



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

**“RELACIÓN ENTRE LAS OSCILACIONES DEL NIVEL DEL
MAR DEL OCÉANO PACÍFICO Y LAS VARIACIONES DEL
NIVEL DEL MAR EN LA COSTA DEL ECUADOR”**

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

OCEANÓGRAFO

Presentada por:

ZENEIDA ELIZABETH WONG CHANG

GUAYAQUIL – ECUADOR

2011

AGRADECIMIENTO

Primeramente a Dios, quien me dio la vida y puso en mi camino a todos aquellos que me apoyaron todo este tiempo.

A Freddy Hernández, promotor del tema de la presente tesis, quien me brindó su apoyo incondicional y estuvo ahí para hacer que me levante de mis tantas caídas durante el desarrollo de este trabajo.

A JonMar quien supo dilucidar en su momento algunas de mis dudas e inquietudes, a mis amigos más allegados Maty, Ana y Christian de quienes recibí una sonrisa o una palabra para que siga adelante. A todas aquellas personas que de alguna forma, hicieron su aporte para que pueda culminar con éxito este escalón de mi vida académica.

Al Instituto Oceanográfico de la Armada por proporcionar los datos y las facilidades necesarios para el desarrollo de esta tesis.

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres:

Zeneida y Antonio

Y a mi Tesorito Bello

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

M.Sc. Jerry Landívar Zambrano
PRESIDENTE

Ph.D. José L. Santos Dávila
DIRECTOR DE TESIS

Ing. M.Sc. José Chang Gómez
VOCAL

Ing. Enrique Sánchez Cuadros
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

Zeneida Elizabeth Wong Chang

RESUMEN

Este estudio centró sus objetivos en las oscilaciones del nivel del mar presentes en el Océano Pacífico (datos de altimetría) y las registradas por las estaciones mareográficas del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR). El período de datos común entre las estaciones del INOCAR y los datos de satélite va desde Diciembre de 1992 hasta Septiembre de 2008.

Por medio del análisis espectral tanto para anomalías mensuales, como promedios diarios se identificaron frecuencias significativas; encontrándose un periodo de 16 meses que podría atribuirse al ciclo anual, este ciclo también se identificó en el análisis armónico como el ciclo anual solar (SA). Periodos de 77.3 y 91 días se podrían relacionar con ondas kelvin de 20-90 días [20] y un periodo de 7.4 días que podría corresponder a una onda Rossby-gravedad, o representar una onda kelvin 8-10 días [20]. El análisis armónico estableció la presencia de al menos 50 componentes armónicos significativos, que conforman la onda de marea en nuestras costas. Los armónicos que con mayores amplitudes fueron M₂, S₂, N₂ y K₁, que indican la naturaleza semidiurna de las mareas. Del análisis de espectro cruzado, se tiene que las oscilaciones del Pacífico lideran sobre el nivel del mar en el Ecuador entre un 40 y 60%; siendo estos porcentajes más significativos para los periodos de 1.5, 2, 5 y 32 meses. El área que presenta mayor correlación se localiza entre 10°N y 20°S y desde la costa continental hasta aproximadamente 180° W.

La tendencia del nivel del mar en el Ecuador evidenció un incremento para las estaciones de Baltra, Esmeraldas y Puerto Bolívar; en tanto que la estación de La Libertad presentó una disminución en el mismo. Estos valores resultaron ligeramente mayores al considerarse los eventos ENOS extremos del 82-83 y 97-98. Al calcular la variación del NMM en el Pacífico, se encontró que a partir de los 140°W, la variación del NMM es menor cuando se considera los eventos ENOS más fuertes del 82-83 y 97-98 que cuando se los excluye. En la costa ecuatoriana, entre Dic-1992 y Sep-2008, el nivel del mar ha incrementado entre 1.1 y 2.8 cm, a excepción del sector de La Libertad en que se registró un descenso del nivel del mar de 1.2 cm.

Utilizando el Índice Niño Oceánico (ONI), al igual que Trenberth y Stepaniak [23], se estableció que el nivel del mar tiende a aumentar en los años Niño y descender en los años Niña, con un promedio en las anomalías positivas de hasta 0.5 m, durante los eventos Niño 82-83 y 97-98, y bajas anomalías de hasta -0.2 m, en algunos eventos Niña como por ejemplo el del 98-99. A través de la función de Gumbel se determinó que las mayores alturas, para periodos de retorno de 10 y 1000 años, estarían entre 2.9 y 4.54 m. Las tendencias más bajas corresponden a Baltra, y las más altas al sector de Esmeraldas.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

<i>RESUMEN</i>	VI
<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VIII
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	XI
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	XIII
<i>ÍNDICE DE ANEXOS</i>	XVII
<i>ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS</i>	XVIII

