



Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales

INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

ANÁLISIS DE LAS FLUCTUACIONES DEL NIVEL MEDIO DEL MAR A LO LARGO DE 60 AÑOS DE REGISTROS EN LAS COSTAS DE CHILE

DOC ICO 12-2010

Trabajo Presentado en XIII Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar, COLACMAR: "Ciencias marinas: Integración para el desarrollo". Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, 26 al 30 de Octubre de 2009

Trabajo Presentado en XIII Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar, COLACMAR: “Ciencias marinas: Integración para el desarrollo”. Palacio de las Convenciones de La Habana, Cuba, 26 al 30 de Octubre de 2009

Análisis de las fluctuaciones del nivel medio del mar a lo largo de 60 años de registros en las costas de Chile

Manuel Contreras López^(1, 2) y Patricio Winckler Grez⁽¹⁾

(1) Grupo Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. E-mail: patricio.winckler@uv.cl

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad de Playa Ancha. E-mail: manuel.contreras@upla.cl

Análisis de las fluctuaciones del nivel medio del mar a lo largo de 60 años de registros en las costas de Chile

Manuel Contreras López^(1, 2) y Patricio Winckler Grez⁽¹⁾

(1) Grupo Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. E-mail: patricio.winckler@uv.cl

(2) Instituto Tecnológico Universidad de Playa Ancha. E-mail: manuel.contreras@upla.cl

Palabras Claves: Cambio Climático, Series de Tiempo de Larga Duración, Efectos El Niño – Oscilación Sur

Resumen

Las variaciones del Nivel Medio del Mar, NMM, se explican por cambios en el volumen total de los océanos a consecuencia de la dilatación térmica del agua (efecto de las alteraciones en la temperatura a escala global). Otros aportes son el cambio en el balance de masa de los glaciares continentales, las variaciones en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes marinas superficiales.

Para analizar las fluctuaciones del NMM en Chile, se utilizaron siete series horarias del nivel del mar registradas en los principales puertos del país (Arica, Antofagasta, Caldera, Isla de Pascua, Valparaíso, Talcahuano y Puerto Williams) entre 1944 y 2008, proporcionadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Dichos registros fueron sometidos a controles de calidad y están referidos a dátum conocido. En general, el instrumental ha mantenido la misma ubicación, sin

embargo, han existido cambios del tipo de instrumento utilizado. Se les aplicaron filtros Pasa-Bajo para eliminar los efectos de la marea, sin alterar el NMM, y se ajustó una curva de tendencia a las series resultantes.

Los resultados muestran que la variación del NMM en Chile no es homogénea, abarcando tasas de aumento desde +0,318 [cm/año] a descensos de -0,141 [cm/año], estas tasas de variación son menores a las observadas en algunas estaciones de larga data a nivel mundial, no obstante, son comparables a los valores medios a nivel mundial.

Se discuten los efectos de solevantamiento costero o subsidencia provocados por los procesos tectónicos y la actividad sísmica, los cuales a pesar de actuar a nivel local, pueden generar efectos comparables a los causados por el cambio climático.

I. Introducción

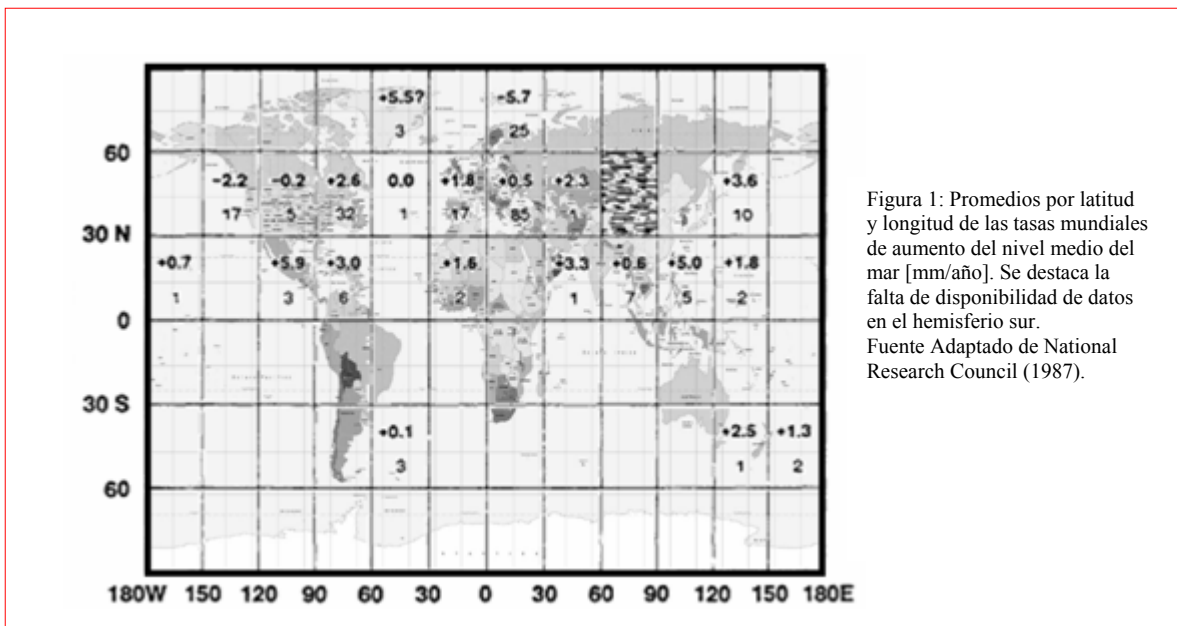
Con el propósito de pronosticar los efectos del cambio climático en las costas del mundo, existen varias iniciativas (Winckler *et al* 2009, EULA 2001, Church 2001) orientadas a analizar las consecuencias del posible aumento del nivel medio del mar, NMM, (Gill & Stolz 2005, USEPA 2009, González 1996). Varios autores han propuesto cifras de tasas de incremento del NMM sobre el análisis de registros mareográficos costeros de larga duración. Dichas tasas oscilan entre pocos milímetros a centímetros por año (Winckler *et al* 2009, USEPA 2009, Rahmstorf 2007, Ros 1993, Slovinsky & Dickson 2006) y se obtuvieron principalmente sobre la base de registros en el hemisferio norte (NRC 1987), donde se encuentra el mayor número de estaciones mareográficas de larga duración (figura 1).

Las fluctuaciones del NMM se pueden explicar por fenómenos eutásticos (cambios debido al volumen del agua de los océanos) y fenómenos isostáticos (cambios en el nivel de la tierra). Esto implica que las tasas de cambio del nivel del mar son

representativas a nivel geográfico local (NRC 1987). Por este motivo, es importante conocer lo que está ocurriendo en las costas de Chile, y compararlo con el comportamiento a nivel global. El presente trabajo tiene como objetivo:

- Realizar una primera estimación de las tasas de cambio del NMM a lo largo de las costas de Chile
- Establecer posibles hipótesis que expliquen las diferencias de las tasas de cambio estimadas, con respecto a otras localidades del mundo.
- Proponer una metodología para efectuar estudios más finos, que tengan en cuenta los escasos registros disponibles.

Las variaciones del nivel del mar de naturaleza eutástica se explican principalmente por cambios en el volumen total de los océanos a consecuencia de la dilatación térmica del agua como efecto de las alteraciones en la temperatura a escala global (IPCC 2001). Otros aportes son el cambio en el balance de masa de los glaciares continentales, las variaciones en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes marinas superficiales (EULA, 2001).



De esta forma, el nivel instantáneo de la superficie del mar es resultado de la superposición de diferentes fenómenos:

- Cambios en el NMM (tendencia), que se explican por variaciones en el volumen total del océano por la expansión térmica y el cambio en el balance de masa, y efectos isostáticos.
- Mareas, que explican su variabilidad con la superposición de ciclos regulares que actúan a diferentes escalas: desde semi-diurno a inter-decadales.
- Meteorológicos, que alteran el nivel del mar por acción de la presión atmosférica y el viento.
- Ciclos irregulares, como los efectos generados por el fenómeno de El Niño.

Estas fluctuaciones al ser analizadas en una escala de tiempo corta, implican que la señal de nivel del mar no es necesariamente estacionaria, lo que dificulta la confiabilidad de los pronósticos y detección de posibles tendencias. En la figura 2 se ilustran los cambios experimentados en la serie registrada en Caldera, entre los años 1951 y 2006. Para comprender si existen cambios a largo plazo, se utiliza el nivel medio del mar, NMM, que es el promedio resultante de todas las pleamares y las bajamares en un mes (Gregory 2006).

