo de agua dulce por la fusión de la capa de hielo terrestre y flotante (Rye, C.D. et al, 2014). El hielo antártico terrestre está perdiendo masa por fusión generalizada, aunque ganando masa en áreas específicas por el incremento de nevadas. Otra parte de la pérdida de masa de hielo proviene de la fusión de hielos flotantes.

El exceso de agua dulce aportado a los océanos sub polares por la fusión de masa de hielo (terrestres y flotantes) se concentra particularmente en la Península Antártica y el mar de Amundsen. Se prevé que este ingreso de agua dulce provoque el incremento del nivel del mar en los océanos subpolares antárticos, a través de un efecto estérico (inducido por la densidad) y baristático (inducido por el aporte de masa).

Si la incorporación de agua dulce como la registrada particularmente en el mar de Ross es generalizada y si el incremento en flujo de agua dulce es la causa del incremento del nivel del mar, puede esperarse que

ese incremento sea especialmente pronunciado en los mares antárticos subpolares y que ocurra a una tasa acorde a ese flujo.

#### *Conclusiones al Capítulo 4*

Con lo expuesto precedentemente se ha querido mostrar la extrema complejidad del problema de caracterizar la variabilidad climática y las variables asociadas, la dificultad de separar las tendencias en un sentido de lo que constituyen las variaciones cíclicas de largo o mediano plazo, de identificar y cuantificar separadamente los mecanismos que responden a las causas naturales y a las antropogénicas, de evaluar la influencia en vastas regiones del planeta de fenómenos que ocurren en regiones oceánicas de extensión más limitada, de comprender sus causas y especialmente mostrar la dificultad de su pronosticabilidad y el consecuente cuidado que debe ponerse en la interpretación de resultados de simulaciones numéricas dirigidas a evaluar los efectos en el largo plazo por ejemplo.

## **5 EVALUACION DE LAS TENDENCIAS LOCALES**

De algunas de las variables más importantes utilizadas para evaluar los impactos del cambio climático se dispone de registros de observaciones limitados tanto en el espacio como en el tiempo. Estas limitaciones se pueden superar parcialmente mediante la utilización de bases de datos generadas mediante retroanálisis numérico. Tal el caso del análisis del nivel medio global del océano presentado en el **Capítulo 4**.

A continuación se presentan algunos datos disponibles de distintas fuentes de información pero referidas específicamente al frente oceánico de la provincia del Chubut.

La lista de variables analizadas no es necesariamente completa. Las técnicas utilizadas son simples, y en una etapa futura convendrá analizar la posibilidad de incorporar nuevas fuentes de información y la necesidad de utilizar técnicas de análisis más sofisticadas.

Para ello se seleccionaron algunas posiciones correspondientes a nodos de información donde se han generado datos mediante retroanálisis utilizando Eofs. Los nodos indicados como NCEP corresponden a la base de datos estructurada del proyecto NCEP/NCAR y brindan información de vientos y temperaturas de la superficie del mar. Los nodos indicados como OSTM (Ocean Surface Topography Mission) corresponden a la ubicaciones con información sobre el nivel medio del mar.

La ubicación de esos nodos se indica en la **Figura 5**.

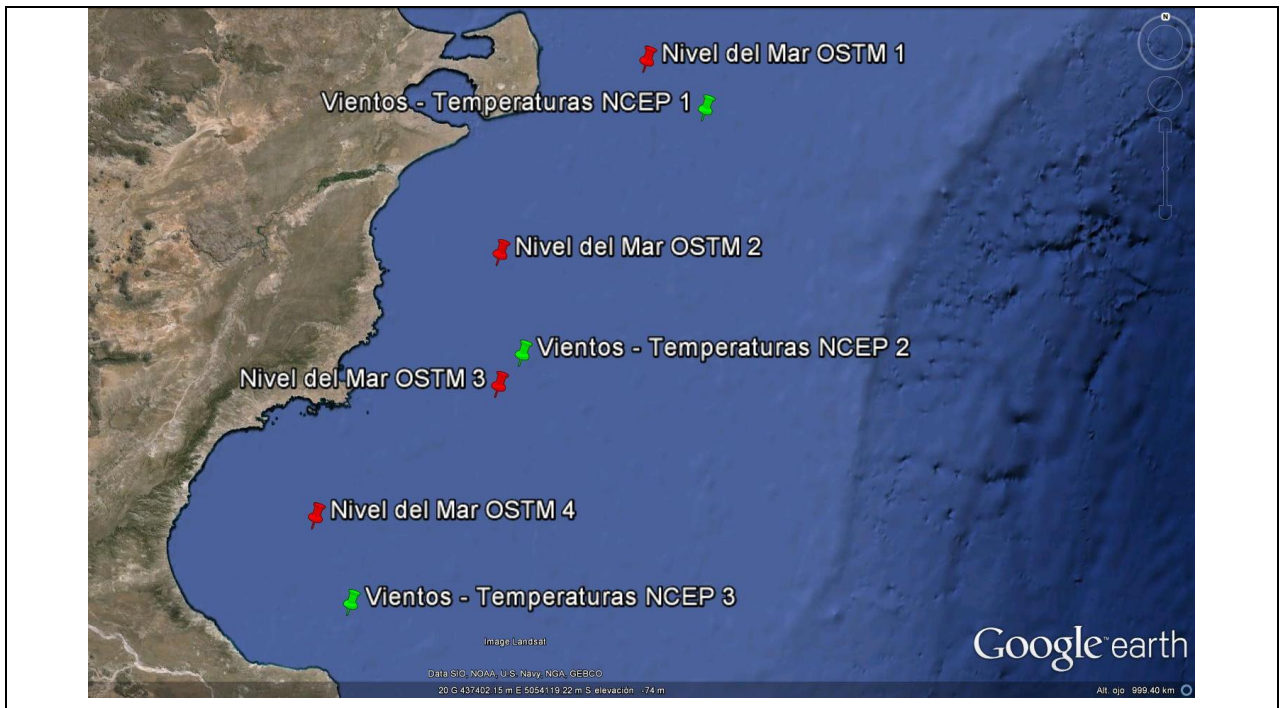


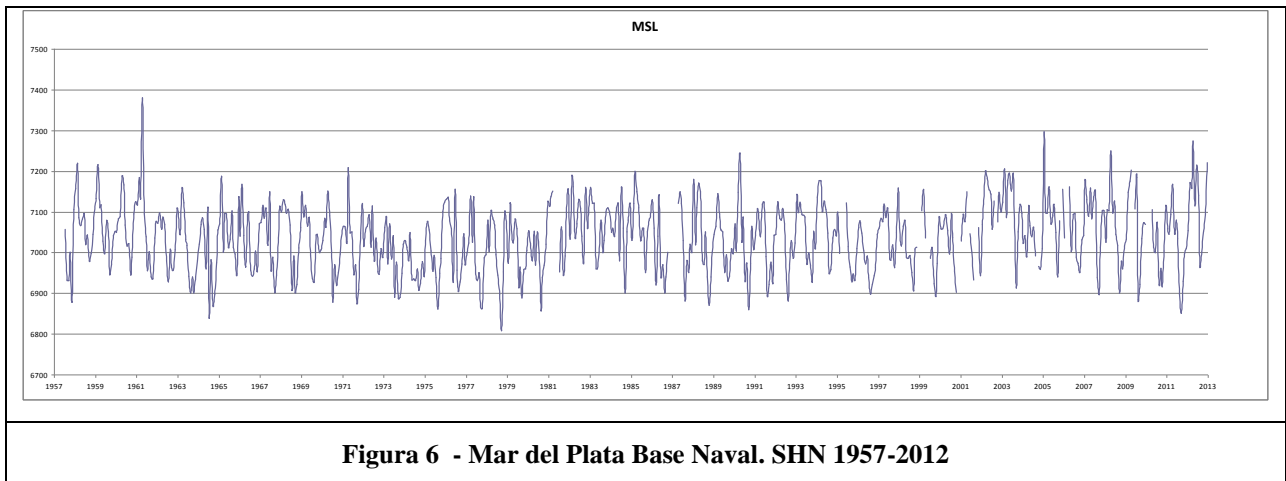
Figura 5 - Ubicación de nodos de bases de datos frente a las costas de la Provincia del Chubut

### 5.1.1 Variación del Nivel del mar

*Registros de marea en el puerto de Mar del Plata. Fuente SHN.*

Los datos utilizados fueron obtenidos en 2014 de una base de datos del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), (<http://www.psmsl.org/>). La estación corresponde a la Base Naval Mar del Plata (Estación N° 819) ubicada en la latitud 38.033S; 57.517W. La serie se compone de un dato cada 30 días. El período analizado es 1957-2012. La serie se halla completa en un 95%. La última actualización corresponde al 13 Junio 2013. Los datos han sido suministrados por el Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina.

Se escogió este registro por ser el más extenso disponible en la costa atlántica argentina. Abarca el período entre julio de 1957 y diciembre de 2012 y consiste en la serie de valores medios mensuales de nivel del mar. La **Figura 6** muestra el registro.



Los resultados presentados por PSMSL son valores calculados sin ninguna corrección por desplazamiento vertical de la tierra y no deben ser usados para planificación. El valor publicado por PSMSL para la tendencia de variación es de  $0,82 \pm 0,33$  mm/año.

Un ajuste lineal de esta señal da como resultado una variación de 0,58 mm/año entre 1957 y 2012 (54.5 años). Lo que implica un incremento de unos 32 mm en el período indicado.

El mismo ajuste, efectuado para el periodo 1977-2012 (35 años) produce como resultados una tasa de incremento de 1,2 mm/año, es decir que muestra un importante incremento en la tasa de variación del nivel medio del mar en los últimos años.

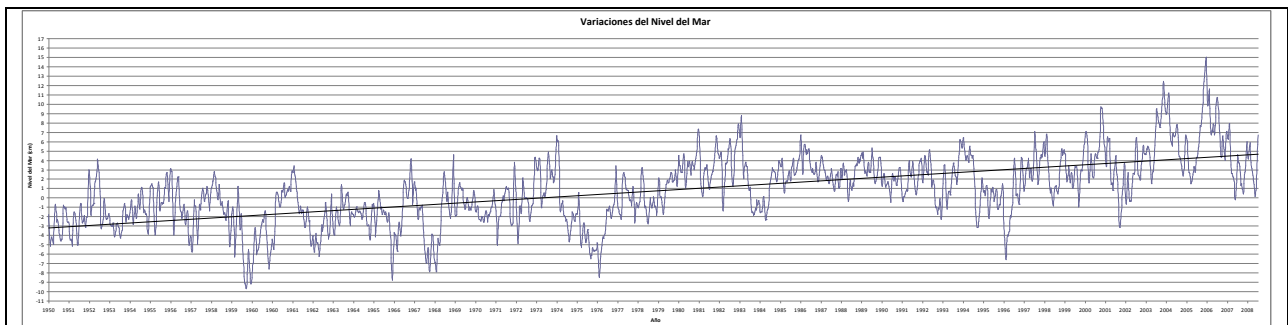
#### *Mar del Plata. Datos altimétricos satelitales*

La topografía de la superficie de los océanos es la altura de la superficie oceánica respecto del geode, siendo ésta una superficie definida como de geopotencial constante. La topografía de la superficie oceánica se mide utilizando altímetros en satélites:

- JASON 1
- OSTM - JASON 2
- SeaSAT
- TOPEX-POSEIDON
- GEOS-3

Se utilizaron datos reconstruidos del nivel del mar obtenidos del Jet Propulsion Laboratory. Physical Oceanography Distributed Active Center (PODAAC) y desarrollados Por la Universidad de Colorado. <http://podaac.jpl.nasa.gov/OceanSurfaceTopography>. (Hamlington B.D. et al, 2011)

La **Figura 7** presenta los datos correspondientes a la posición de coordenadas 38°S; 57° 30'W, próxima al Puerto de Mar del Plata.