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

<i>1.1. Nivel Medio del Mar</i>	1
<i>1.2. Altimetría por Satélite</i>	3
<i>1.3. Aumento del nivel medio del mar</i>	5

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

<i>2.1. Series de tiempo de nivel del mar del Ecuador</i>	9
<i>2.1.1. Estaciones de INOCAR y características de la base de datos</i>	9
<i>2.1.2. Discriminación de datos erróneos</i>	13
<i>2.1.3. Relleno de datos/unión de series</i>	17

<i>2.2. Series de tiempo de nivel del mar regionales del Océano Pacífico</i>	<i>18</i>
<i>2.3. Métodos estadísticos</i>	<i>19</i>
<i>2.3.1. Medidas de tendencia central: Media, desviación estándar, varianza.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.2. Regresión lineal: Método de los mínimos cuadrados, determinación de significancia de tendencias.....</i>	<i>20</i>
<i>2.3.3. Coeficiente de Correlación.....</i>	<i>21</i>
<i>2.3.4. Estadística de Extremos.....</i>	<i>22</i>
<i>2.4. Análisis de series de tiempo</i>	<i>27</i>
<i>2.4.1. Análisis armónico.....</i>	<i>27</i>
<i>2.4.2. Análisis espectral.....</i>	<i>31</i>
<i>2.4.3. Análisis espectral cruzado.....</i>	<i>33</i>

CAPÍTULO III: RESULTADOS

<i>3.1. Frecuencias Significativas.....</i>	<i>36</i>
<i>3.2. Frecuencias de Oscilación</i>	<i>46</i>
<i>3.3. Desfase entre oscilaciones del Océano Pacífico y el NMM de la costa del Ecuador</i>	<i>54</i>
<i>3.4. Tendencias del Nivel del Mar en la costa del Ecuador.....</i>	<i>65</i>
<i>3.5. Influencia de los Eventos El Niño/La Niña sobre las oscilaciones del nivel del mar en la costa del Ecuador.....</i>	<i>70</i>

<i>3.6. Máximos anuales del NMM y su proyección estadística para diferentes períodos de retorno</i>	<i>77</i>
<i>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	
<i>4.1. Conclusiones.....</i>	<i>86</i>
<i>4.2. Recomendaciones</i>	<i>91</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>92</i>
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>105</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>TABLA I</i>	<i>Datos disponibles de las Estaciones mareográficas del INOCAR.....</i>	<i>12</i>
<i>TABLA II</i>	<i>Variable reducida para diferentes periodos de retorno.....</i>	<i>26</i>
<i>TABLA III</i>	<i>Principales componentes de marea.....</i>	<i>30</i>
<i>TABLA IV</i>	<i>Frecuencias significativas de los espectros de anomalías mensuales de las series de nivel del mar.....</i>	<i>41</i>
<i>TABLA V</i>	<i>Frecuencias significativas de las series de nivel del mar del INOCAR(datos diarios).....</i>	<i>45</i>
<i>TABLA VI</i>	<i>Resultados del Análisis Armónico de Baltra, componentes significativas.....</i>	<i>47</i>
<i>TABLA VII</i>	<i>Coordenadas del área de Océano Pacífico que tiene influencia sobre el nivel del mar de la costa ecuatoriana.....</i>	<i>54</i>
<i>TABLA VIII</i>	<i>Análisis de los parámetros meteorológicos.....</i>	<i>56</i>
<i>TABLA IX</i>	<i>Coefficiente de correlación entre el Nivel del mar y los datos meteorológicos (estaciones de INOCAR).....</i>	<i>57</i>
<i>TABLA X</i>	<i>Frecuencias y periodos propios de las coherencias mayores a 0.5, obtenidas del espectro cruzado.....</i>	<i>65</i>
<i>TABLA XI</i>	<i>Tendencias del nivel del mar en la costa ecuatoriana.....</i>	<i>67</i>

<i>TABLA XII Variación del NMM en la costa ecuatoriana y de las ANMM en el Pacífico, durante el periodo: Diciembre 1992 a Septiembre 2008.....</i>	<i>68</i>
<i>TABLA XIII Máximos anuales de las series del nivel del mar del INOCAR y sus respectivos años de ocurrencia (16 valores más altos).....</i>	<i>77</i>
<i>TABLA XIV Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de Baltra. Método de Gumbel.....</i>	<i>81</i>
<i>TABLA XV Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de Esmeraldas. Método de Gumbel.....</i>	<i>82</i>
<i>TABLA XVI Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de La Libertad. Método de Gumbel.....</i>	<i>83</i>
<i>TABLA XVII Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de Puerto Bolívar. Método de Gumbel.....</i>	<i>84</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	<i>Ubicación de las estaciones mareográficas y meteorológicas del INOCAR.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Figura 2. Series del Nivel del Mar del INOCAR. La línea negra corresponde a los promedios diarios de las series: a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; y d) Puerto Bolívar.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de Baltra (datos mensuales).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de Esmeraldas (datos mensuales).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de La Libertad (datos mensuales).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de Puerto Bolívar (datos mensuales).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para el punto de grilla 0°.100°W (datos mensuales).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para el punto de grilla 0°.140°W (datos mensuales).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para el punto de grilla 0°.180°W (datos mensuales).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de Baltra (datos diarios).....</i>	<i>42</i>