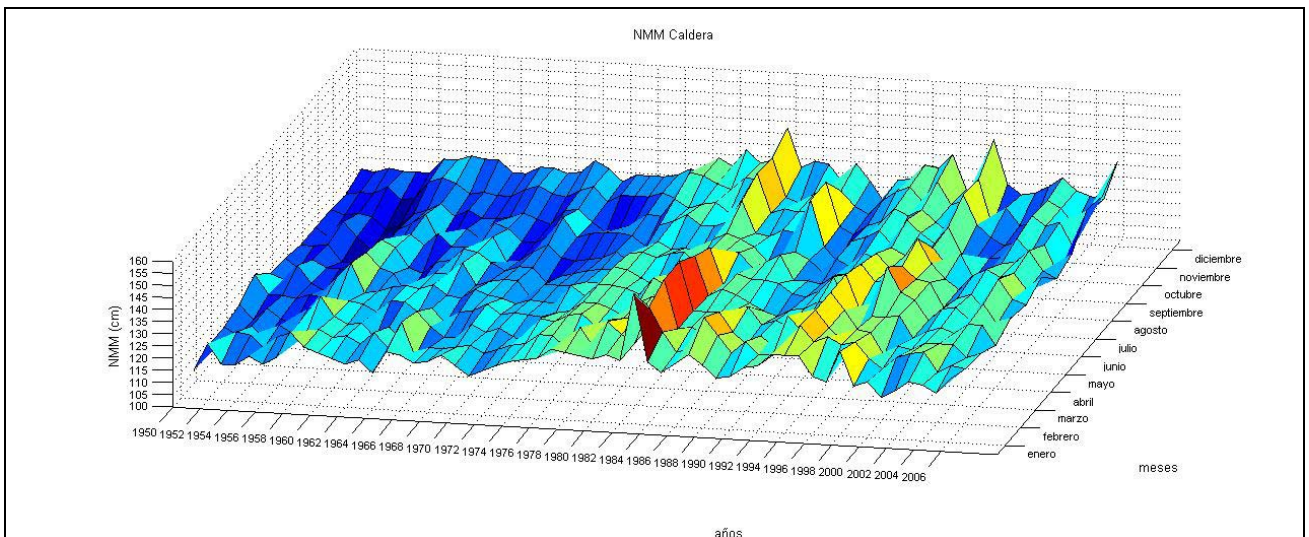


Figura 2: Vista 3D de la evolución de los promedios mensuales del nivel del mar horario registrado en Puerto Caldera entre los años 1951 y 2006. En el plano se han ordenado los meses (eje Y) por años (eje X) y la vertical (eje Z) se gráfica el promedio del nivel del mar en [cm] alcanzado.

II. Datos Disponibles

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA, mantiene una red de registros mareográficos a lo largo de la costa de Chile, cuyas estaciones y tiempos de registros son mostrados en la figura 3. La red registra el nivel del mar cada una hora, y sólo en algunas localidades dicho registro ha perdurado en el tiempo por más de 40 años. Además, como se aprecia en la figura 3, salvo las series de Antofagasta y Talcahuano, ellas presentan brechas de datos faltantes de importante extensión.

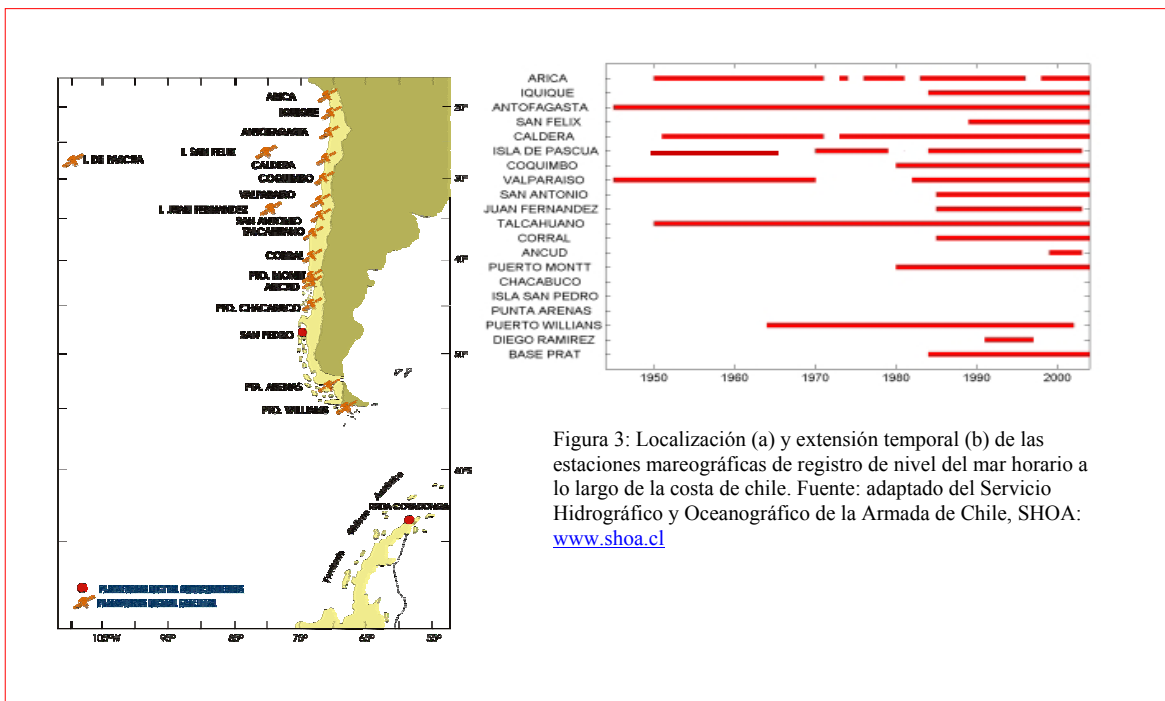


Figura 3: Localización (a) y extensión temporal (b) de las estaciones mareográficas de registro de nivel del mar horario a lo largo de la costa de Chile. Fuente: adaptado del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA: www.shoa.cl

Se seleccionaron las siete series cuya extensión de registro supera los 40 años. Ellas fueron proporcionadas por el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC), dependiente del SHOA, y corresponden a las localidades de: Arica, Antofagasta, Caldera, I. de Pascua, Valparaíso, Talcahuano y P. Williams. En la Tabla I se resumen las principales características de cada una de las series.

Tabla I Detalle de estadísticas utilizadas en el análisis del nivel del mar.

Estación	Latitud	Longitud	Duración	Inicio	Término	Nº datos	% Gaps
Arica	18°28'26"S	70°19'16"W	59 años	06/12/1950	31/12/2008	502.584	20,11
Antofagasta	23°38'57"S	70°24'09"W	64 años	06/12/1945	30/11/2008	556.322	7,93
Caldera	27°03'49"S	70°49'25"W	57 años	01/12/1950	30/11/2006	491.640	6,60
I. de Pascua	27°09'16"S	109°27'33"W	51 años	16/01/1957	29/04/2008	449.591	35,41
Valparaíso	33°01'38"S	71°37'33"W	65 años	02/01/1944	29/04/2008	563.904	21,54
Talcahuano	36°42'17"S	73°06'44"W	60 años	01/08/1949	29/06/2008	516.432	9,14
Pto. Williams	54°55'54"S	67°36'32"W	40 años	04/11/1964	01/04/2005	354.288	8,43
Total						3.434.761	15,59

Las siete series horarias de larga duración, en su conjunto comprenden más de 3,4 millones de datos de nivel del mar, y presentan diferentes grados de calidad, pues las series de Caldera, Antofagasta, Talcahuano y Puerto Williams tienen un número dos o tres veces inferior de problemas con respecto a las series de I. de Pascua, Arica y Valparaíso.

Dichos registros se sometieron a controles de calidad y fueron referenciados a un dátum conocido. En general, el instrumental mantuvo la misma ubicación a través del tiempo, sin embargo han existido cambios con respecto de la tecnología instrumental utilizada: inicialmente se utilizaron mareógrafos estándar a flotador con registro gráfico, los que fueron reemplazados entre los años 1980 y 1985 por equipos Metercraft que operan con el sistema de burbuja neumática registrando la presión hidrostática de la columna de agua. A partir del año 1999, se renovó la red nacional, utilizando instrumentos digitales con la opción de transmisión satelital de los datos recolectados, sistema que se mantiene vigente hasta la fecha.

Es importante considerar estos cambios de instrumentos, pues pueden ser una explicación alternativa a las fluctuaciones encontradas en el nivel medio del mar, tal como se ilustra en la figura 4.