**Figura 7 - Datos altimétricos satelitales Mar del Plata 38°S; 57° 30'W**

La serie se compone de un dato cada 7 días. El ajuste lineal del total de datos indica una variación (incremento) de 1,32 mm/año entre 3/1/1950 y 27/6/2009 (59,2 años), es decir el doble que los valores registrados por SHN.

#### *Otros datos satelitales*

Se utilizaron datos grillados de en algunas ubicaciones de la costa patagónica argentina. Las ubicaciones se muestran en la **Figura 8**. Los datos se obtuvieron de OSTM (Ocean Surface Topography Mission) <https://sealevel.jpl.nasa.gov>.

En la **Figura 9** se ha graficado la serie histórica de niveles para esas ubicaciones. En la **Tabla 1** se han indicado la variación total del nivel medio del mar entre el 1/1/1950 y el 31/12/2009, y la tasa de incremento anual resultante de un ajuste lineal de los datos.



Figura 8 - Ubicación de otros puntos de datos altimétricos satelitales

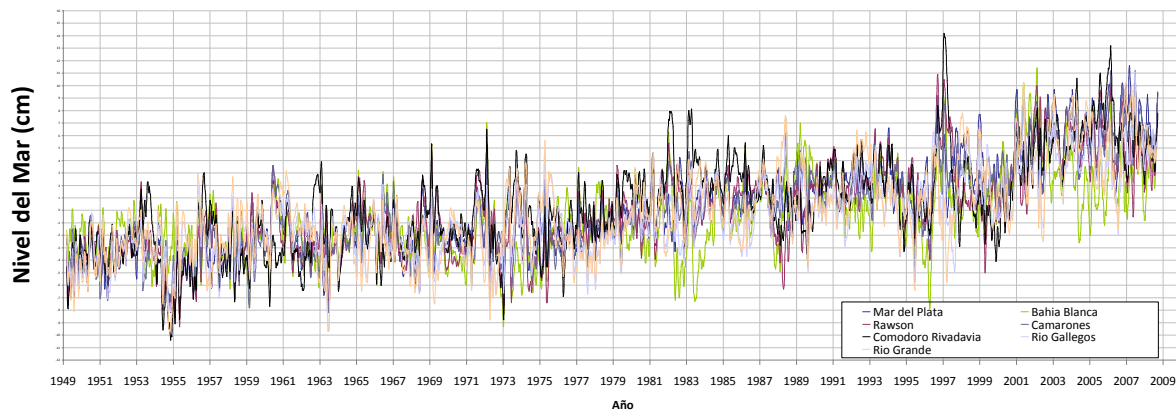


Figura 9 - Variación del nivel medio del mar en algunas ubicaciones de la costa argentina

En la **Tabla 1** se presenta una síntesis, indicando la variación total de nivel del mar en el período 1950-2009 y la tasa de variación media anual, para el conjunto de localidades ubicadas sobre el litoral atlántico argentino.

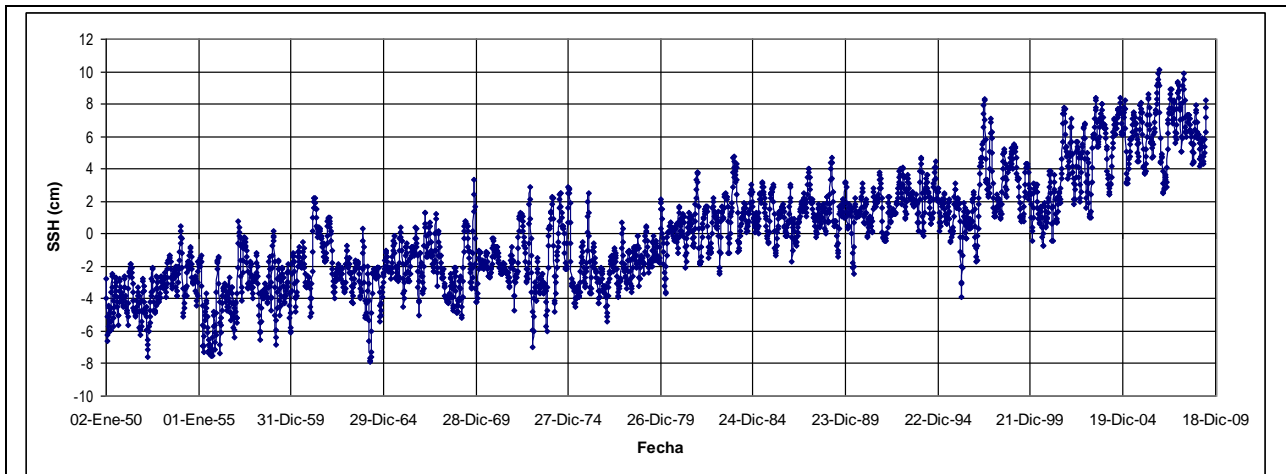
VARIACION (1950-2009)	MAR DEL TUYU	MAR DEL PLATA	BAHIA BLANCA	RAWSON	CAMARONES	COMODORO RIVADAVIA	RIO GALLEGOS	RIO GRANDE
$\Delta h$ (cm)=	9.35	10.86	6.56	9.15	10.21	9.52	7.84	8.67
mm/año	1.57	1.82	1.10	1.54	1.72	1.60	1.32	1.46

**Tabla 1 - Variación del nivel del mar en la costa argentina 1950-2009**

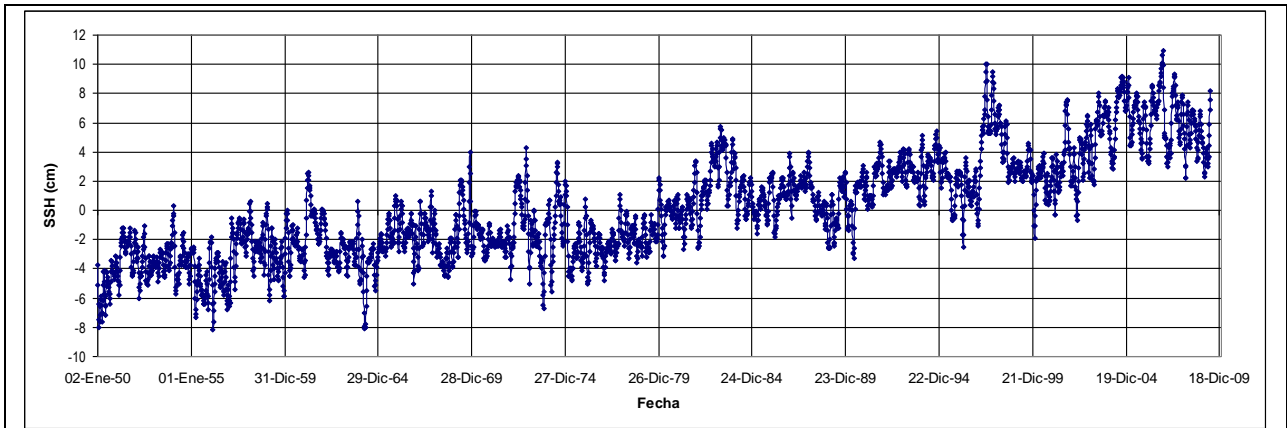
*Datos altimétricos satelitales frente a costa de Chubut*

Se determinaron valores de nivel del mar a partir de datos altimétricos satelitales en 4 nodos que se indican en la **Figura 5**. Los datos altimétricos son semanales.

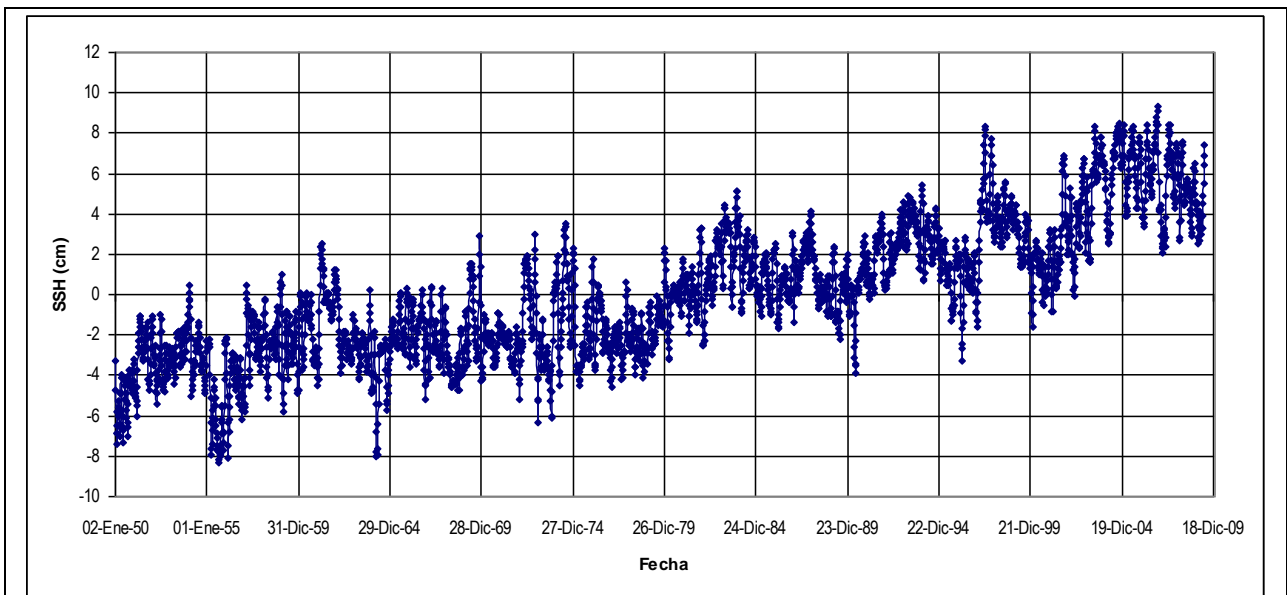
Las **Figuras 10 a 13** muestran la serie de datos (1 valor semanal, desde el 1/1/1950 al 31/12/2009)



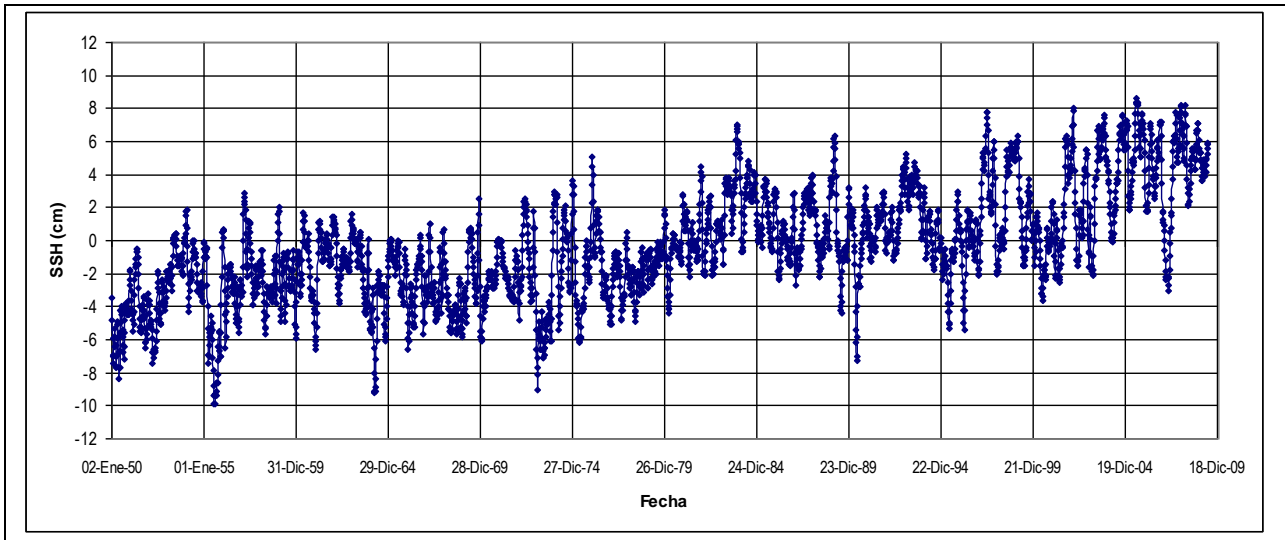
**Figura 10 - Nodo 1 – Historial del nivel del mar**