<i>Figura 11</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de Esmeraldas (datos diarios).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de La Libertad (datos diarios).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Densidad de Energía Espectral para la estación de Puerto Bolívar (datos diarios).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 14</i>	<i>Análisis Armónico del nivel del mar en Baltra.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 15</i>	<i>Análisis Armónico del nivel del mar en Esmeraldas.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Análisis Armónico del nivel del mar en La Libertad.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 17</i>	<i>Análisis Armónico del nivel del mar en Puerto Bolívar.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18</i>	<i>Gráficos de correlación entre las series de INOCAR y los datos de altimetría. a) Baltra, b) Esmeraldas, c) La Libertad, y d) Puerto Bolívar.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 19</i>	<i>Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de Baltra.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 20</i>	<i>Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de Esmeraldas.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 21</i>	<i>Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de La Libertad.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 22</i>	<i>Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de Puerto Bolívar.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 23</i>	<i>Frecuencias correspondientes a los valores de</i>	

	<i>coherencia mayores a 0.5, obtenidas del espectro cruzado entre las series del Océano Pacífico y a) la Est. de Baltra; b) la Est. de Esmeraldas; c) la Est. de La Libertad; y d) la Est. de Puerto Bolívar. Eje derecho es el porcentaje de desfase positivo que corresponde a cada frecuencia.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 24</i>	<i>Tendencias del Nivel del mar en la estación de a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; y d) Puerto Bolívar.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 25</i>	<i>Tendencia de anomalías del Nivel del mar en el Océano Pacífico.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 26</i>	<i>Anomalías del nivel del mar y los respectivos eventos El Niño y La Niña según el Índice Niño Oceánico (ONI).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 27</i>	<i>Gráficos de Presión atmosférica superficial (a) y temperatura superficial del aire (b) en base al Índice Niño Oceánico para la estación de Esmeraldas.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 28</i>	<i>Gráficos de Presión atmosférica superficial (a) y temperatura superficial del aire (b) en base al Índice Niño Oceánico para la estación de La Libertad.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 29</i>	<i>Gráficos de Presión atmosférica superficial (a) y temperatura superficial del aire (b) en base al Índice</i>	

	<i>Niño Oceánico para la estación de Puerto Bolívar.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 30</i>	<i>Gráfico de dispersión entre los datos de anomalías de La Libertad y el Índice Niño Oceánico.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 31</i>	<i>Gráfico de dispersión entre los datos de anomalías del nivel del mar y el Índice Niño Oceánico. a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; y d) Puerto Bolívar. Periodo: Dic/1992 – Sep/2008.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 32</i>	<i>Representación de Gumbel para los máximos anuales de las series del nivel del mar del INOCAR. a) Baltra, b) Esmeraldas.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 33</i>	<i>Representación de Gumbel para los máximos anuales de las series del nivel del mar del INOCAR. c) La Libertad, y d) Puerto Bolívar.....</i>	<i>80</i>

ÍNDICE DE ANEXOS

<i>ANEXO A</i>	<i>Tablas del Análisis armónico</i>
<i>ANEXO B</i>	<i>Tablas de Gumbel</i>

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

<i>ANMM</i>	<i>Anomalías del Nivel Medio del Mar</i>
<i>AVISO</i>	<i>Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data</i>
<i>CLS</i>	<i>Collecte Localisation Satellites</i>
<i>CNES</i>	<i>Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (Centre National d'Etudes Spatiales)</i>
<i>CPD</i>	<i>Ciclos por día</i>
<i>CPM</i>	<i>Ciclos por mes</i>
<i>CPSD</i>	<i>Densidad de Energía Espectral Cruzada (Cross Power Spectral Density)</i>
<i>ENOS</i>	<i>El Niño Oscilación del Sur</i>
<i>ENVISAT</i>	<i>Satélite Ambiental (Environmental Satellite)</i>
<i>ERM</i>	<i>Exact Repeat Mission</i>
<i>ERS</i>	<i>Satélite Europeo de Sensores Remotos (European Remote-Sensing Satellite)</i>
<i>FFT</i>	<i>Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)</i>
<i>GEOSAT</i>	<i>Satélite Geodésico (Geodetic Satellite). Satélite artificial de la Armada de los Estados Unidos</i>
<i>INOCAR</i>	<i>Instituto Oceanográfico de la Armada</i>
<i>MERSEA</i>	<i>Marine Environment and Security for the European Area</i>