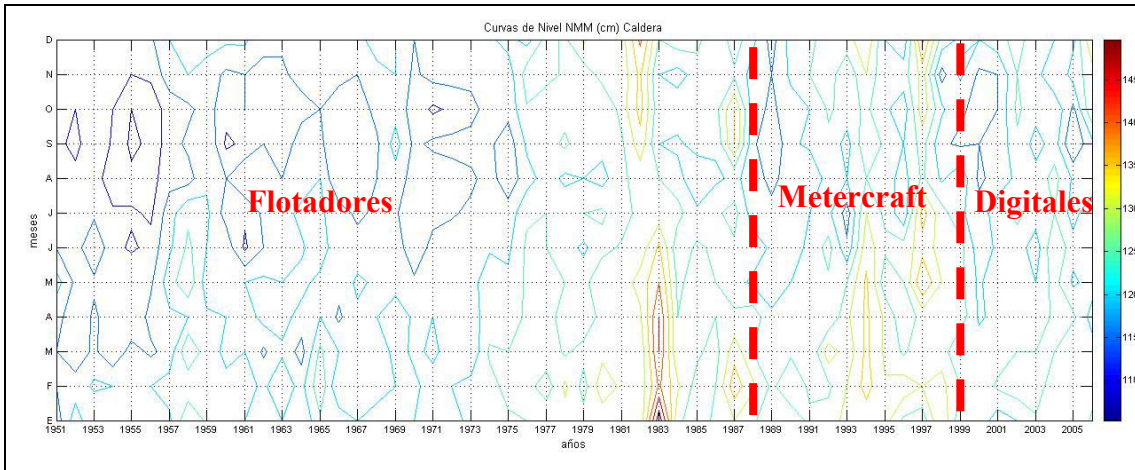


Figura 4: Curvas de nivel del NMM registrado en Caldera entre los años 1951 y 2006. Se han señalado de manera aproximada las épocas en que ha cambiado la tecnología de registro.

III. Metodología

La metodología de análisis se basó en reconocer que existen diversas fluctuaciones sobre el NMM (Rahmstorf 2007, Ros 1993, Gregory 2006). Esas fluctuaciones pueden ser explicadas por efectos astronómicos (mareas a distintas escalas: semidiurno y diurno, mensual, anual, e interdecadal como el ciclo de Metón), efectos Estacionales (mareas meteorológicas asociadas a los apilamientos por viento y oleaje) y variaciones cíclicas irregulares (paso de ondas Kelvin asociadas al ENOS). En la figura 5 se ilustran estas fluctuaciones para la serie de promedios mensuales de registros en Caldera.

Siguiendo el análisis clásico de series de tiempo, se asume que el nivel instantáneo del mar en t , corresponde a la suma de:

- Una tendencia o nivel medio del mar (NMM_t) para el instante t
- Estacionalidades y variaciones cíclicas regulares asociados a efectos astronómicos en diversas escalas de tiempo (E_t)
- Variaciones cíclicas irregulares de baja frecuencia asociadas a ondas Kelvin (C_t).
- Fluctuaciones aleatorias o ruido (R_t).

Es decir: $x_t = NMM_t + \sum_j E_t^j + \sum_j C_t^j + R_t$

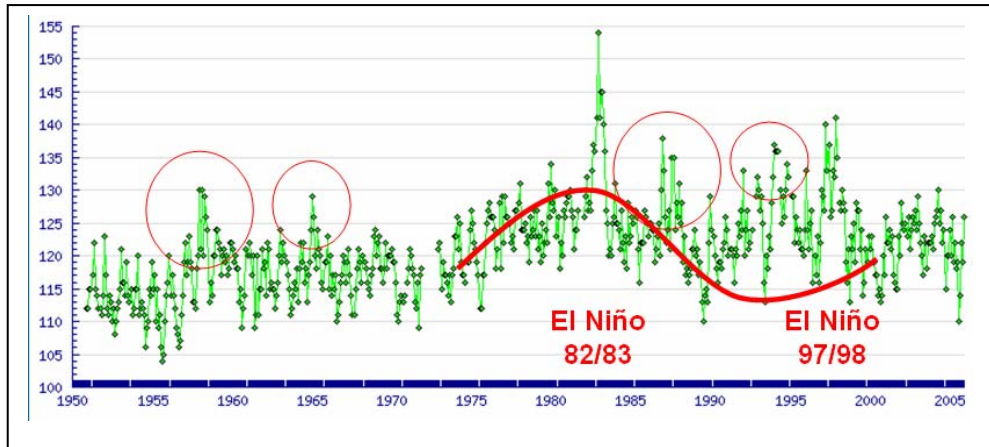


Figura 5: Promedios mensuales del nivel del mar horario registrado en Puerto Caldera entre los años 1951 y 2006. Se destaca un ciclo de Metón, las alteraciones en 20 a 30 cm producidas por el paso de las ondas Kelvin asociadas a los ENOS de los años 82 – 83 y 97 – 98. Además se han marcado peaks atribuibles a otros niños

Se les aplicaron filtros Pasa-Bajo para eliminar los efectos de la marea, sin alterar el NMM, y se ajustó una curva de tendencia a las series resultantes.

Todas las series presentan *gaps* de diferente extensión (desde una hora faltante, hasta meses y en algunos casos años completos, como es el caso de Valparaíso e Isla de Pascua). En la Tabla I se muestra el porcentaje total de *gaps* y *outliers* presentes para cada registro. Se destaca que en promedio, las series presentan un 15% de problemas, y tres de ellas superan el 20%. Esto motiva a utilizar filtros no lineales para evitar la pérdida adicional y excesiva de datos al aplicar promedios móviles u otros filtros lineales.

Para superar los *gaps* y *outliers* detectados en las series de nivel del mar, en una primera aproximación se adoptó el criterio de interpolar linealmente aquellas situaciones de extensión de 1 ó 2 datos (1 ó 2 horas). Para situaciones de mayor extensión, se interpoló con una tendencia lineal ajustada para minimizar el error cuadrático, técnica robusta, pues no requiere contar con una serie equiespaciada.

Se adoptó este criterio en vez de una técnica clásica de correlación cruzada con una serie vecina o una autocorrelación (Broenkow & Breaker, 2005; Breaker & Broenkow, 2005), pues al ser el objeto de estudio general los cambios de comportamiento de gran escala en el tiempo y no las fluctuaciones horarias, se evita así alterar la estimación de la tendencia lineal.

Las series equiespaciadas resultantes fueron analizadas con filtros lineales pasa-bajo (Doodson AD0X y Savinski-Golay) o no lineales (Godin) para evitar la pérdida excesiva de datos y representar correctamente las fluctuaciones extremas (Contreras, 2001). El filtro Doodson en particular, permite eliminar las fluctuaciones diarias atribuibles a la marea (Gómez, 1994). El filtro Savinski-Golay, tiene la propiedad de eliminar las fluctuaciones de alta frecuencia, conservando los valores extremos.

Las series filtradas fueron analizadas con una estadística clásica, asumiendo que ya no son influenciadas con los efectos de las mareas, permitiendo de esta manera estimar cambios en el nivel medio del mar.

Por último, a las series resultantes se le ajustó una tendencia lineal, la que se asume corresponde a la evolución que experimenta el nivel medio del mar.

Para mejorar la claridad e interpretación de los datos, se graficaron: La serie filtrada, el ajuste lineal de la tendencia, la banda del 65% de confianza, los valores máximos alcanzados en cada año y un ajuste lineal de estos valores extremos.

IV. Resultados

A continuación se detallan los principales resultados obtenidos para cada una de las siete localidades analizadas.

IV.1. Arica (18.5° S)

En Arica se aprecia que el NMM ha disminuido un total a 82 [mm] en 58 años de registros, lo que equivale a una tasa de cambio equivalente a -1.4 [mm/año].

En la figura 6a se muestra la variación temporal del promedio mensual del nivel del mar en esta localidad. Visualmente es posible constatar que, en los primeros 30 años, el promedio mensual del nivel del mar oscilaba entorno a los 163 [cm]; para pasar, en los últimos 30 años a variar en torno a los 158 [cm].