**Figura 11 - Nodo 2 Historial del nivel del mar**

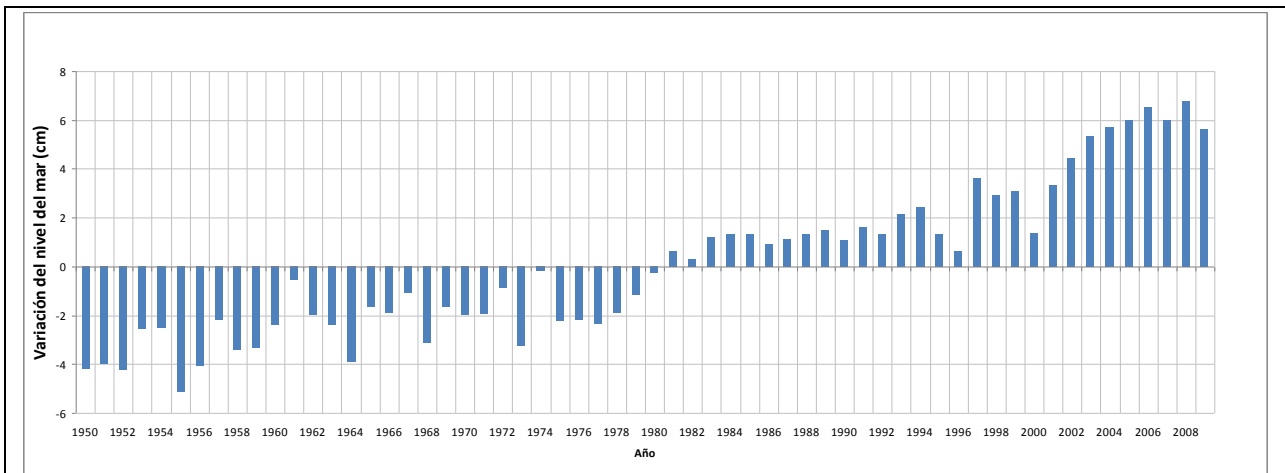


**Figura 12 - Nodo 3- Historial del nivel del mar**

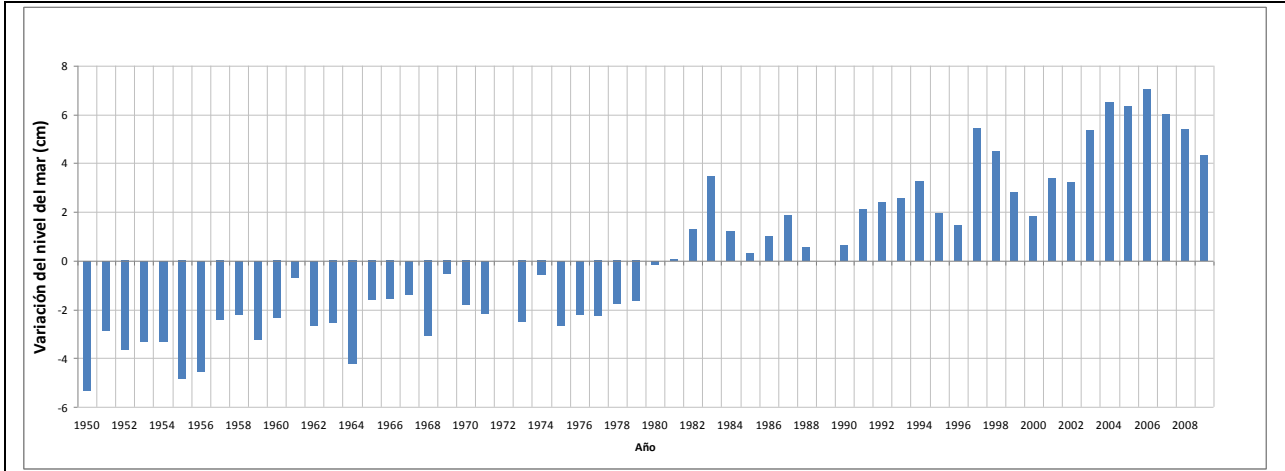


**Figura 13 - Nodo 4 – Historial del nivel del mar**

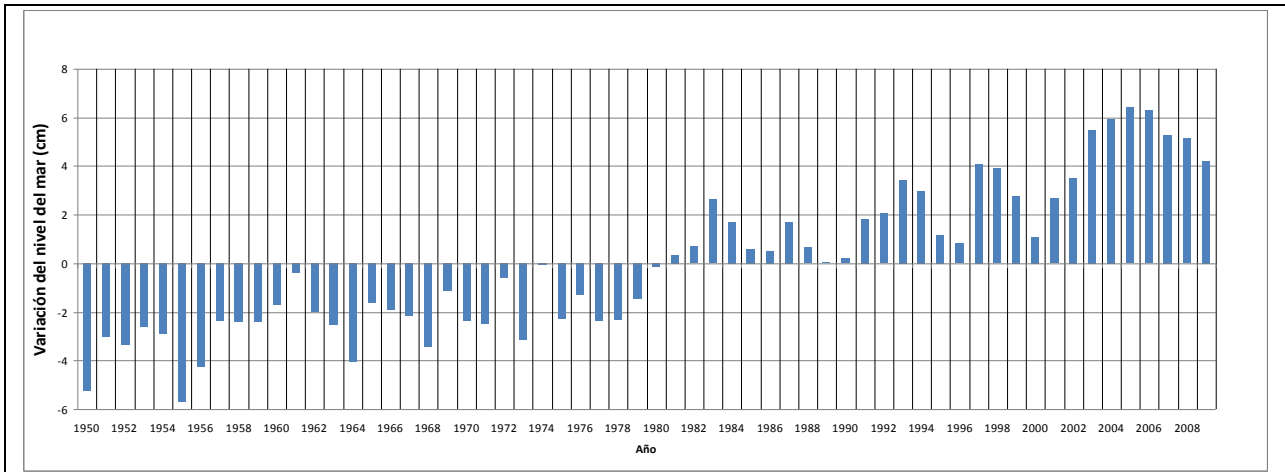
Los gráficos de barras de las **Figuras 14 a 17** indican el apartamiento del geode del nivel medio del mar. Los gráficos se definieron a partir de promedios anuales. Los valores graficados representan el apartamiento respecto del geode del nivel del mar determinado por mediciones satelitales mediante altímetros.



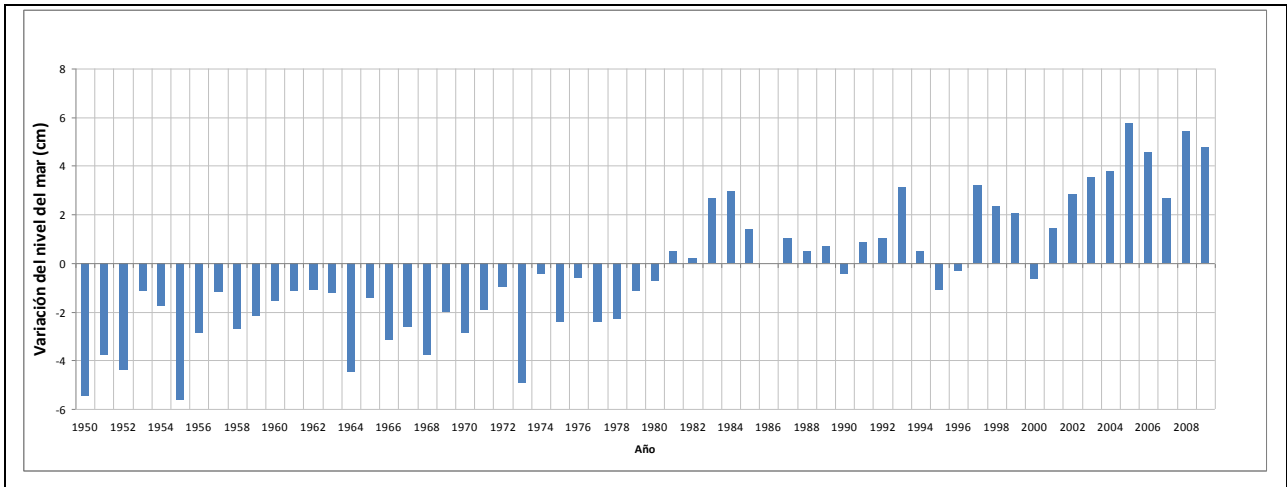
**Figura 14 - Variación del nivel del mar. Valores medios anuales NODO 1**



**Figura 15 - Variación del nivel del mar. Valores medios anuales NODO 2**



**Figura 16 - Variación del nivel del mar. Valores medios anuales NODO 3**



**Figura 17 - Variación del nivel del mar. Valores medios anuales NODO 4**

Se analizaron separadamente dos tramos 1950-1977 (28 años) y 1978-2009 (32 años). Los resultados se sintetizan en la **Tabla 2**.

Nodo	TOTAL 1/1/1950 -31/12/2009		1950-1977 (mm/año)	1978-2009 (mm/año)
	cm	mm/año		
1	9,98	1,66	0,85	2,26
2	10,0	1,71	0,94	2,22
3	9,59	1,60	0,82	2,09
4	7,79	1,30	0,55	1,52

**Tabla 2 - Variación del nivel medio del mar en el área costera de la provincia del Chubut en distintos períodos (NCEP)**

### 5.1.2 Oleaje

La eventual variación del oleaje en el largo plazo, como respuesta a cambios en el sistema climático es un aspecto central en la dinámica de costas. Para analizar esta situación debe disponerse de datos de largo plazo. Las mediciones directas de oleaje son muy escasas en el litoral atlántico argentino y en general de duraciones que no son apropiadas para un análisis como el que se requiere.

Otra fuente de información puede hallarse en la aplicación de simulaciones numéricas (modelos de olas globales) basadas en modelos climáticos globales y calibrados mediante determinaciones satelitales. Los datos se generan sobre mallas estructuradas, y la separación entre nodos es variable, según la fuente. Varios organizaciones, públicas y privadas proveen este servicio y permiten disponer de bases de datos de extensión considerable (de oleaje y otras variables meteorológicas y oceanográficas), aunque siempre a partir de mediados de la década del '90.

Aunque frente a las costas de la provincia del Chubut se dispone de algunas series históricas, ninguna supera los 15 años de extensión, por lo que no fue considerada esta información adecuada para el propósito.

Los datos disponibles son:

En 44°S; 63,745°W 1/1/96 al 31/12/2005 (10 años) (4 datos diarios) (BMT ARGOSS)

En 45,36° S; 68,38°W 1/1/95 al 24/5/99 (5 años) (4 datos diarios)  
28/05/99 al 31/7/2005 (6 años) (4 datos diarios) (United Kingdom  
Meteorological Office, UKMO)

En 42°S; 63°30'W 1/1/92 al 31/12/2006 (15 años) (4 datos diarios) BMT ARGOSS

En 2001 y 2008 a 2013 (6 años) (Institut Français de Recherche pour l'exploitation de la Mer, IFREMER)

### ***5.1.3 Régimen de vientos***

El análisis sobre las tendencias en series temporales de viento resulta un factor determinante para evaluar posibles impactos de las variaciones del clima sobre los ámbitos costeros. El viento es el principal forzante de algunos fenómenos fundamentales de la hidrodinámica marina como lo son el oleaje y la marea meteorológica, al mismo tiempo que afecta la morfología de las costas actuando sobre formaciones de dunas mediante el transporte eólico.

El oleaje es el principal agente modelador de la costa. Cualquier variación a lo largo del tiempo sobre su intensidad o dirección de incidencia tendrá efecto sobre la morfología costera, los procesos de transporte de sedimentos y la estabilidad y funcionalidad de estructuras situadas en la costa.