<i>NMM</i>	<i>Nivel Medio del Mar</i>
<i>NMMG</i>	<i>Nivel Medio del Mar Global</i>
<i>NaN</i>	<i>Valor no numérico (Not a Number)</i>
<i>ONI</i>	<i>Índice Niño Oceánico (Oceanic Niño Index)</i>
<i>PSA</i>	<i>Presión Atmosférica Superficial</i>
<i>PSD</i>	<i>Densidad de Energía Espectral (Power Spectral Density)</i>
<i>PSM</i>	<i>Presión Superficial del Mar</i>
<i>SNR</i>	<i>"relación señal / ruido de la fuente" (signal-to-noise power ratio)</i>
<i>TSA</i>	<i>Temperatura Superficial del Aire</i>
<i>TSM</i>	<i>Temperatura Superficial del Mar</i>

Capítulo I

INTRODUCCION

1.1. Nivel Medio del Mar

Los cambios de nivel del mar han sido estudiados en diferentes escalas de tiempo, desde escalas geológicas hasta escalas estacionales; estos cambios pueden darse debido a variaciones en el volumen de agua, o en el volumen de las cuencas oceánicas. De forma general, el Nivel Medio del Mar (NMM) es un promedio de la altura superficial del mar de todos los océanos con respecto a una referencia; este nivel puede ser global o puede ser calculado para cuencas o regiones específicas. Uno de los métodos más antiguos de observación oceánica ha sido la medición del nivel del mar; determinadas variaciones en el nivel del mar han sido reportadas a través de mediciones relativas, mediciones de satélites, o mediciones de mareógrafos. No obstante, lo que realmente se desea conseguir son las variaciones de este NMM a lo largo del tiempo.

El registro de estas variaciones en el NMM viene desde antes del siglo XIX; en esa época el NMM se asociaba con las variaciones verticales del límite costero, ya que se creía que estos cambios en el nivel del mar se hallaban relacionados a los movimientos de la tierra. Investigaciones más recientes de estas mediciones incluyen la resolución de los

componentes de marea para predicciones de altura de marea en la zona costera y como apoyo en la predicción de los eventos ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) en el Pacífico [1].

Los sensores de marea proveen de datos fundamentales para los diversos estudios de oleajes, por ejemplo oleajes de tormentas generados por vientos. A lo largo del perímetro del Océano Pacífico y en las islas del Pacífico se encuentran instalados una serie de sensores de mareas que constituyen un importante componente del sistema de alerta de tsunami que previenen a los residentes costeros de posibles olas generadas sísmicamente, asociadas principalmente con los terremotos y desplazamientos de corteza. Los registros del nivel del mar proveen además una medición integrada a escala global de la variabilidad oceánica; por lo cual, los registros de largo periodo (> 50 años) de los sensores de marea aportan con información elemental sobre el cambio climático global [1].

Las variaciones de largo periodo en el NMM se conocen como cambios seculares, en tanto que las variaciones que se generan a través del océano se conocen como cambios eustáticos; estos últimos están asociados con la acumulación de sedimentos oceánicos, actividad tectónica, así como los cambios en el volumen oceánico y en la forma de las cuencas oceánicas.

La organización internacional Permanent Service for Mean Sea Level define el NMM “como el nivel de las aguas tranquilas del mar promediado durante un periodo determinado de tiempo (meses, años)” este concepto indica que los efectos periódicos tales como la marea y las olas quedan compensados [2].

1.2. Altimetría por Satélite

En la actualidad, la altimetría por satélite, las boyas autónomas y los datos de gravimetría simplifican la medición de las variaciones del NMM, o algunos de sus componentes. Además, estos fenómenos pueden ser cuantificados y comprendidos mediante el empleo de modelos oceánicos.

A inicios de 1859 Pratt presentó la idea de que existía una fuerte relación entre las anomalías de gravedad oceánica y la profundidad del agua [3] [4]. Con estos inicios, en 1978 se realizó el lanzamiento del radar de altimetría SEASAT, con lo cual la altimetría se convierte en una nueva alternativa para realizar mediciones de líneas de sondeo a gran escala.

La altimetría por satélite tiene una gran ventaja en la interpretación de circulación a larga escala previamente obtenida de los datos de altura dinámica; además, permite examinar la variabilidad temporal de las

características de meso escala en el océano, así como la propagación de las ondas Rossby.

Usualmente, los sistemas de medición del nivel del mar se encuentran limitados por una plataforma de instalación fija, de modo que se cuenta únicamente con mediciones de estaciones costeras o instaladas en islas donde pueden ser referenciadas al límite de la tierra. Debido a que existen grandes secciones del océano sin islas, la altimetría de radar transmitida por satélite constituye la herramienta más idónea para las mediciones del nivel del mar de largo plazo [1].