En la figura 6b se muestra la variación de los promedios anuales del nivel del mar, después de filtrados para eliminar el efecto de las mareas y las otras fluctuaciones presentes que no corresponden a cambios en la tendencia. En la misma figura, también se han ilustrado la banda de confianza del 67% de la variación con respecto a los valores centrales (NMM), los valores máximos encontrados y los ajustes lineales tanto para el NMM, como los valores máximos. Se observa que tanto el ajuste lineal del NMM como el de los máximos encontrados en cada año, tienen pendientes negativas. Se observa que los máximos se localizan a una distancia del NMM estimado equivalente a 3 veces la desviación estándar (banda de confianza del 65% indicada en la figura), esto revela que aun cuando es factible encontrar variaciones de más de 1 [m] del nivel instantáneo del mar con respecto al NMM estimado en todos los años analizados, estos sucesos son bastante escasos.

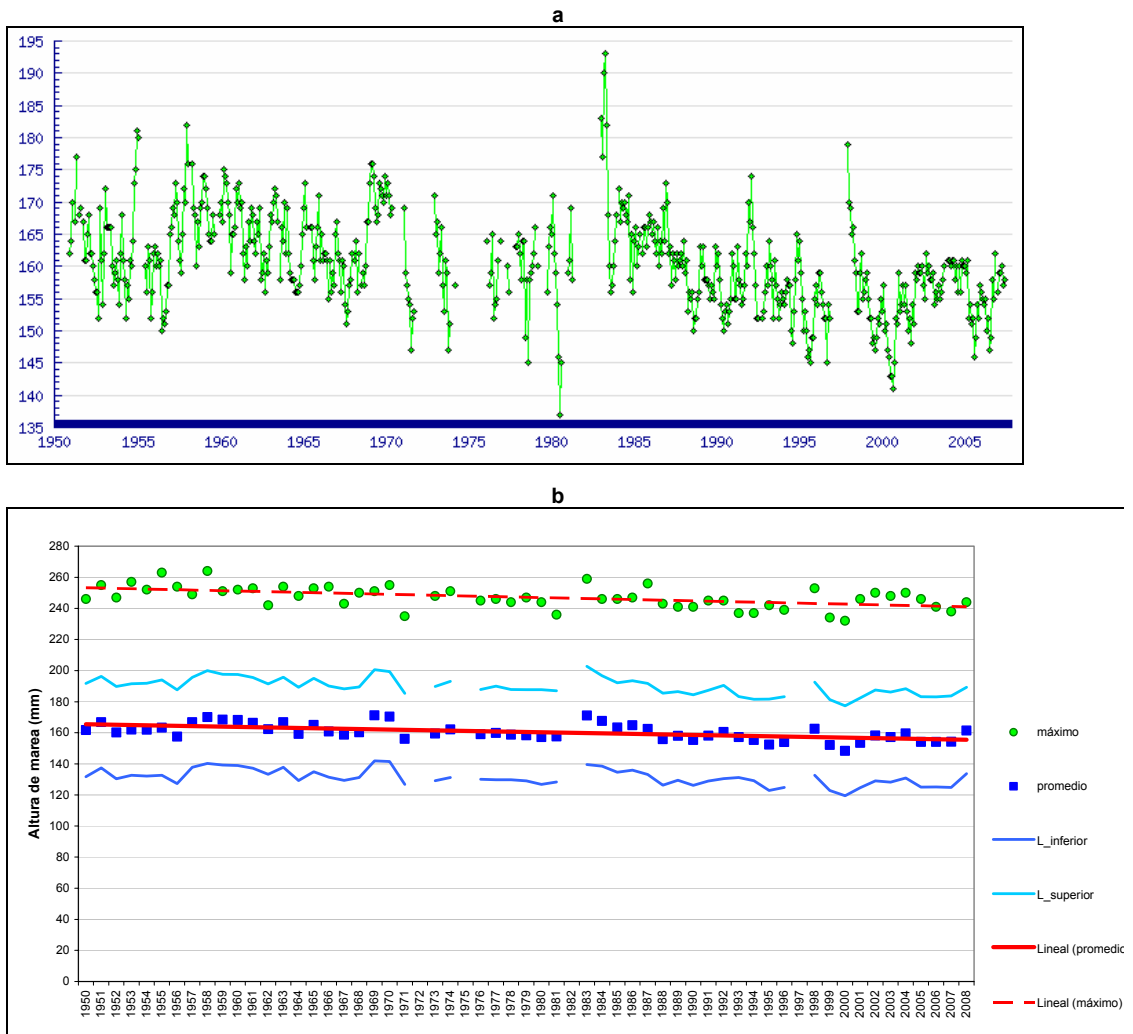


Figura 6: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en Arica entre los años 1950 y 2008 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

IV.2. Antofagasta (23.6° S)

En Antofagasta también se aprecia que el NMM ha disminuido en torno a 55 [mm] registro 63 años de estadística, correspondiente a una tasa de cambio de -0.9 [mm/año]. Esta tasa es un 36% menor a la determinada para Arica.

En la figura 7a se muestra la variación temporal de los promedios mensuales del nivel del mar para en esta localidad, donde además de apreciar la evidente disminución de estos promedios, también es posible constatar un aumento en la variabilidad de las serie a partir del año 1974, donde se alcanzaron los mínimos históricos del registro.

Salvo el primer año, donde la tendencia de ajustes lineales por año muestra un valor extraordinariamente positivo de 0.02, éstas oscilan en valores que van desde -0.003 a +0.004. Esto revela que posiblemente existe algún problema con el registro durante los años 1945 y 1946. Al descontar esa situación, se aprecia una enorme variación en los años 1981–1983 y 1999–2000, lo que podría evidenciar alguna relación con El Niño. Estos efectos no se apreciaban tan claros en la serie correspondiente a Arica, debido a los *gaps* que tenía dicha serie.

En la figura 7b se muestran los ajustes lineales del NMM y de los valores máximos alcanzados. Se observa que en Antofagasta, aún cuando el ajuste lineal del NMM tiene una pendiente negativa, los valores máximos alcanzados parecen mantenerse estacionarios. Sólo en algunos años los máximos encontrados superan 1 [m] su distancia al NMM, siendo más común una diferencia de 80 [cm]. Sin embargo, al igual que en el caso de Arica, la distancia del NMM estimado equivalente a 3 veces la desviación estándar.

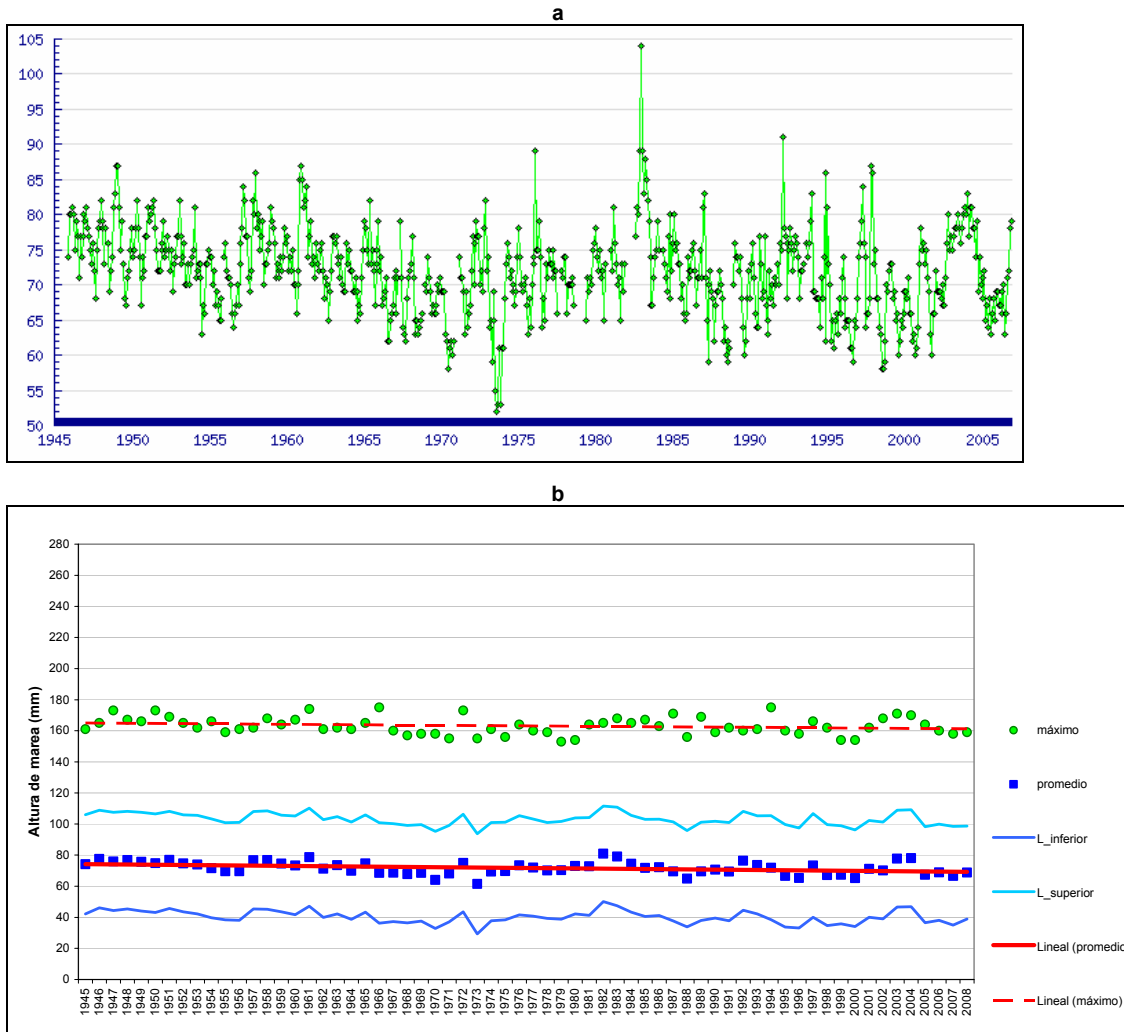


Figura 7: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en Antofagasta entre los años 1945 y 2008 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