Del mismo modo, la marea meteorológica resulta una variable de suma importancia que tiene una relevancia fundamental en los procesos de erosión e inundación de áreas costeras.

En la práctica, los registros disponibles sobre estas variables suelen ser limitados en tiempo y en espacio, lo cual dificulta el desarrollo de los análisis de tendencia. Estas limitaciones se pueden superar parcialmente recurriendo a fuentes de información generadas por técnicas de retroanálisis numérico. En particular, el viento constituye una variable sobre la cual es posible obtener series temporales de larga duración.

Consecuentemente, ante la falta de disponibilidad de información homogénea y de tiempo prolongado sobre datos de oleaje y marea meteorológica, el análisis de tendencia fue realizado en esta etapa del estudio sobre las series temporales de vientos.

#### *Series históricas de vientos analizadas en este estudio*

La información de vientos y temperatura utilizada para este análisis fue obtenida de la base de datos de re-análisis del Centro Nacional para la Predicción Ambiental de los EE.UU. (National Center for Environmental Predictions, NCEP (E. Kalnay et al., 1996). La base de datos de re-análisis consiste en una simulación numérica de condiciones atmosféricas globales, cuya resolución temporal es de 6 horas y abarca un período de más de 60 años.

Se extrajeron los campos de componentes de viento U (este-oeste) y V (norte-sur), a un elevación de 10 m sobre el nivel del mar. La grilla de datos cubre toda la región del Atlántico Sur con una resolución espacial que es de aproximadamente 1,9° en Latitud y en Longitud.

Para este estudio se utilizaron los vientos correspondientes a tres nodos ubicados sobre el litoral marítimo distribuidos a lo largo de la franja costera de la Provincia del Chubut, alejados de la línea de costa a distancias comprendidas entre 130 y 150 km, tal como se observa en la **Figura 5**.

Las coordenadas respectivas son: Nodo 1 = 42.8564 Lat. S y 61.8750 Lon W; Nodo 2 = 44.7611 Lat. S y 63.7500 Lon W; Nodo 3 = 46.6658 Lat. S y 65.6250 Lon W.

Los datos analizados correspondieron a series cronológicas que abarcan el período comprendido entre los años 1948 y 2014.

Con el propósito de inferir probables impactos sobre las condiciones hidrodinámicas en el área costera de la Provincia del Chubut, generadas por alteraciones en el régimen de los vientos, se realizó un procesamiento conveniente de la información de base con vistas al análisis de las tendencias de tres patrones de interés para la caracterización de esta variable, a saber:

- *Análisis de tendencia sobre las intensidades máximas del viento*

Se construyeron las series correspondientes a los valores de Intensidad Máxima anual para cada uno de los Nodos y se analizó la tendencia en cada una de ellas (**Figuras 18 a 20**)

- *Análisis de tendencia sobre la dirección media anual del viento*

Para cada una de las series correspondientes a los tres nodos analizados se calculó la dirección media para cada año de registro y se evaluó la variación anual de los mismos. (**Figuras 21 a 23**).

- *Análisis de tendencia sobre la cantidad anual de eventos de intensidad destacada*

Del mismo modo, para cada serie se computó la cantidad de valores anuales (referidos a intervalos 6 hs de duración) para los cuales la intensidad del viento superaba el valor de  $W = 12.5$  m/s, el cual fue definido como “evento de intensidad destacada”. La elección de este umbral de velocidad ( $W=12.5$  m/s) fue hecha de manera arbitraria, habiéndose elegido en función del análisis de la curva de Distribución de Frecuencia de Intensidad del Viento en los tres nodos analizados, donde puede observarse que, en promedio, dicha intensidad se encuentra asociada a una frecuencia del orden del 95 % (Es decir que solo es superado en un 5 % del total de los casos que conforman el registro). (**Figuras 24 a 26**).

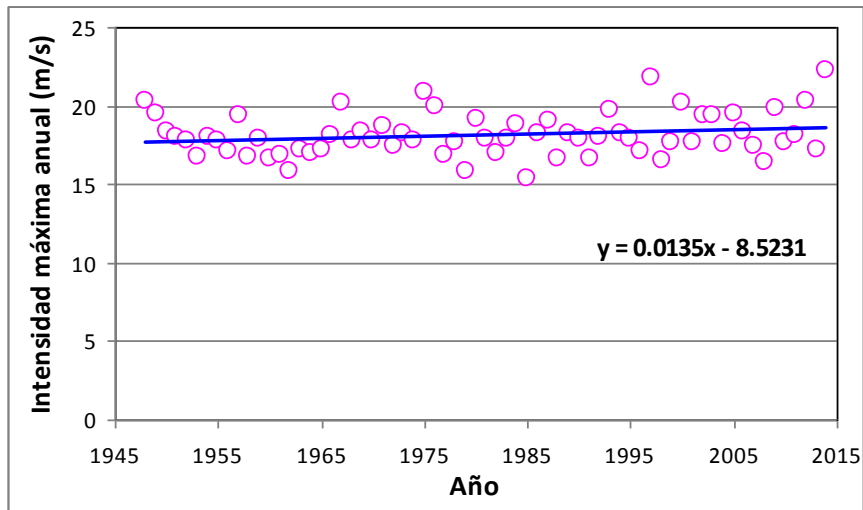


Figura 18 - Valores máximos anuales de intensidad del viento en Nodo 1.

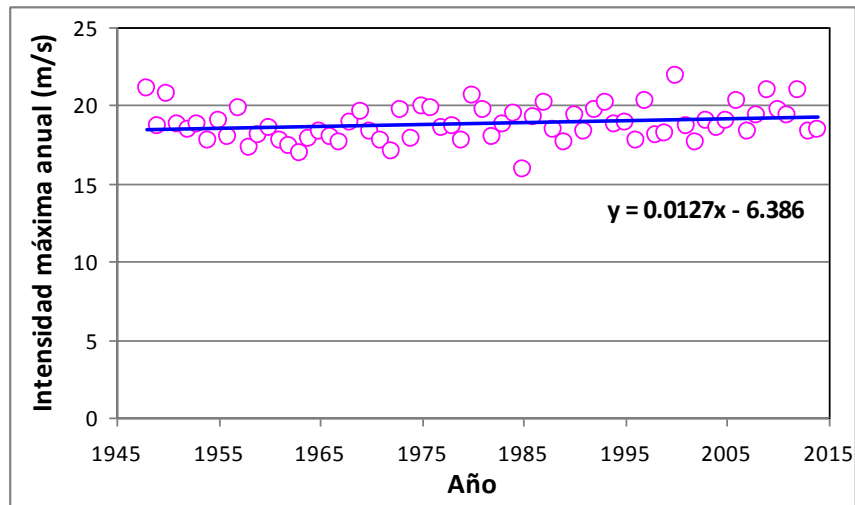


Figura 19 - Valores máximos anuales de intensidad del viento en Nodo 2.

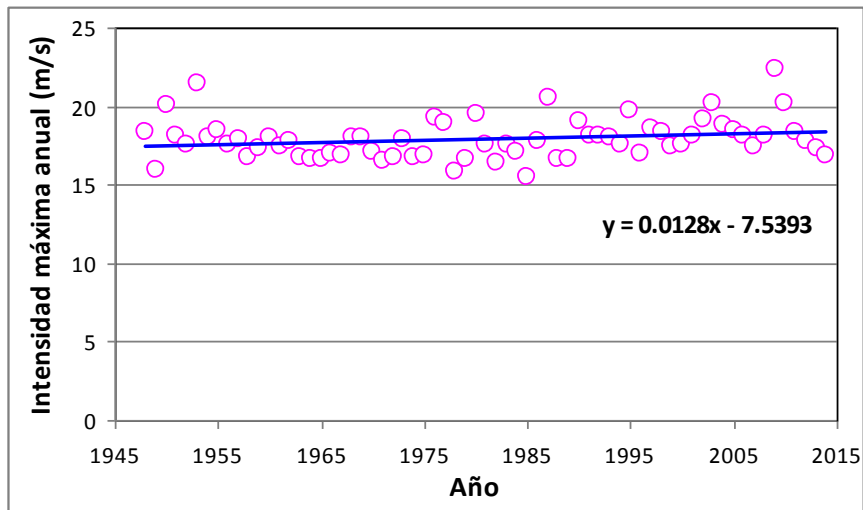


Figura 20 - Valores máximos anuales de intensidad del viento en Nodo 3.

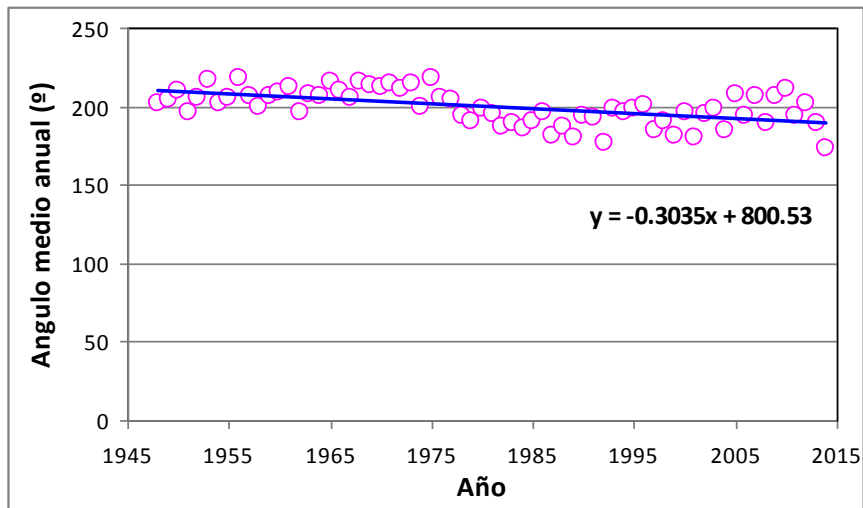


Figura 21 - Variación anual de la dirección promedio del viento en Nodo 1.

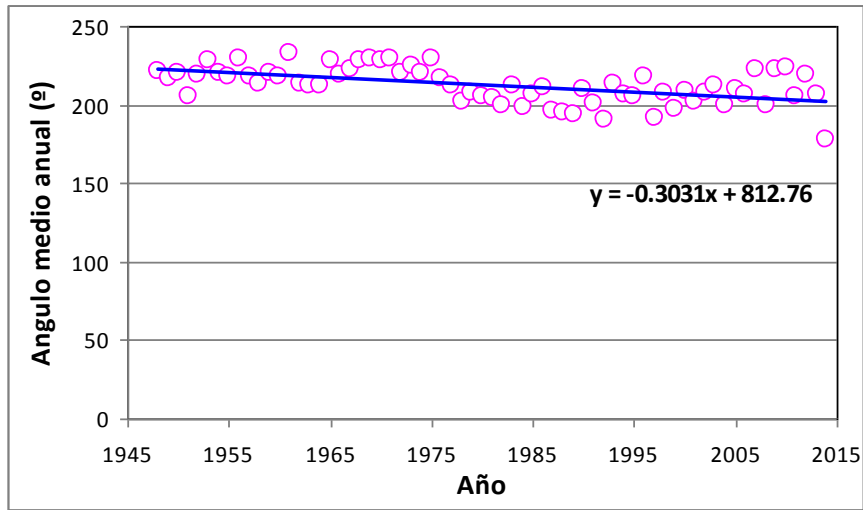


Figura 22 - Variación anual de la dirección promedio del viento en Nodo 2.