A la fecha la altimetría por satélite ha progresado considerablemente con la implementación de varios altímetros de transmisión, como el GEOSAT (1985) y el SEASAT (1986). La operación continua de estos satélites ha permitido a los científicos recolectar y analizar datos sobre la variabilidad de la altura de los océanos. Además se hicieron públicos los datos de una misión geodésica realizada por la armada de Estados Unidos, en esta misión el satélite no repetía la misma ruta sin embargo las rutas ascendentes y descendentes que realizaba el satélite se cruzaban en varios puntos, convirtiéndose en una valiosa información sobre la variabilidad de la altura del océano. Así, es posible combinar los datos de las primeras órbitas de repetición y las órbitas cruzadas de la “Exact Repeat Mission” (ERM) para formar una serie de tiempo de

casi cinco años, de las variaciones de altura de la superficie del mar. En 1992, el satélite altimétrico TOPEX/POSEIDON fue lanzado al espacio, llevando dos altímetros (uno de Francia y otro de EEUU) con una sola antena, el TOPEX/POSEIDON marcó un paso importante en la medición de altimetría remota [1].

Con las diversas misiones de altimetría de satélites, el nivel medio del mar global (NMMG) ha sido calculado sobre una base continua desde enero de 1993. Las fases de “verificación”, durante la cual los satélites se siguen uno a otro de forma sucesiva (Topex/Poseidon–Jason, luego *Jason-1–Jason-2*), ayudan a enlazar estas diferentes misiones determinando cualquier sesgo entre ellas. Los satélites ENVISAT, *ERS-1* and *ERS-2* también son usados, luego de ser ajustados sobre las misiones de referencia, a fin de calcular el NMM en altas latitudes (mayores a 66°N y 66°S); además, al combinar todas las misiones simultáneamente se puede mejorar la resolución espacial. El monitoreo continuo y permanente de calidad durante las misiones y estudios de las correcciones necesarias de los datos de altimetría frecuentemente aumentan nuestro entendimiento y conocimiento.

1.3. Aumento del nivel medio del mar

Las variaciones del nivel del mar, pueden estar relacionadas con las componentes presentadas a continuación:

- Fluctuaciones: Fluctuaciones temporales (de corto tiempo) de la altura superficial del mar; incluye aquellas asociadas con las olas de viento y mareas oceánicas generadas por cambios en el alineamiento del sol, la luna y la tierra. Además, hay cambios debidos a la presión atmosférica, a las corrientes inducidas por vientos a lo largo de la costa, a cambios en la escorrentía de los ríos, y a cambios en la circulación oceánica a larga escala causados por fluctuaciones en el patrón oceánico de vientos [1].
- Variación de masas de agua: Cambios temporales de largo periodo que resultan de los cambios en las masas de agua debido a excesivas lluvias sobre los océanos o al derretimiento o acumulación de terrenos de hielo en las principales láminas y montañas glaciares; otra forma la constituye las variaciones en las escorrentías. Una excesiva evaporación también puede disminuir las masas de agua; inclusive la glaciación, como ocurrió durante el último máximo glacial, cuando el nivel del mar estuvo cerca de los 100 m por debajo del nivel actual [5].
- Variaciones de temperatura: Los cambios estéricos del nivel del mar incrementan debido a cambios en el volumen del océano –sin un cambio en masa–; esto involucra el calentamiento (expansión) y enfriamiento (contracción) del océano. Entre otras cosas, esto conduce a variaciones estacionales del nivel del mar, y también variaciones

anuales relacionadas con eventos climáticos. Los cambios de temperatura por una prolongada escala de tiempo también tienen un impacto [6].

- Variaciones de salinidad: Las variaciones de salinidad pueden ocurrir por adición de agua dulce (aumento de la escorrentía, lluvia, o derretimiento del hielo). Las variaciones por densidad conllevarán a cambios en el nivel del mar. La adición o remoción de sal tiene el mismo efecto estérico que el enfriamiento y calentamiento.
- Otros: La Subsistencia costera involucra la depresión de la tierra a consecuencia de la reducción en el grosor de la capa de sedimentos costeros no consolidados, erosión, depósito de sedimentos o retiro de fluidos (agua, aceite, etc.) de los sedimentos. Además, los movimientos de corteza a larga escala producen cambios en el nivel del mar a través de los procesos tectónicos (creación de montañas) y rebote glacio-isostático (continuación de la respuesta visco elástica de la tierra ante el derretimiento de glaciares de la última era del hielo).