IV.3. Caldera (27° S)

En esta localidad se aprecia un notorio cambio con respecto al comportamiento del NMM en Arica y Antofagasta. En este caso se constata un aumento en torno a 69 [mm] en 58 años de registro, lo que equivale a una tasa de incremento del NMM de 1.2 [mm/año].

En la Figura 8a se muestra los promedios mensuales del nivel del mar para Caldera, donde al igual que en Antofagasta son notorios los efectos de los Niños 82 – 83 y 98 – 99. En la figura 8b se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Caldera, el ajuste lineal del NMM y los valores extremos, cuyo ajuste también tiene una pendiente positiva.

IV.4. Isla de Pascua (27.2° S; 109.5° W)

En I. de Pascua se aprecia que el nivel del mar ha aumentado en torno a 162 [mm] en 51 años de registros, equivalente a una tasa de incremento del NMM de 3.2 [mm/año]. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la serie presenta varios datos faltantes por intervalos de algunos años, lo que dificulta su interpretación (figura 9a).

En la figura 9b se muestra el ajuste lineal de la variación temporal del NMM. Las pendientes parecen ser cada vez más positivas, y oscilan entre valores que van desde -0.002 a +0.006 (salvo el año 1963, que posiblemente puede tener un problema en su registro). El ajuste lineal de la variación de eventos máximos revela que son muy pocos los años donde estos eventos se alejan 60 [cm] del NMM. Sin embargo se observa que en este caso la pendiente del ajuste lineal de los valores extremos es mayor que la del ajuste del NMM, por lo que se debiera esperar un incremento en estas distancias en el futuro.

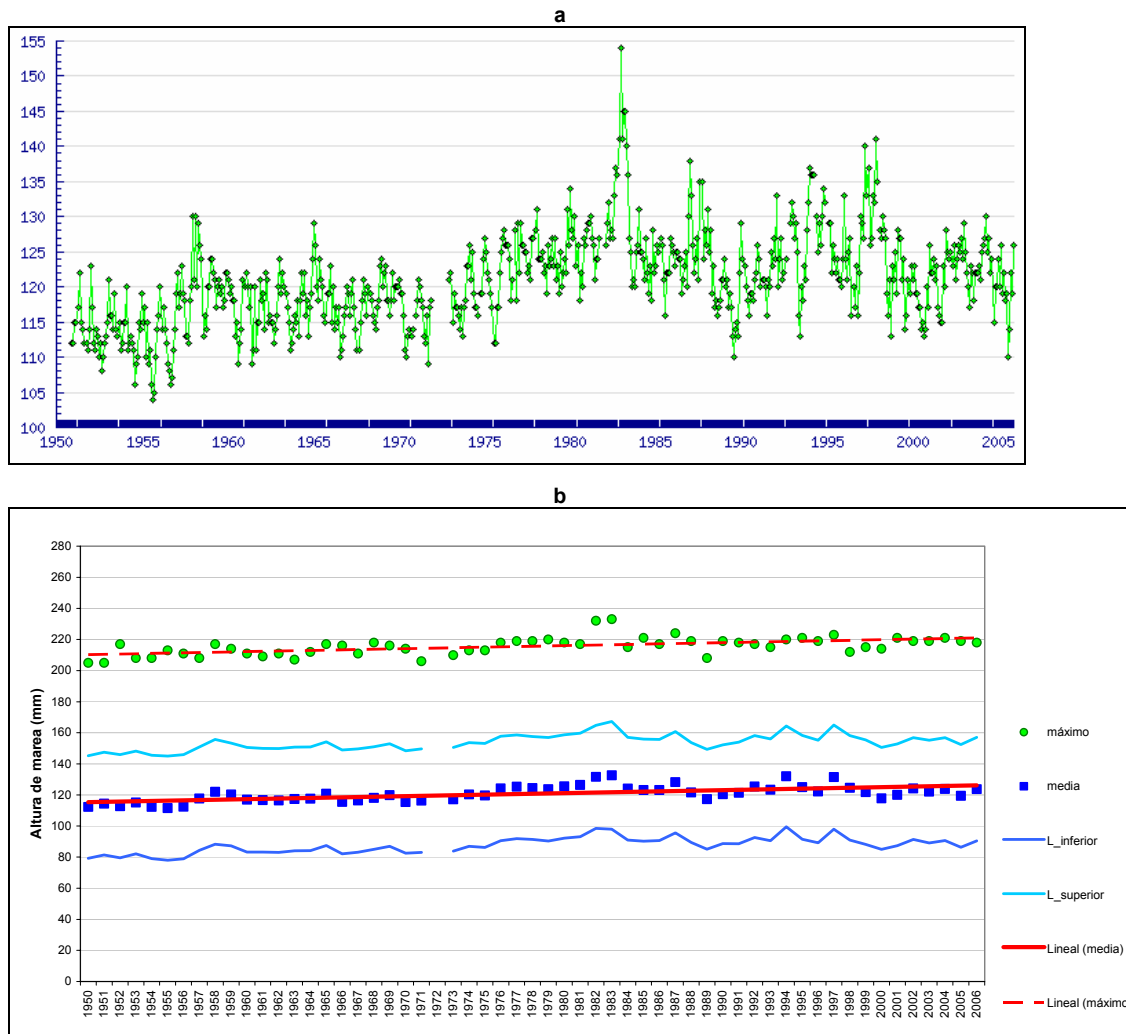


Figura 8: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en Caldera entre los años 1950 y 2006 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