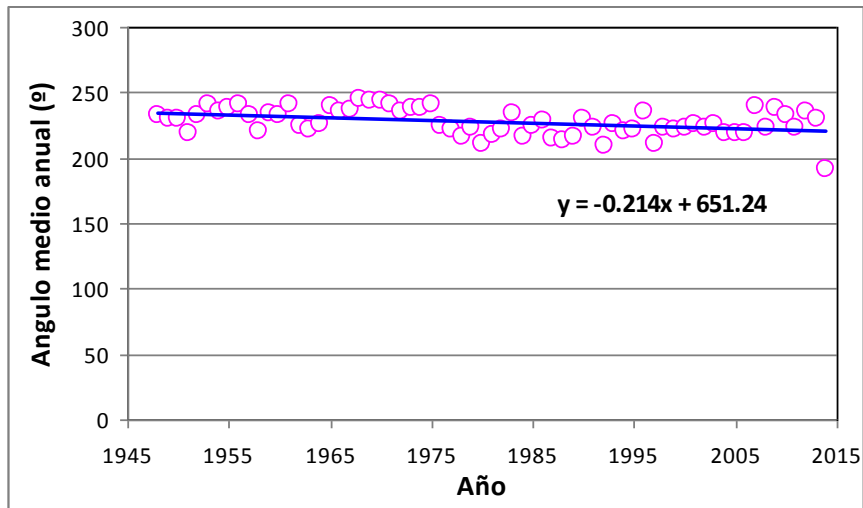


Figura 23 - Variación anual de la dirección promedio del viento en Nodo 3.

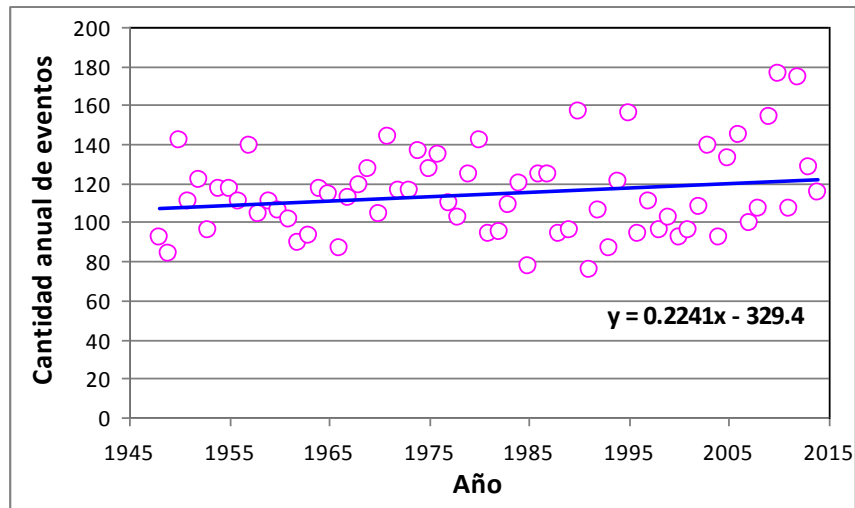


Figura 24 - Variación de la cantidad anual de eventos intensos (W>12.5 m/s) en Nodo 1.

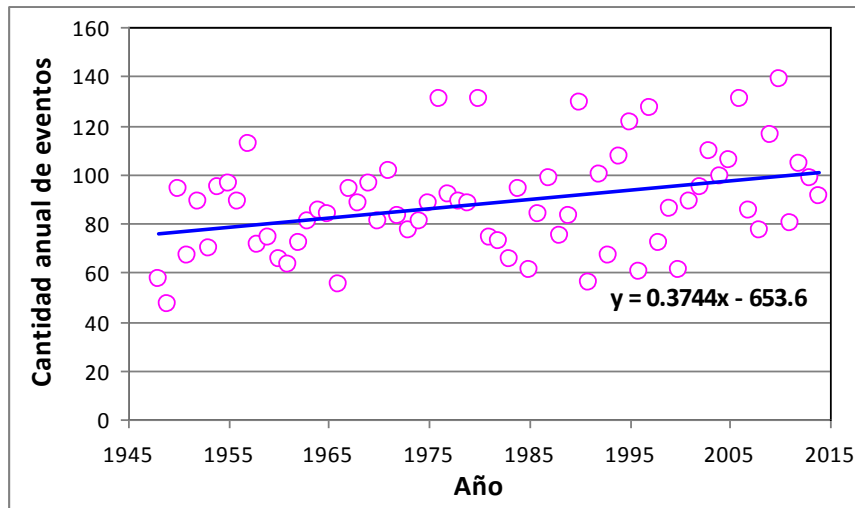


Figura 25 - Variación de la cantidad anual de eventos intensos (W>12.5 m/s) en Nodo 2.

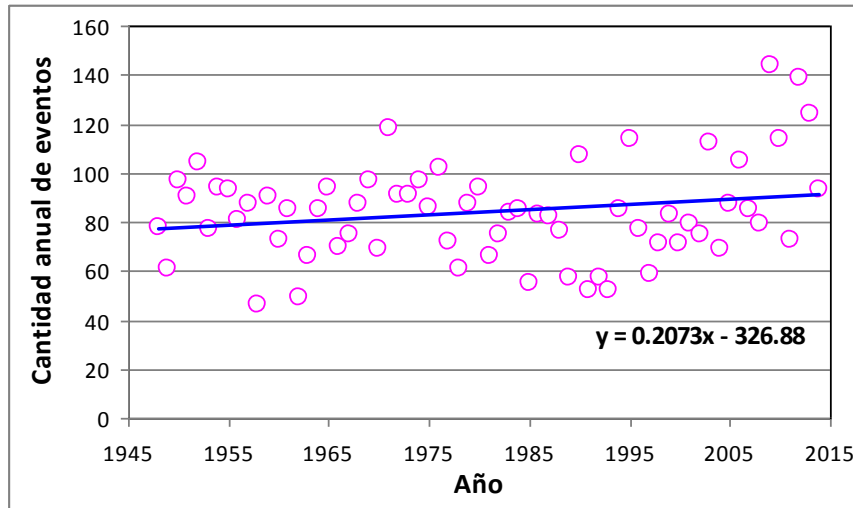


Figura 26 - Variación de la cantidad anual de eventos intensos ( $W > 12.5$  m/s) en Nodo 3.

### Resultados del análisis

El resultado del análisis de las series correspondientes a las intensidades máximas anuales para las tres ubicaciones puntuales del estudio mostró una tendencia a incrementarse en todos los casos. Si bien esto se destaca como un hecho a tener en cuenta se observa que el valor del incremento medio anual obtenido del análisis resulta poco trascendente, siendo del orden de 0.013 m/s por año.

Asumiendo la validez de estos resultados podría esperarse que los incrementos mencionados en la intensidad del viento no produjeran alteraciones significativas sobre las características de las olas generadas localmente ni sobre la marea astronómica.

El análisis sobre la variación de la dirección media anual del viento muestra resultados que en principio pueden generar mayor interés. En efecto, las tendencias observadas sobre este parámetro indican una marcada disminución anual que varía entre 0.2 y 0.3°. Esto estaría indicando una tendencia al desplazamiento de la dirección media anual del viento desde la dirección SW hacia el SSW. Si bien no es posible estimar a priori de que manera puede afectar esto fenómeno a los procesos de propagación del oleaje debería ser tenido en cuenta en un futuro debido a que es sabido que pequeñas alteraciones sobre las direcciones medias de la incidencia de las olas pueden generar impactos significativos sobre la morfología costera.

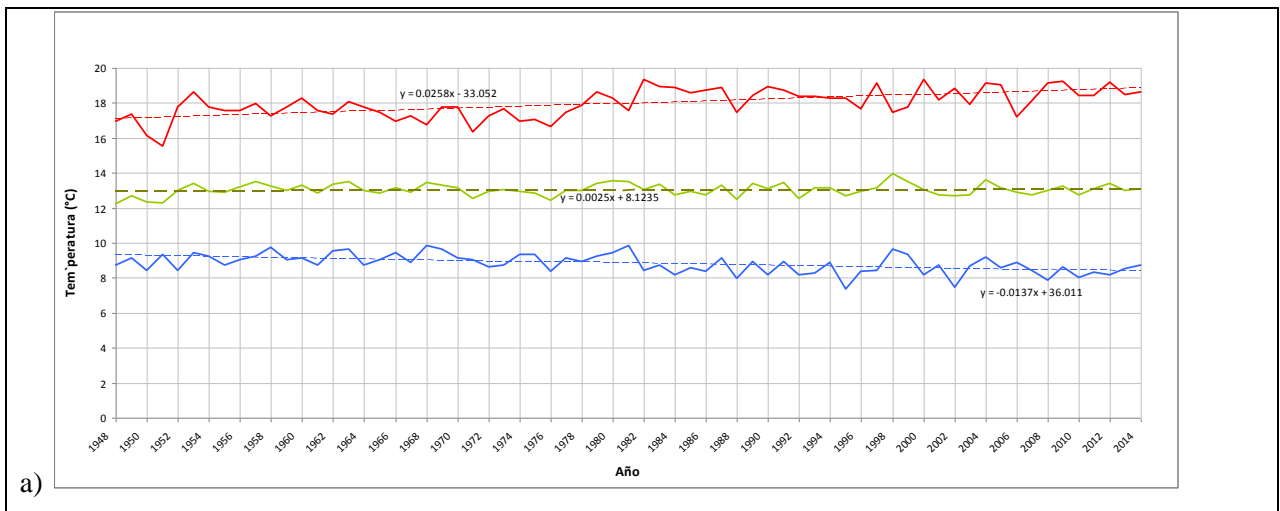
Los casos de eventos con intensidades de viento destacadas también muestran una tendencia positiva en los tres nodos. En este sentido, los incrementos observados varían orden que está entre un 0.2 y 0.4 casos por año. Este resultado indica en alguna medida que sería esperable que la región costera de la provincia del Chubut estuviera expuesta a un leve incremento en la energía del oleaje incidente sobre la misma.

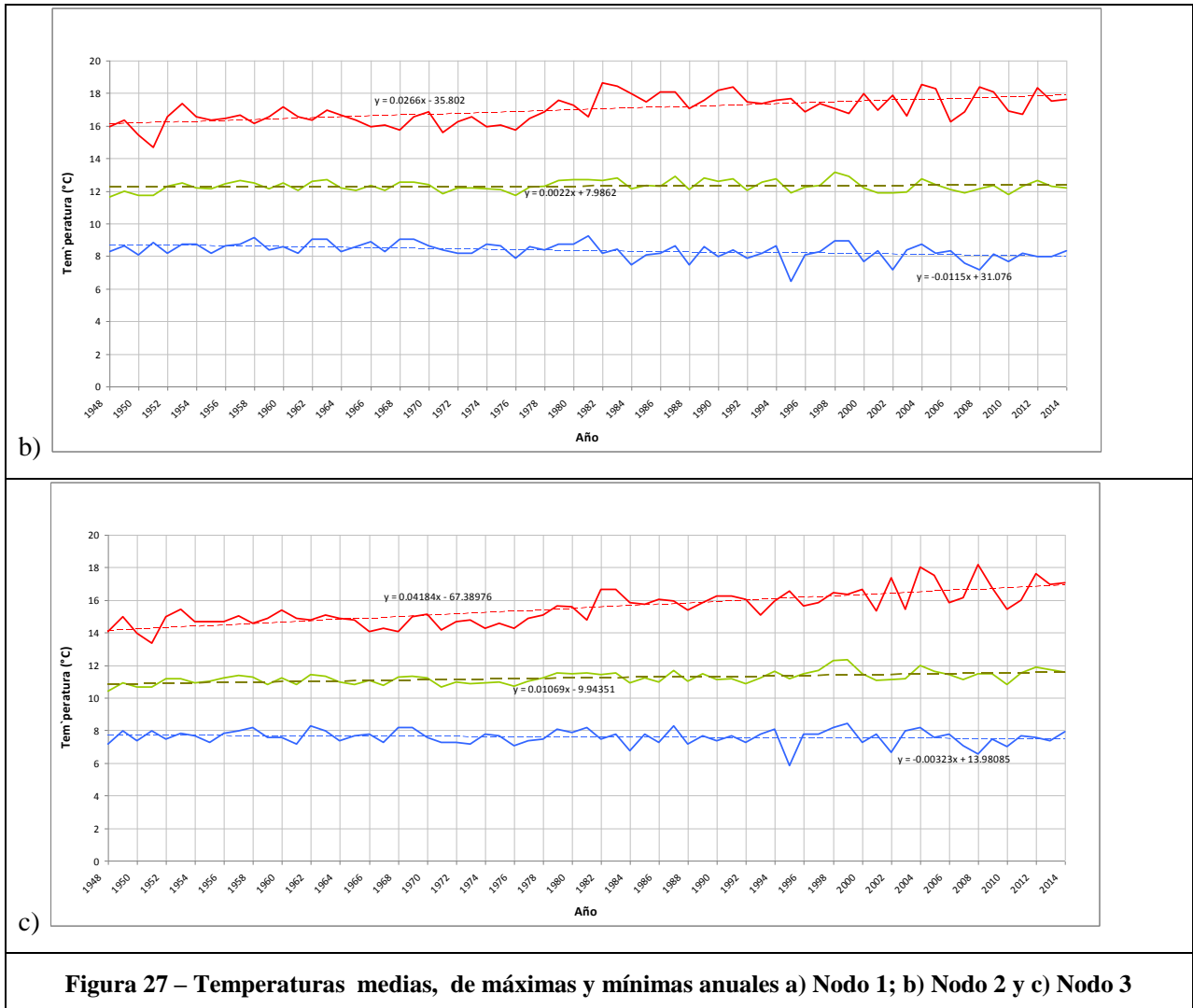
### 5.1.4 Temperatura

La temperatura superficial tiene incidencia sobre los sistemas de presión y circulación, entre otros, por lo que su evaluación puede contribuir a establecer un marco de referencia del cambio climático a escala local.