Este estudio pretende centrar sus objetivos en las oscilaciones del nivel del mar presentes en el Océano Pacífico y las registradas por las estaciones mareográficas del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), y se podrá medir el desfase en tiempo con el que llegarían, a las costas del Ecuador, las ondas que viajan por el Océano Pacífico. El período de datos

común entre las estaciones del INOCAR y los datos de satélite comprenden desde Diciembre de 1992 hasta Septiembre de 2008. La influencia de las variaciones interanuales El Niño/La Niña sobre el nivel medio del mar también serán explicadas y las tendencias a lo largo de los registros se analizarán para conocer si el nivel del mar está aumentando o disminuyendo, producto de oscilaciones propias o del cambio climático. Además, se encontrará la proyección estadística del nivel del mar en la costa del Ecuador para diferentes períodos de retorno.

Capítulo II

MATERIALES Y METODOS

En oceanografía, al igual que en otras ciencias ambientales existe la necesidad de presentar información de series de tiempo. Las series de vientos, olas, corrientes superficiales y temperatura superficial necesitan ser representadas como una función de tiempo.

La forma más sencilla de presentar información de series de tiempo es graficar una variable escalar versus tiempo. La escala de tiempo depende del periodo de estudio así como los diferentes fenómenos que suceden a diferentes escalas de tiempo; de modo que los intervalos de rango pueden ser de segundos hasta años.

2.1. Series de tiempo de nivel del mar del Ecuador

2.1.1. Estaciones costeras de INOCAR y características de la base de datos

Para el desarrollo de la presente tesis de grado se contó con el apoyo del Instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR), quién proporcionó y facilitó el uso de la información.

El INOCAR, entre sus actividades, tiene participación en temas técnicos relacionados a la Cartografía Náutica, vista de ello cuenta con una Red Mareográfica permanente que permite tener un monitoreo

constante de la variación del nivel del agua tanto en la zona costera como a lo largo del Río Guayas. La estación más antigua, con más de 60 años de mediciones, se encuentra instalada en la ciudad de La Libertad. El punto de referencia para la medición del nivel del mar, depende de las consideraciones y metodologías que empleó el Instituto para calibrar los mareógrafos. Además, el INOCAR cuenta con información meteorológica la cual permitirá realizar parte del análisis requerido para el presente estudio.

La información comprende datos horarios del nivel medio del mar de 8 estaciones ubicadas a lo largo de la costa ecuatoriana, 7 en la costa continental y una en Galápagos, en la isla Baltra. Las localidades donde están instaladas las estaciones mareográficas son: Esmeraldas, Manta, Bahía, La Libertad, Posorja, Puná, Puerto Bolívar y Baltra; en cuanto a los datos meteorológicos, se cuenta con promedios mensuales de presión atmosférica superficial (PSA) y temperatura superficial del aire (TSA) en las siguientes estaciones: San Lorenzo, Esmeraldas, Manta, Libertad, Puná y Puerto Bolívar. La ubicación de las estaciones mareográficas como las meteorológicas se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Ubicación de las estaciones mareográficas y meteorológicas del INOCAR

En la Tabla I se presentan los porcentajes de datos válidos de cada una de las estaciones mareográficas así como el periodo de datos disponible de cada una de las series.

Tabla I. Datos disponibles de las Estaciones mareográficas del INOCAR

Estación	Fecha Inicio	Fecha Fin	Datos válidos
Bahía	17/ene./80	29/sep./09	78.6 %
Balra	01/nov./72	29/sep./09	61.6 %
Esmeraldas	02/sep./79	29/sep./09	85.9 %
La Libertad	24/oct./48	29/sep./09	93.4 %
Manta	01/ene./73	29/sep./09	72.7 %
Puerto Bolívar	01/ene./70	29/sep./09	83.1 %
Posorja	01/ene./84	29/sep./09	65.4 %
Puná	01/abr./80	29/sep./09	82.9 %

NOTA: las filas resaltadas corresponde a las estaciones con mayor porcentaje de datos válidos

Los porcentajes referidos en la Tabla I corresponden a la disponibilidad de datos diarios, respecto a la longitud de la serie; así se puede observar que las estaciones de Esmeraldas, La Libertad, Puerto Bolívar y Puná cuentan con una disponibilidad de datos que supera el 80% de la serie.

Con esta información se realizó la selección de las estaciones a ser utilizadas para desarrollar la presente tesis, se escogió la estación de Esmeraldas, al norte del país, la estación de La Libertad, cerca del sector central y Puerto Bolívar al sur del país, que es la que cuenta con mayor información respecto a Puná. Además, aunque la estación de Baltra solo posee el 61.6 % de datos válidos, se consideró necesario incluir en el estudio dicha estación, para analizar no solo la costa continental sino también la costa insular.

Además se escogió las estaciones meteorológicas ubicadas en las localidades que corresponden a 3 de las estaciones mareográficas seleccionadas: Esmeraldas, La Libertad y Puerto Bolívar. El periodo de datos de las estaciones meteorológicas facilitado por el INOCAR va desde enero de 1992 a diciembre de 2008.