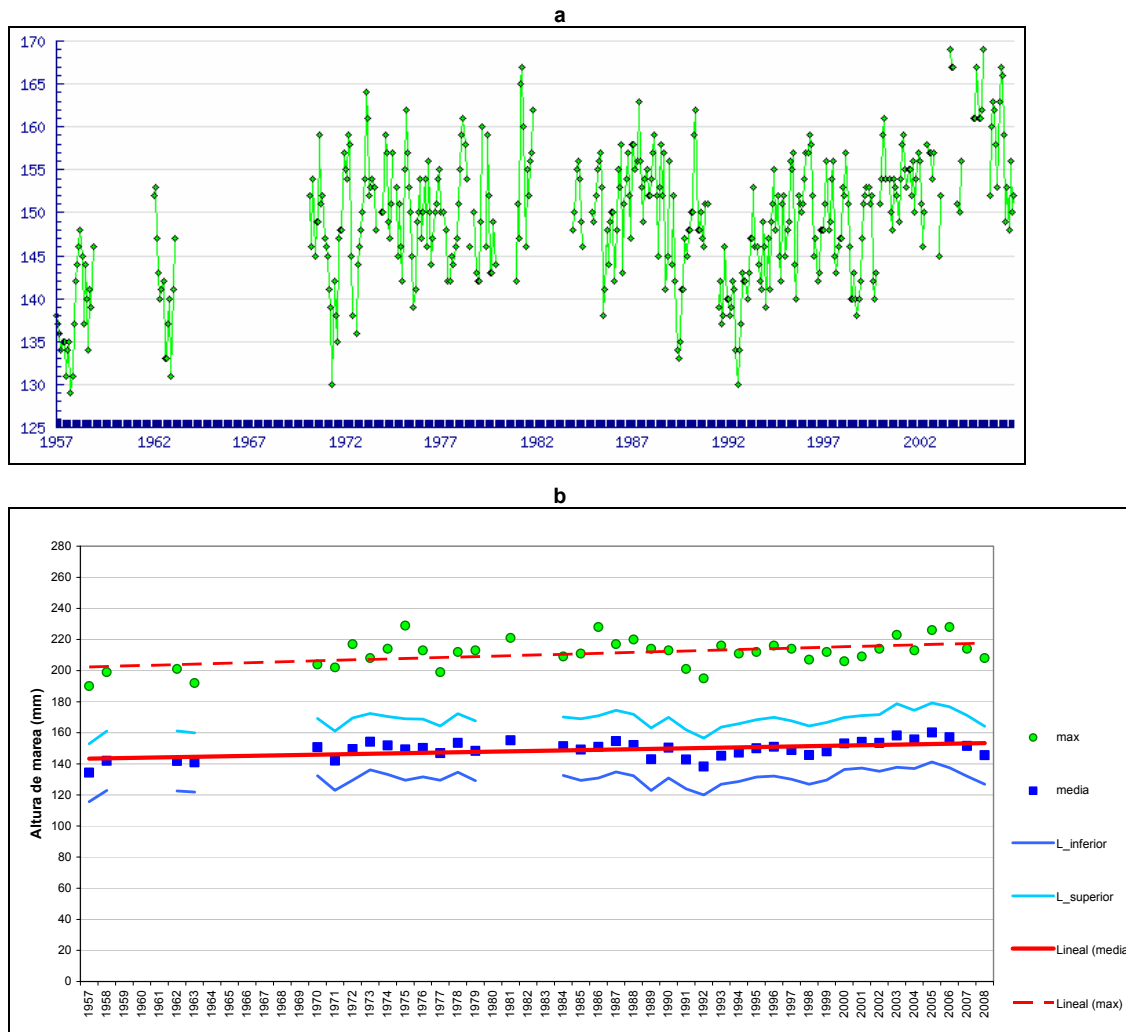


Figura 9: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en I. de Pascua entre los años 1957 y 2008 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

IV.5. Valparaíso (33° S)

Se aprecia que el nivel del mar ha aumentado en torno a 6 [mm] en 58 años de registros en Valparaíso. Sin embargo, la serie presenta datos faltantes en casi toda la década del 70 (figura 10a), lo que probablemente influye en la confiabilidad de esta estimación.

En la figura 10b se muestra la variación temporal del ajuste de NMM en Valparaíso, la que tiene una pendiente negativa aunque muy cercana a cero. Al estimar la tasa de cambio del NMM por la razón entre el aumento total y la cantidad de años de registros, se obtiene un incremento de 0.1 [mm/año]. Esta aparente contradicción es efecto del *gaps* de 10 años presente en la mitad de la serie.

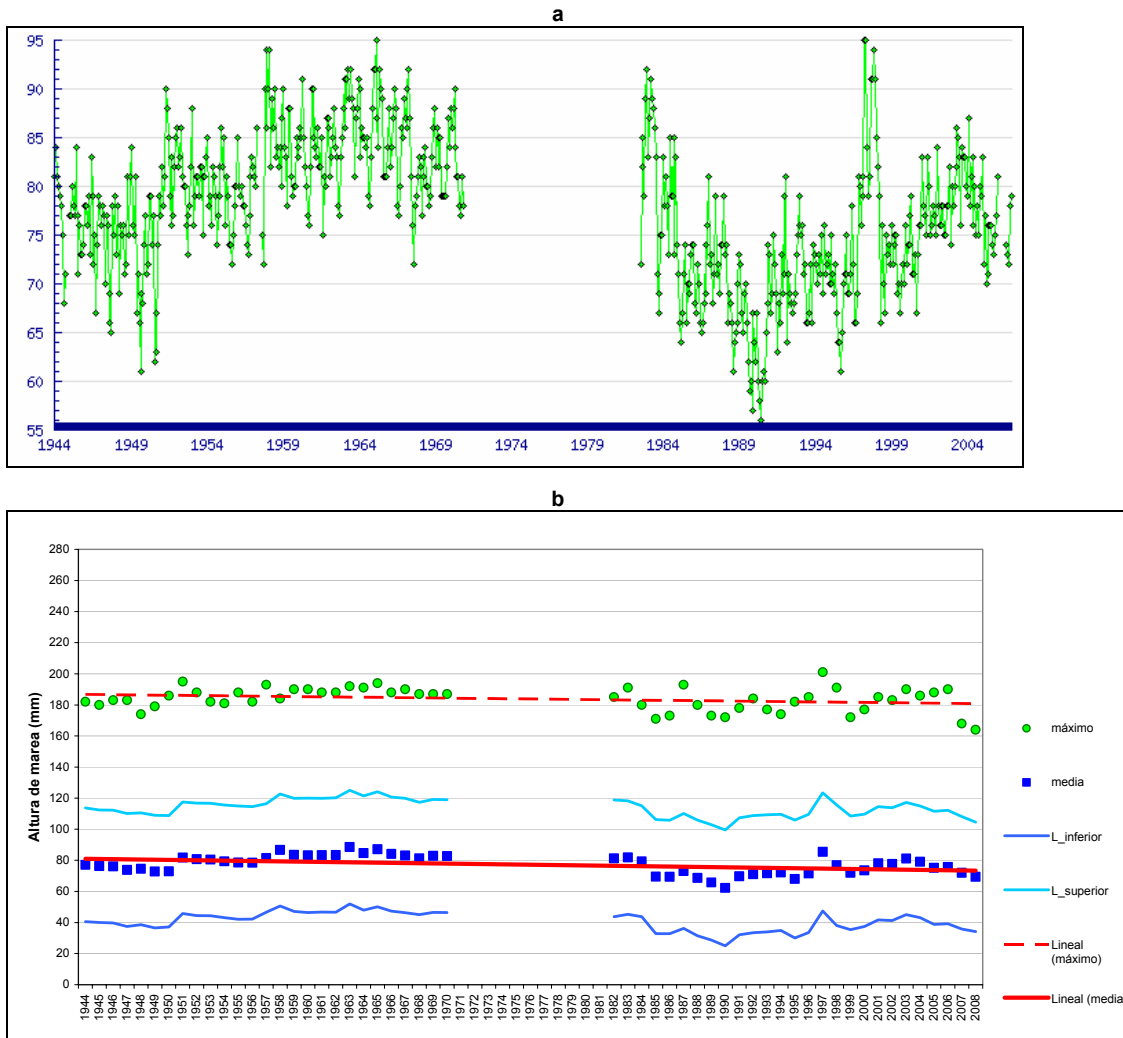


Figura 10: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en Valparaíso entre los años 1944 y 2008 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

IV.6. Talcahuano (39° S)

En Talcahuano se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha aumentado en torno a 88 [mm] en 59 años, que corresponde a una tasa de incremento anual del orden de 1.5 [mm]. En la figura 11a se muestra los promedios mensuales del nivel del mar y en la figura 11b el ajuste lineal de las variaciones de NMM, junto al ajuste de los valores máximos anuales. Se aprecia que en varios años se superan los 1.2 [m] de distancia entre los valores extremos y el NMM.