El análisis se realizó a partir de un conjunto de datos consistente en un valor diario de temperatura en superficie (*skin temperature*) desde el 1/1/1948 al 30/10/2014. Para cada año se determinó el valor promedio, el máximo y el mínimo NCEP reanálisis. La ubicación de los nodos se indica en la **Figura 5**.

La **Figura 27** muestra los valores determinados, y un ajuste por regresión lineal de ese conjunto.





**Figura 27 – Temperaturas medias, de máximas y mínimas anuales a) Nodo 1; b) Nodo 2 y c) Nodo 3**

En el período total (66 años) y en los 3 nodos analizados la tendencia de las Temperaturas Medias y máximas anuales ha sido a incrementarse, mientras que las temperaturas mínimas anuales se han reducido.

Los valores resultantes de la tasa de variación de la temperatura para el período completo se muestran en la **Tabla 3**, mientras que en la **Tabla 4** se indican las tasas separadamente para dos períodos (1948-1977) y 1978-2014.

Periodo 1948-2014	Temperatura media (°C/año)	Temperatura máxima (°C/año)	Temperatura mínima (°C/año)
Nodo 1	0.00248	0.00258	-0.0137
Nodo 2	0.00218	0.0266	-0.0115
Nodo 3	0.01069	0.0418	-0.00323

**Tabla 3 - Tasa de Variación anual de las temperaturas media, máxima y mínima (NCEP)**

Las mayores tasas de incremento de la temperatura media y máxima anual ocurren en el Nodo 3

Se analizaron separadamente los períodos 1948-1977 y 1978-2014

Nodo	Variación total (°C)	1948-1977 (°C/año)	1978-2014 (°C/año)	Total (°C/año)
1	0,7	+ 0,00610	- 0,00339	+0,00248
2	0,14	+ 0,00406	-0,01221	+0,00218
3	0,16	+0,00200	+0,00753	+ 0,01069

**Tabla 4 - Variación de la temperatura media en distintos períodos (NCEP)**

## **6 PROYECCION FUTURA**

En el Capítulo 5 se ha presentado una estimación de la variación histórica de algunas variables que tienen un rol preponderante en los procesos costeros. Estos parámetros son los que se han considerado fundamentales para analizar las variaciones producidas por el cambio climático que pueden tener efectos significativos en los diferentes elementos que configuran la zona costera.

En los apartados siguientes se señalan los valores de dichas tendencias, así como el valor medio de dichas variables en el año horizonte 2050 y 2100. Vuelve a señalarse la dificultad de realizar extrapolaciones por periodos prolongados, teniendo en cuenta el limitado conocimiento que se tiene de los complejos procesos a largo plazo que dan origen a esas variaciones.

### **6.1 Escala Global**

La proyección a futuro del cambio del sistema climático y variables asociadas que presenta el IPCC se realiza utilizando un conjunto de modelos numéricos de distinta complejidad. Estos modelos simulan los cambios esperables bajo distintos escenarios de forzantes antropogénicos a nivel global.

Algunas de las anomalías climáticas previamente indicadas (y no del todo bien comprendidas) no están incorporadas en esos modelos climáticos, aunque pueden tener significativa influencia en la variación del clima global, y variables asociadas en distintas regiones.

Un nuevo conjunto de escenarios denominados RCPs (Representative Concentration Pathways, (IPCC Working Group I, 2013), fue utilizado para las simulaciones numéricas presentadas en AR5, y ejecutadas en el marco del proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5), del World Climate Research Programme.

Las hipótesis para los escenarios de cálculo adoptadas fueron que en todos los RCPs las concentraciones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) son mayores en 2100 en relación a la actualidad, como resultado del incremento previsto de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante el siglo XXI.

Las proyecciones alcanzan a fines del siglo XXI (2081 a 2100) y se expresan en relación al período 1986-2005.

La mayoría de las simulaciones se llevaron a cabo con concentraciones de CO<sub>2</sub> de 421 ppm (escenario RCP2.6), 538 ppm (escenario RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) y 936 ppm (RCP8.5) respectivamente para el año 2100.

Las conclusiones generales del IPCC referentes a esas modelaciones son:

- Los modelos climáticos han mejorado desde el informe anterior (AR4, 2007).
- Los resultados de esas modelaciones, conjuntamente con observaciones, proporcionan confianza en la magnitud del calentamiento global estimado en respuesta a forzantes pasadas y futuras.
- El calentamiento continuará si se continúa con las emisiones de gases invernadero.
- Es probable que el incremento de la temperatura superficial global a fines del siglo XXI exceda 1,5°C en relación al periodo 1850-1900 para la mayoría de los escenarios estudiados, y 2°C para muchos de los escenarios analizados.
- El ciclo global del agua se verá afectado, con incrementos en la disparidad entre regiones húmedas y secas y entre estaciones húmedas y secas, con algunas excepciones locales.
- Los océanos continuarán recalentándose, con el calor extendiéndose a capas más profundas, afectando los patrones de circulación.
- Es muy probable que la capa de hielo marino ártica se reduzca, y lo mismo ocurra con la capa de nieve de primavera en el hemisferio norte y el volumen de glaciares.
- El nivel medio global del mar continuará subiendo, a una tasa que muy probablemente exceda la tasa de las últimas cuatro décadas.
- La temperatura futura de superficie estará determinada en gran medida no solo por la tasa de emisión de CO<sub>2</sub>, sino por su acumulación en la atmósfera, lo que implica que el cambio climático continuará aun si las emisiones de CO<sub>2</sub> se detuvieran.

Los resultados de IPCC se presentan en las **Figuras 28 y 29** y toman como nivel de referencia el correspondiente al año 2000.

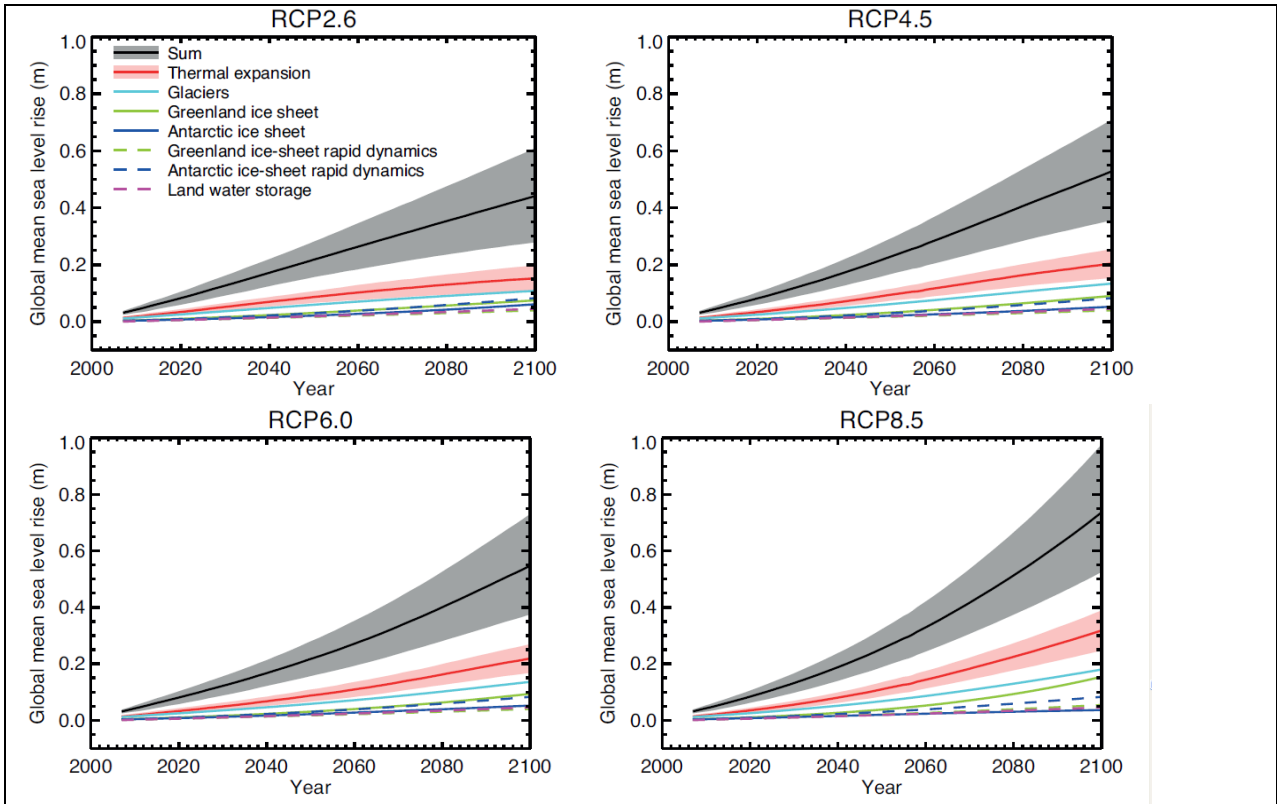
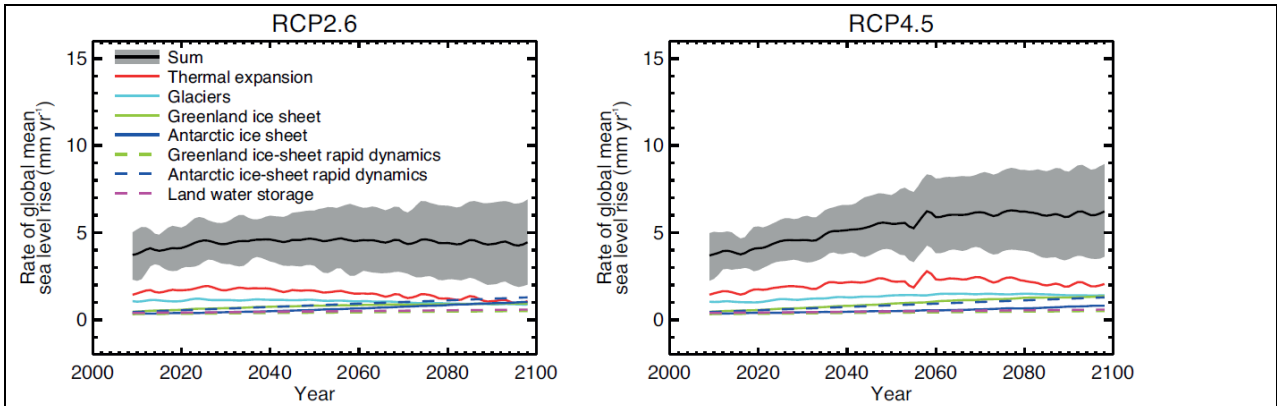
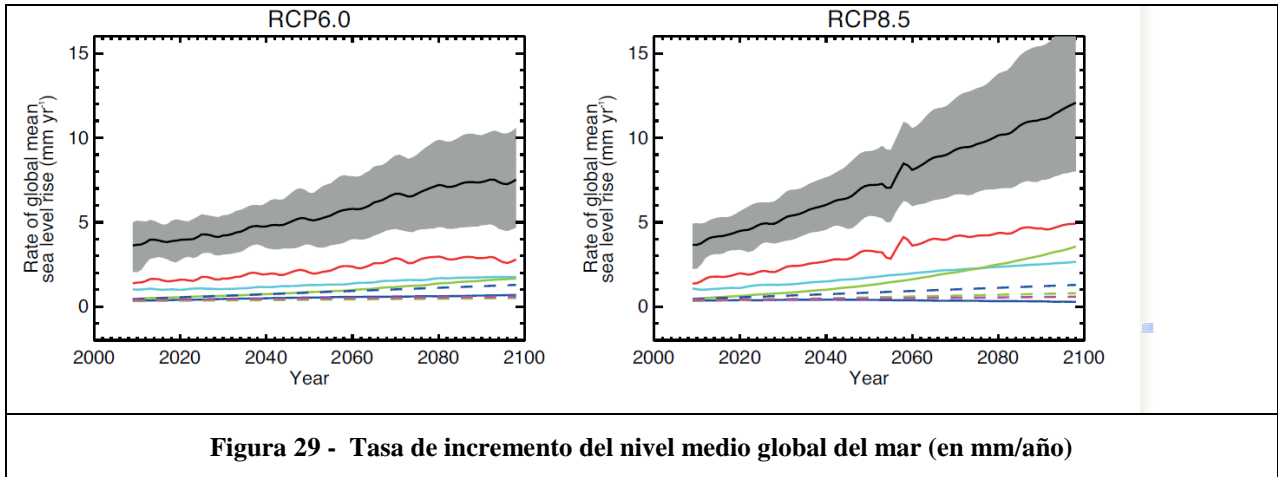