2.1.2. Discriminación de datos erróneos

Previo cualquier análisis es necesario realizar el respectivo control de calidad de los datos y en forma general los registros oceanográficos requieren algún tipo de representación visual preliminar. Esto incluye desde establecer con exactitud el comienzo y el final de una serie de tiempo, hasta simplificar la búsqueda de valores erróneos para su posterior eliminación o interpolación, según el caso lo amerite.

Para la presente tesis, el primer paso a realizarse fue establecer el inicio y fin de cada una de las series de nivel del mar; con la ayuda del software Matlab se creó un vector tiempo para cada serie; esto permitió establecer si las series estaban incompletas, es decir, si existían datos faltantes, y de este modo completar la serie de tiempo, asignando NaN (Not a Number) a los espacios vacíos correspondientes al dato del nivel del mar.

Inicialmente, con el mismo software, se procedió a graficar los datos y se realizó una revisión visual de las series. Mediante el método visual se identificaron aquellos valores que podrían corresponder a algún tipo de datos falsos, tales como valores extremos (outliers) y/o picos (spikes) que se encuentren en la serie. Con la finalidad de identificar estos datos falsos se utilizó el Matlab para graficar las series, y mediante un acercamiento se identificó los mencionados datos, una vez identificados dichos datos se procedió a eliminarlos considerando que solo eran puntos aislados y no un grupo de datos.

Con las series “completas”, y ya con este primer filtro en que se eliminaron valores extremos y picos, se procedió a calcular los promedios diarios del nivel del mar. Al realizar la gráfica de los datos promediados se pudo observar la presencia de nuevos valores extremos que coincidían con las lagunas o periodos donde no hay datos, esto

implica que en ese día medición hay uno o muy pocos datos, ya sea que correspondan a pleamar o bajamar. Para evitar la presencia de estos valores extremos se usó como criterio que, si durante las 24 horas de mediciones existe más del 60% de datos válidos, entonces promediar los datos, caso contrario se reemplazará el promedio diario por NaN.

Una vez que la serie ha pasado por este segundo filtro, aún se presentaban sectores de la serie de tiempo en la cual los datos se encuentran un poco divergentes respecto al promedio; vista de ello, se realizó un acercamiento a la serie de datos para realizar un nuevo análisis visual. De este modo pudo observarse que algunas de esas alteraciones en el ciclo de marea no son normales, este problema fue más evidente para la estación de Baltra; se procedió a revisar la base de datos provista por INOCAR, sin embargo no se encontró un respaldo que pueda indicar que ocurrió con esos datos; por lo tanto, al no contar con la certeza de la correcta medición de esos datos o un sustento que justifique los mismos, y para fines positivos de esta tesis, se han omitido dichos datos.