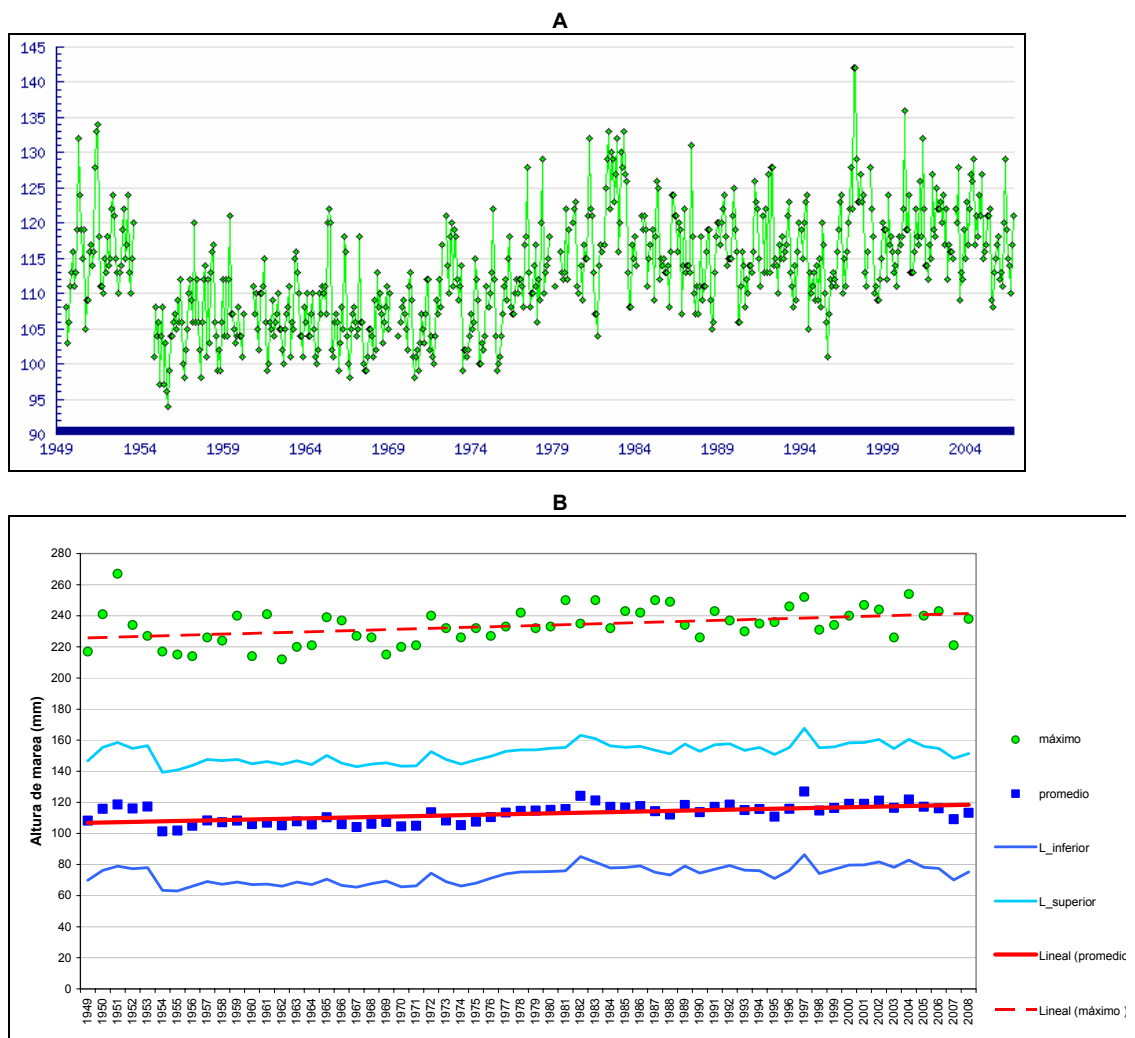


Figura 11: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en Talcahuano entre los años 1949 y 2008 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

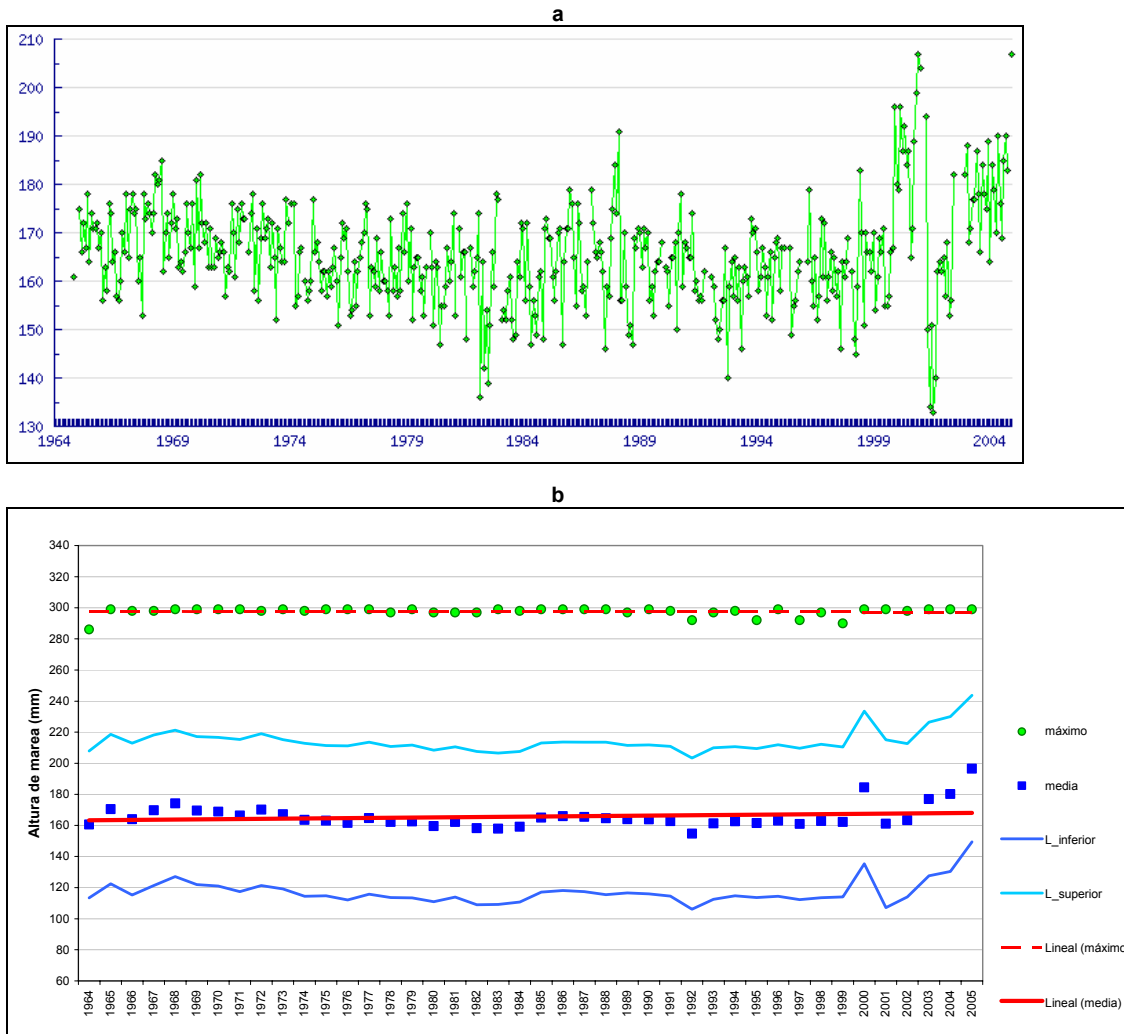


Figura 12: Evolución de los promedios mensuales del nivel del mar en [cm] registrados en Puerto Williams entre los años 1964 y 2006 (a) y Ajuste lineal del cambio experimentado en el NMM y los eventos extremos anuales (b).

IV.7. Puerto Williams (55° S)

Por último, en P. Willimans, se aprecia que el nivel del mar ha aumentado en torno a 90 [mm] en 41 años de registros, que corresponde a una tasa de ascenso del NMM del orden de 2.2 [mm/año]. Sin embargo la figura 12a muestra un cambio de comportamiento entre el siglo XX, con un aparente descenso del NMM, y el actual siglo, donde el NMM se encuentra en un importante ascenso, dando como resultado la tasa estimada.

La figura 12b muestra que el ajuste lineal no es adecuado para interpretar las variaciones del NMM en esta localidad, el cual presenta unas oscilaciones interdecadales importantes, intercambiando ascensos y descensos del nivel del mar. El ajuste de los valores extremos en cada año, muestra una estabilidad en este parámetro. Sin embargo se debe observar que la distancia entre los valores extremos y el NMM, que históricamente fluctuaba en el orden de 1.4 [m], se encuentra disminuyendo.

Es importante destacar la importante variabilidad que muestran estos registros, lo que se expresa en que la distancia entre los valores extremos y el NMM estimado, ahora bordea 2 veces la desviación estándar. Esto es evidencia de que una mayor proporción de valores instantáneos del nivel del mar se alejan del NMM, alcanzando valores extremos.

V. Discusión y Conclusiones sobre el cambio del nivel del mar

Los resultados muestran que la variación del NMM en Chile no es homogénea, abarcando tasas de aumento desde +3,2 [mm/año] a descensos de -1,4 [mm/año]. Estas tasas de variación son menores a las observadas en otras estaciones de larga data a nivel mundial que pueden registrar cambios de centímetros por año (tabla II y figura 13), no obstante, son comparables a los valores medios a nivel mundial (figura 1).