Figura 28 - Sobreelevación del nivel medio global del mar referido al periodo 1986-2005





	Escenario	2046-2065		2081-2100	
		Media	Rango probable	Media	Rango probable
Temperatura de Superficie Media Global (°C)	RCP2.6	1	0.4 - 1.6	1	0.3 - 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 - 2.0	1.8	1.1 - 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 - 1.8	2.2	1.4 - 3.1
	RCP8.5	2	1.4 - 2.6	3.7	2.6 - 4.8
Elevación del Nivel Medio Global del Mar (m)	RCP2.6	0.24	0.17 - 0.32	0.4	0.26 - 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 - 0.33	0.47	0.32 - 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 - 0.32	0.48	0.33 - 0.63
	RCP8.5	0.3	0.22 - 0.38	0.63	0.45 - 0.82

**Tabla 5 – Proyección de temperaturas de superficie y nivel medio global**

Es muy probable que en el siglo XXI y más allá, el cambio de nivel del mar tendrá un fuerte patrón regional, con algunos lugares que experimentarán significativos apartamientos de los valores globales. Considerando variaciones decadales, las tasas de cambio de nivel del mar como resultados de la variabilidad climática pueden diferir en más de 100% de la tasa promedio global. Hacia fines del siglo XXI es muy probable que en aproximadamente el 95% de las superficies oceánicas en el mundo las tasas sean positivas, y la mayoría de las regiones que experimenten tasas negativas se hallan ubicadas en las

proximidades de capas de hielo actuales o pasadas. Se espera que cerca del 70% de las costas experimenten un cambio de nivel del mar relativo de 20% respecto del cambio global del nivel del mar.

Es muy probable que se produzca un significativo incremento en la frecuencia de ocurrencia de niveles extremos de mar en algunas regiones hacia 2100, con un incremento probable a comienzos del siglo XXI. Este incremento será principalmente el resultado del incremento del nivel medio del mar, y con la frecuencia de un determinado valor extremo de mar incrementándose en un orden de magnitud o más en algunas regiones a fines del siglo XXI. Hay baja confianza en las proyecciones a futuro para regiones específicas de tormentas y ondas de tormenta asociadas.

No obstante el análisis presentado por el IPCC, otros grupos de investigadores tienen visiones diferentes del problema. Según (Church J.A. et al, 2006) el anuncio efectuado por la NASA de que el índice PDO ha cambiado de su modo *cálido* al modo *frío* (**Figura 3**) era esperado según la variación pasada de ese índice y no se trata en consecuencia de una singularidad que se superpone y enmascara el severo calentamiento predicho por IPCC. Esto tiene significativas implicancias para el futuro e indica que los modelos climáticos presentados por el IPCC podrían estar equivocados en su predicción del significativo incremento de la temperatura global, a razón de 1°F por década (0,6°C por década) para el resto del siglo.

Como lo muestra el patrón histórico de comportamiento del PDO y el correspondiente calentamiento/enfriamiento global, el patrón es parte de ciclos calidos/fríos de 25 a 30 años. Cada vez que PDO pasó de un ciclo *cálido* a uno *frío* y viceversa, el clima global ha cambiado en correspondencia. En 1977 el PDO cambió de una fase *fría* a una *cálida* y disparó el calentamiento observado desde 1977 a 1998, conocido como el Gran cambio Climático.

Precisamente en correspondencia con esa situación (ver **Figura 3**) se ha dado la inversión en la variación del nivel del mar determinada mediante altímetros satelitales frente a las costas de la Provincia del Chubut (**Figuras 14 a 17**).

A la inversa, otros investigadores (Rahmstorf, S., 2010) señalan algunas limitaciones inherentes a las simulaciones numéricas presentadas por el IPCC, que han estimado un incremento de 18 a 59 cm para el período 1990 a 2090 (AR4, 2007), más un valor no determinado debido a la fusión de hielos en Groenlandia y la Antártida.

Mediante un enfoque semi empírico del problema, algunos investigadores postulan que el aumento del nivel del mar es proporcional al calentamiento global debido a la fusión de hielos. En el curso del siglo XX la tasa de elevación del nivel del mar se triplicó en respuesta a un calentamiento global de 0,8°C. Desde el comienzo de mediciones mediante satélites los océanos se han elevado 80% más rápido (3,4 mm/año) que la media proyectada por IPCC de 1,9 mm/año.

Esto puede ser atribuido en gran medida a la respuesta de los hielos continentales al calentamiento global. Las estimaciones del IPCC contemplan una contribución neta casi nula de la fusión de hielos, con el argumento de que se espera que, aunque se incremente la fusión de hielos en el ártico, el continente antártico gane masa debido al incremento de precipitación. Las observaciones muestran en cambio que ambos polos han estado perdiendo masa a tasas cada vez mayores a lo largo de las últimas dos décadas.

Así, algunas investigaciones realizadas con un enfoque semi empírico han predicho sobreelevaciones mucho mayores para el siglo XXI que las estimadas por IPCC, excediendo 1 m si las emisiones de gases invernadero continúan.

## **6.2 Escala local**

### **6.2.1 Nivel medio del mar**

El análisis realizado se ha basado en técnicas simples. La fuente de información está constituida por datos altimétricos satelitales y retroanálisis. Se debe recordar que los datos medidos por el mareógrafo de Mar del Plata, aunque confirmando las tendencias del incremento, arrojaron valores de variación considerablemente inferiores a los resultantes de retroanálisis de datos altimétricos satelitales en la misma región.

Efectuando un ajuste de los datos presentados en 5.1.1. para el período 1950-2009 con una función exponencial, se han estimado valores para los años 2050 y para el año 2100 (**Tabla 6**), los que resultan en el rango de los valores pronosticados para el nivel del mar medio global por el IPCC para algunos de los escenarios más desfavorables (ver Tabla 5).

Posición	Año	
	2050	2100
N1	18.6	61.6
N2	19.5	65.7
N3	20.8	57.3
N4	13.3	40.7

**Tabla 6 - Incremento (en cm) proyectado del nivel medio del mar frente a las costas de la Provincia del Chubut tomando como base el año 2000.**

Sin embargo debe advertirse nuevamente que es muy cuestionable realizar estas extrapolaciones para períodos tan prolongados, cuando no se conoce en profundidad la naturaleza de los procesos naturales involucrados, la contribución a la variación climática de las emisiones de origen antropogénico y la proyección futura de las tasas de emisión de gases invernadero, por lo cual las mismas pueden resultar afectadas de una considerable incerteza.

### 6.2.2 Oleaje

Como se ha indicado en el Capítulo 5, no disponiéndose en la región de mediciones prolongadas de olas, se utilizaron registros de vientos de significativa extensión (1948-2014) para intentar una evaluación de la variabilidad de las componentes de oleaje generadas por el viento.

Como resultado del análisis de esos datos surge que no se advierten variaciones significativas sobre la intensidad del viento en el período analizado, y por el mismo motivo en su proyección futura (suponiendo una dependencia lineal), que arroja valores de incremento del orden del 7% hasta el año 2100; bajo estas hipótesis, es previsible que el incremento de la energía media del oleaje local resulte leve o moderado.

Aunque esta conclusión puede ser importante a los efectos de la proyección futura del oleaje extremo, determinante de muchos aspectos de la dinámica costera y la estabilidad de estructuras marinas costeras, debe recordarse que las olas oceánicas (“swell”) que llegan a las costas patagónicas son el resultado del régimen de vientos en regiones alejadas y mucho más vastas del océano Atlántico. Este tipo de oleaje, aunque tiene significativa importancia en la dinámica de sedimentos en áreas costeras, no ha sido evaluado en cuanto a su proyección futura.

En cuanto a la dirección de incidencia media del oleaje local (que se asume es la del viento), los valores históricos indican una marcada disminución, lo que estaría indicando una tendencia al desplazamiento de la dirección media anual del viento desde la (actual) dirección SW hacia el S si se proyecta esta variación hacia el año 2100, considerando siempre la hipótesis más simple de una dependencia lineal. Si bien no es posible estimar a priori de que manera pueden afectar este fenómeno a los procesos de propagación del oleaje hasta su llegada a la costa, debería ser tenido en cuenta en un futuro debido a que es sabido que pequeñas alteraciones sobre las direcciones medias de la incidencia de las olas pueden generar impactos significativos sobre la morfología costera.

Finalmente, los casos de eventos con intensidades de viento destacadas ( $W > 12.5$  m/s) también muestran una tendencia positiva en los tres nodos analizados (**Tabla 7**). Bajo la hipótesis de la linealidad de la variación, esto implica un incremento significativo (de hasta 20% para 2050 y de hasta 40% para 2100) del número anual de eventos extremos esperables, lo cual tendría significativa importancia en los procesos de erosión y dinámica de sedimentos costeros.

Año	intensidad (m/s)			direccion			Nro de eventos $W > 12.5$ m/s		
	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
1950	17.8	18.4	17.4	208.7	221.7	233.9	107.6	76.5	77.4
2000	18.5	19.0	18.1	193.5	206.6	223.2	118.8	95.2	87.7
2050	19.2	19.6	18.7	178.4	191.4	212.5	130.0	113.9	98.1
2100	19.8	20.3	19.3	163.2	176.3	201.8	141.2	132.6	108.5
<b>2100/2000</b>	7.3%	6.7%	7.1%	-15.7%	-14.7%	-9.6%	18.9%	39.3%	23.6%
<b>2050/2000</b>	3.7%	3.3%	3.5%	-7.8%	-7.3%	-4.8%	9.4%	19.7%	11.8%

**Tabla 7 - Variación de eventos extremos de viento**

## **7 EFECTOS SOBRE LA COSTA DEL CHUBUT Y ESTRATEGIAS**

En los capítulos previos se presentó un marco general de situación de cambio climático a escala global, su proyección futura y el análisis de algunas bases de datos que permiten proveer de datos para evaluar tendencias de largo plazo a escala regional de algunas variables significativas en ubicaciones sobre el frente costero de la provincial del Chubut.

No obstante, para tomar medidas concretas de adaptación, tales como proyectos específicos de defensa de la costa, protección frente a inundaciones, etc. se requiere de la realización de estudios específicos en escala local, que permitan abordar con aceptable grado de confianza la cuantificación de las tendencias de variación de las variables involucradas en los procesos de dinámica costera.. Tal por ejemplo el caso de una playa que requiera una defensa frente a la erosión costera. En este caso, la información necesaria deberá ser más detallada y local. De manera equivalente se deberá proceder para evaluar por ejemplo el riesgo de inundaciones en áreas urbanas costeras específicas, o estabilidad de estructuras marítimas concretas.

El proceso de definición de obras de mitigación implica la evaluación de la dinámica costera, su tendencia y la variabilidad climática en el área del proyecto, como así también la caracterización de vulnerabilidad, el impacto derivado y los riesgos.

La CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), la Oficina Española de Cambio Climático y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria han desarrollado una metodología específica para la evaluación de impactos del cambio climático en zonas costeras, para los países de América Latina y el Caribe. (Universidad de Cantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental. 2013).

Esta metodología y las herramientas pueden ser útiles para evaluar impactos, plantear medidas de adaptación y realizar un análisis económico de las mismas frente a la variación del sistema climático y las variables oceanográficas asociadas.

## **7.1 Efectos previsibles en las costas**

Varios son los factores que de manera directa tendrán efectos sobre las playas y costas. Uno es la cota de inundación, producida no sólo por el incremento del nivel medio del mar, sino también eventualmente por incremento en la altura del oleaje que puede llegar a la costa. (Losada, 2012).

Para una playa de arena corriente puede asumirse que, para llegar a una nueva situación de equilibrio, ocurrirá un retroceso del orden de 1 m por cada cm de incremento del nivel del mar.

Otro factor importante es la variación de la dirección de incidencia del oleaje, que determina por un lado los efectos de refracción del oleaje y por el otro, la capacidad de transporte de arenas a lo largo de la playa (transporte litoral); el transporte litoral de arena depende de las características de la arena y de la playa como también de las propiedades del oleaje, y es fuertemente no lineal con la altura, el período del oleaje y la dirección de llegada a la costa.

La frecuencia de ocurrencia de eventos extremos tiene significativa importancia en el desarrollo de procesos erosivos, y debe recordarse que una gran parte de la costa de la Provincia del Chubut se compone de acantilados de materiales sedimentarios poco consolidados de origen glaciario, cuyas tasas de degradación podrían verse afectadas, induciendo un incremento en el retroceso de la línea costera a la vez que un aporte adicional de sedimentos al sistema costero.

## **7.2 Efectos previsibles sobre obras marítimas**

Bajo determinadas circunstancias, el oleaje que incide sobre una estructura marítima puede superar la cota de coronamiento de ésta, proceso denominado rebase o sobrepaso; esta situación implica, en el caso de obras longitudinales de protección de un frente costero, la inundación del área protegida, en cuyo caso puede resultar afectada fuertemente la seguridad de infraestructura (edificaciones, pavimento), vehículos y peatones.

En el caso de obras portuarias, el rebase de olas condiciona la estabilidad de la estructura y la transmisión de oleaje a áreas protegidas del puerto, afectando la seguridad de embarcaciones. El rebase es fuertemente no lineal con el francobordo (altura del coronamiento de la estructura respecto del nivel del mar), por lo

que una reducción de éste (originado en un incremento del nivel del mar), puede inducir rebases significativamente mayores e inaceptables. A esto debe agregarse eventualmente la llegada de olas más altas (asociadas con un mayor nivel del mar) y el incremento de la frecuencia de este tipo de situaciones por efecto de la modificación del sistema climático que da origen al oleaje y a las ondas de tormenta.

### 7.3 Estrategias de adaptación

Frente a la situación planteada se hace necesario llevar a cabo medidas en diversos ámbitos. En el caso de las costas españolas, la Universidad de Cantabria propone la realización de un plan metodológico enfocado a caracterizar los aspectos que en términos generales se indican a continuación, y muchos de cuyos lineamientos podrían aplicarse al caso concreto de las costas de la Provincia del Chubut:

#### a) Determinación de la exposición y la vulnerabilidad (diagnóstico de situación)

La **exposición** se define como la zona, región, o entidad o ente que se ve afectado ante la ocurrencia de un evento asociado al agente (en este caso el cambio climático).

El IPCC define la **vulnerabilidad** como el grado de daño que el cambio climático puede producir en un sistema natural o social, y se lo define como una función de:

a1) La **susceptibilidad**: es decir el grado de respuesta de un sistema a un cambio dado en el clima, ya se trate de efectos perjudiciales o beneficiosos.

a2) La **capacidad de adaptación**, es decir el grado en el cual, la realización de determinados ajustes en prácticas, procesos o estructuras, pueden moderar o eliminar el daño potencial, o bien permiten aprovechar las oportunidades dadas por un cambio en el sistema climático. Esto puede ser considerado equivalente a lo que la Comisión Europea define como de **resiliencia** (Schneiderbauer y Ehrlich, 2004).

La cuantificación de estos elementos conjuntamente con el factor de incertidumbre asociado a ellos, permite evaluar el **riesgo**.

#### b) Estrategias de adaptación

b1) Favorecer la implementación de una Gestión Integrada de la Zona Costera en la que se incluya los potenciales efectos del cambio climático como un elemento más a considerar.

b2) Favorecer un planeamiento y ordenación del territorio anticipándose al cambio climático; modificación de usos; adaptación de normas de edificación en zonas vulnerables; protección de ecosistemas en peligro, etc.

b3) Introducir en el diseño de nuevas infraestructuras costeras el efecto del cambio climático en la vida útil de la obra.

b4) Re-evaluar las infraestructuras en zonas de alta vulnerabilidad.

b5) Fomentar la introducción del efecto del cambio climático en las Recomendaciones de Obras Marítimas y en otras recomendaciones y normas aplicables a infraestructuras en zonas altamente vulnerables.

#### **c) Estrategias de mitigación mediante estrategias indirectas**

c1) Incorporar el cambio climático en cualquier estudio y planeamiento del litoral como un elemento más de la Gestión Integrada.

c2) Evitar o minimizar cualquier tipo de actuación conducente a la desestabilización de la línea de la costa.

c3) Favorecer actuaciones conducentes a la estabilización de playas, y dunas; rehabilitación del transporte de sedimentos en zonas de erosión, etc.

#### **d) Concientización social**

d1) Impulsar programas de concienciación de gestores y técnicos en los diferentes ámbitos de las administraciones públicas.

d2) Fomentar la puesta en marcha de programas de Educación Ambiental con contenidos sobre los potenciales efectos del cambio climático en la costa.

#### **e) Estrategias de retroceso**

e1) Facilitar la migración hacia el interior de zonas de marismas y humedales favoreciendo las estrategias de retroceso.

e2) En zonas altamente vulnerables evitar futuros desarrollos en zonas de retroceso. Revisión de deslindes y aplicación de la Ley de Costas.

- e3) En zonas parcialmente recuperables introducir la planificación territorial necesaria introduciendo estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio Climático
- E4) En nuevas ocupaciones realizar concesión de permisos condicionados; concesiones limitadas; acuerdos de reubicación y/o demolición.
- e5) Establecimiento de estrategias para la compra de terrenos con fines conservacionistas.

## **8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- El cambio climático global es un hecho innegable. Las causas y sus efectos a largo plazo no son del todo conocidas. Se supone con fundamentos sólidos que la acción antropogénica es uno de los factores dominantes.
- Una de sus consecuencias inmediatas es el incremento del nivel del mar. Mediciones de esta variable dan cuenta de esos incrementos, y mediante retroanálisis de una amplia red de mareógrafos, mediciones altimétricas mediante sensores remotos montados en satélites y otras técnicas, ha sido posible reconstruir en detalle la evolución del nivel del mar por un período prolongado (100 años y más) desde la época post-industrial.
- El valor medio global del incremento del nivel del mar se ha estimado en 19 cm desde principios del siglo XX, pero no es uniforme en todo el planeta, y ha sido posible establecer la existencia de una aceleración en su variación a partir de 1980.
- Las proyecciones globales a futuro tienen importantes incertidumbres que se originan tanto en la falta de un conocimiento profundo del complejo problema, en la dificultad de formular los procesos físicos e incorporarlos en simulaciones numéricas, como también en establecer escenarios realistas de las futuras emisiones antropogénicas de gases invernadero.
- En particular frente a las costas de la Provincia del Chubut se ha estimado que entre 1950 y 2009 el nivel del mar se incrementó en unos 10 cm, pero ese incremento se ha acelerado significativamente en los últimos 30 años, pasando de 0,85 mm/año entre 1950 y 1977 a 2,2 mm/a entre 1978 y 2009.
- En lo referente a la proyección futura para la costa de la Provincia del Chubut, se ha estimado que además del nivel medio del mar, tanto la energía y dirección de incidencia del oleaje medio, así como la frecuencia de eventos extremos podrían verse incrementados, según surge del análisis de la variación de información histórica.

- La situación descripta es indicativa tanto de la necesidad de profundizar el conocimiento de la compleja problemática descripta como de evaluar la interacción del cambio climático con áreas costeras específicas de la Provincia del Chubut, donde sus efectos podrían tener importantes consecuencias en el sistema costero natural, la infraestructura urbana, portuaria, vial, etc.
- De acuerdo a ello se recomienda el desarrollo de una nueva etapa de este estudio con el objetivo de realizar un análisis más exhaustivo de los datos disponibles, de incorporar en lo posible nueva información y técnicas de análisis que permitan minimizar las incertezas sobre la proyección futura, de evaluar la vulnerabilidad para elementos específicos del sistema costero y de proponer medidas de mitigación adecuadas.

## 9 REFERENCIAS

Church, John A., White, Neil J. "A 20th century acceleration in global sea-level rise". Geophysical Research Letters, VOL. 33, L01602, 2006.

Church, John A., Gregory, Jonathan M., White, Neil J., Platten, Skye M., Mitrovica, Jerry M. "Understanding and Projecting Sea Level Change". Oceanography, Volume 24, Number 2, 2011

Estbrooke Don J. "Shifting of the Pacific Decadal Oscillation from its warm mode to cool mode assures global cooling for the next three decades". Dept. of Geology, Western Washington University, Bellingham, WA. En WUWT, Julio 2008.

Gobierno del Principado de Asturias. "Evidencias y efectos potenciales del cambio climático en Asturias". Octubre 2009

Gray, S.T., et al. "Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) Index Reconstruction". IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology. Data Contribution Series #2004-062. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA. 2004

Hamlington B.D., Leben R.R., Nerem R.S., Han, W., Kim K.-Y. "Reconstructing sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions", Journal of Geophysical Research, 116, C12015, 2011.

IPCC Working Group I. "Contribution to AR5. Climate Change 2013: The Physical Science Basis". 2013.

Kalnay, E. et al. "The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project". Bulletin of the American Meteorological Society 77, 1996.

Losada, Iñigo "El cambio climático en las zonas costeras; previsiones y estrategias de adaptación". Universidad de Cantabria. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Publicación electrónica.

Rahmstorf, Stefan. "*A new view on sea level rise*". Nature Reports. Climate Change. VOL 4, 2010. [www.nature.com/reports/climatechange](http://www.nature.com/reports/climatechange). 2010 Macmillan Publishers Limited.

Rye, Craig D., Naveira Garabato, Alberto C., Holland, Paul R., Meredith, Michael P., Nurser, J. George Hughes, Chris W., Coward, Andrew C, Webb, David J. "*Rapid sea-level rise along the Antarctic margins in response to increased glacial discharge*". Nature Geoscience, Vol. 7 Nro 10 Agosto 2014.

Universidad de Cantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental "*Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe*". 2013