Tabla II Tasas de variación media anual de estaciones de larga data en el mundo (USEPA, 2009)

Localidad	Latitud	Tiempo [año]	Variación anual [cm/año]
Sitka (Alaska)	57°03'N	42	-2.5
Newlyn	50°06'N	65	1.7
Brest	48°23'N	141	0.9
Halifax (Nova Scotia)	44°40'N	62	3.7
San Francisco	37°48'N	127	3.8
Honolulu	25°29'N	76	1.6
Bombay	18°55'N	101	1.0
Sydney (New South Wales))	33°51'S	85	0.7

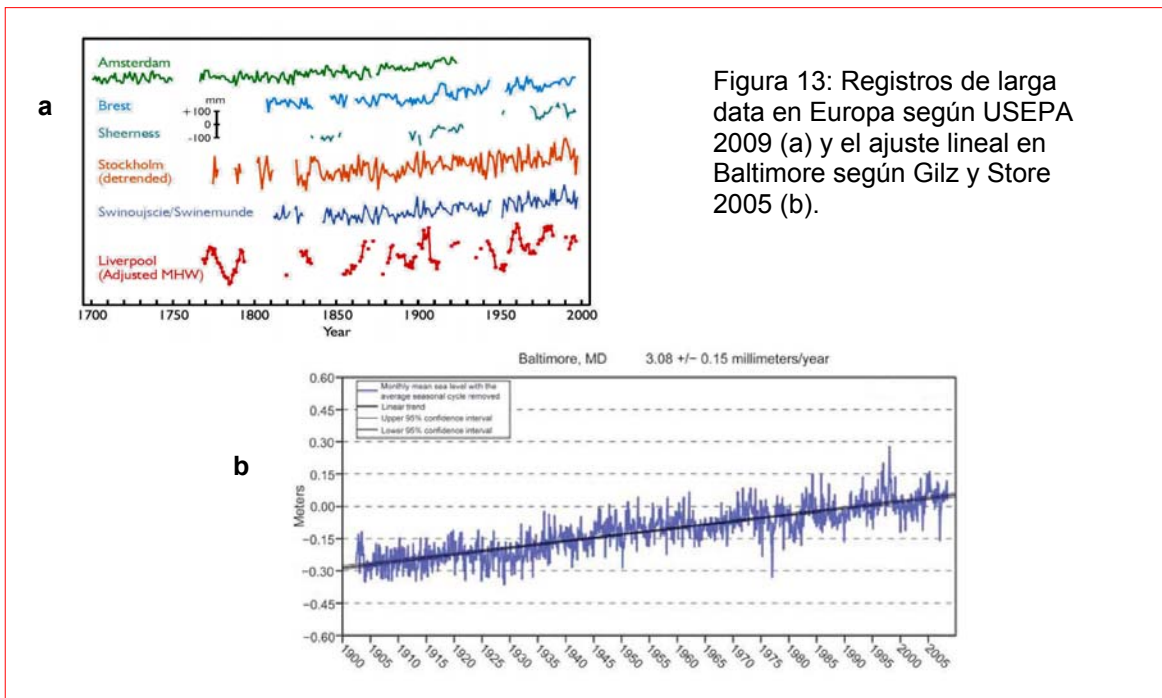


Figura 13: Registros de larga data en Europa según USEPA 2009 (a) y el ajuste lineal en Baltimore según Gilz y Store 2005 (b).

En la tabla III se muestran las tasas de cambio estimadas para cada localidad. Destacan los registros al norte del trópico de capricornio (Arica y Antofagasta), donde el NMM del mar estaría descendiendo. Esto aparentemente contradice las estimaciones realizadas a partir de los datos de altimetría de las misiones TOPEX/POSEIDON (USEPA 2009), que estiman para la zona un ascenso del nivel del mar (figura 14). Sin embargo, se debe tener en cuenta que dichas misiones corresponde al período 1993 – 1998, por lo que se encuentran afectadas por el fenómeno El Niño del año 1998 – 1999 y en esta corta ventana de tiempo el nivel del mar en ambas localidades estaba en ascenso (figuras 6a y 7a).

Tabla III Tasa de variación media anual de estaciones mareográficas en Chile.

Localidad	Variación total [mm]	Tiempo [año]	Variación anual [mm/año]
Arica	- 82	58	- 1,4
Antofagasta	- 55	63	- 0,9
Caldera	+ 69	58	+ 1,2
Isla de Pascua	+ 162	51	+ 3,2
Valparaíso	+ 6	58	+ 0,1
Talcahuano	+ 88	59	+ 1,5
Puerto Williams	+ 90	41	+ 2,2

Lo anterior permite concluir que, aunque el comportamiento principal del nivel medio del mar en las costas de Chile pareciera no tener grandes fluctuaciones en el tiempo, se encontró evidencia de cambios cíclicos asociados a fenómenos ENOS, con años Niño donde el nivel del mar puede alcanzar aumentos de hasta 30 [cm] sobre la tendencia, y años Niña con disminuciones del mismo orden.

La razón por que el NMM estaría descendiendo en el norte del país, parece encontrarse en una explicación isostática, debido a la confluencia de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana (Winckler *et al* 2009), que estarían provocando un ascenso de la tierra y por consiguiente de las referencias con respecto a las cuales se registra el nivel del mar.

Isla de Pascua es la estación de registro con mayores tasas de incremento del NMM. Destaca también el caso de Puerto Williams, donde durante el siglo XX el NMM estaba descendiendo (se puede suponer como consecuencia de un rebote isostático debido a la desaparición de los glaciales), para pasar a una situación actual donde el NMM se encuentra en una importante fase de aumento.

Agradecimientos

El presente trabajo fue posible gracias a la valiosa colaboración del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA, quién a través de su Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile, CENDHOC, facilitó los datos del nivel del mar en puertos chilenos.

El centro de Cambio Climático de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, financió parcialmente este trabajo en el marco de la elaboración del informe: Efectos de Cambio Climático en las Costas de Chile, como parte del documento CEPAL: Economía del Cambio Climático en Chile. Síntesis. Por último la Universidad de Playa Ancha financió parcialmente su presentación en el XIII COLACMAR.

Referencias Bibliográficas

Breaker L y W. Broenkow (2005). Reconstructing an 83-Year Time Series of Daily Sea Surface Temperature at Pacific Grove, California. Moss Landing Marine Laboratories. Technical Report.

Broenkow W y L. Breaker (2005). A 30-Year History of Tide and Current Measurements in Elkhorn Slough, California. Moss Landing Marine Laboratories. Technical Report.

Church J (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Disponible en: www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/.

Contreras M (2001). Introducción al Análisis de Series de Tiempo para Oceanografía y Geociencias. Estudios y Documentos de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. (N°15/01). R.P.I. N°123194.

EULA (Abril 2001). Análisis de Vulnerabilidad y Adaptación en Zonas Costeras y Recursos Pesqueros. Centro de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción.

Gill S. y A. Stolz (2005). Relative long-term sea level trends: how are they determined and what do they tell us?. Disponible en: www.csc.noaa.gov/cz/2005/CZ05_Proceedings_CD/pdf%20files/StolzSeaLevel.pdf.

Gómez J (1994). Cambios seculares del nivel medio del mar y predicción de mareas por el período Caldeo en el puerto de La Coruña. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 10(2): 125 – 146.

González M (1996). Global Environmental Trends and Probable Impacts on the Coasts of South American Mid-Latitudes. Journal of Coastal Research 12(4): 1034 – 1037.

Gregory J (2006). Changes in sea level. Talk, CGAM and Hadley Centre, UK.

IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis, Third Assessment Report.

National Research Council (1987). Responding to Changes in Sea Level: Engineering Implications. Committee on Engineering Implications of Changes in Relative Mean Sea Level, Marine Board. ISBN: 0-309-59575-4, 160 pp. Disponible en: www.nap.edu/catalog/1006.html.

U.S.E.P.A. (2009). Coastal Sensitivity to Sea Level Rise: A Focus in the Mid-Atlantic Region [e-book]. Disponible en: www.climate-science.gov/Library/sap/sap4-1/final-report/sap4-1-final-report-all.pdf.

Rahmstorf S (2007). A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise [online]. Disponible en: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1135456>

Ros J (1993). El cambio climático y la subida del nivel del mar. Centro de Estudios de Técnicas aplicadas. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación. 74 p. (Monografías: ISSN 0211-8203 M23).

Slovinsky P y S. Dickson (2006). Impacts of Future Sea Level Rise on the Coastal Floodplain. Disponible en: www.maine.gov/doc/nrimc/mgs/explore/marine/sea-level/contents.htm.

Winckler P, M. Contreras, I. Sepúlveda, G. Barbet & M. Molina (2009). Efectos del cambio climático en las costas de Chile. Informe preparado para el Centro de Cambio Climático de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Grupo de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso. Disponible en www.ingenieriaoceanica.cl (Documento ICO 01-2009).