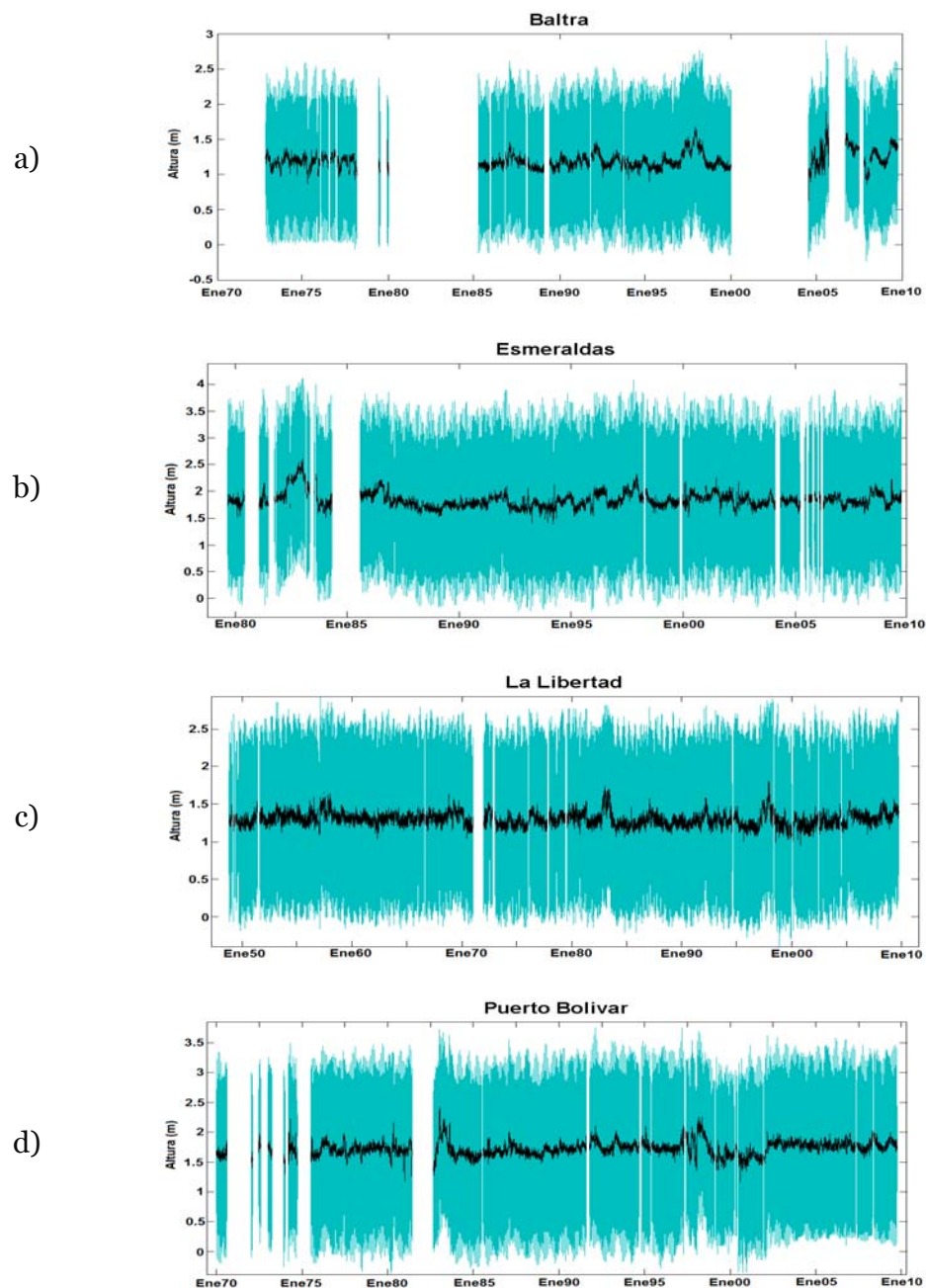


Figura 2. Series del Nivel del Mar del INOCAR. La línea negra corresponde a los promedios diarios de las series: a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; y d) Puerto Bolívar.

Además, considerando que las estaciones mareográficas deben recibir un mantenimiento periódico, durante el cual el sensor que registra el nivel del mar es removido, se pudo observar que las series de tiempo presentan puntos de cambio, posiblemente porque los datos se encuentran bajo planos de referencia distintos. Estos puntos de cambio deberían estar registrados en la metadata, para de este modo realizar las respectivas correcciones y llevar toda la serie a un único plano de referencia; de no darse este registro, dichos eventos se mencionarían como puntos de cambio no documentados. En la Figura 2., se muestran las series del nivel del mar del INOCAR con el respectivo promedio diario de cada serie.

2.1.3. Relleno de datos/unión de series

Para rellenar la serie de datos se procedió a realizar la climatología para cada una de las estaciones, tomando como referencia los promedios diarios calculados previamente; con esta climatología se obtuvo las medias mensuales, las mismas que fueron empleadas para reemplazar los NaN (datos perdidos) en las series de datos diarios, además se graficó el ciclo anual de marea para cada estación.

Una vez sustituidos los NaN por la media mensual en cada una de las series de datos diarios de las estaciones costeras, se realizó el cálculo de promedios mensuales de estas series y sus respectivas anomalías.

2.2. Series de tiempo de nivel del mar regionales del Océano Pacífico

Además de los datos del INOCAR, se cuenta con datos de altimetría por satélite; esta información comprende datos de anomalías del nivel del mar. Los productos de altimetría fueron producidos por Ssalto/Duacs y distribuidos por AVISO, con soporte en CNES. Los datos se obtuvieron de mapas semanales de anomalías del nivel del mar; a cargo de la Collecte Localisation Satellites (CLS). Esta base de datos comprende anomalías mensuales del nivel del mar en el Océano Pacífico entre 60°N y 60°S y entre 160°E y 60°W, con una resolución de 1/3°; esto constituye casi 16 años de datos, que van desde diciembre de 1992 hasta agosto 1 de septiembre de 2008.

La CLS está muy dedicada a la recolección de parámetros en el mar con el sistema Argos: temperatura de superficie del mar y color del océano, observación espacial con una oferta completa en altimetría satelital, sistemas de análisis y previsión mediante la participación en el proyecto MERCATOR y su extensión europea MERSEA (Marine Environment and Security for the European Area). La CLS contribuye de esta manera al desarrollo de la oceanografía espacial y trabaja al servicio de clientes institucionales y privados.

2.3. Métodos estadísticos

La primera etapa del análisis de datos, tras la comprobación y edición de datos generalmente involucra estimaciones de la media aritmética, varianza, coeficiente de correlación, u otras cantidades derivadas del muestreo estadístico. Estas cantidades nos dicen qué tan bien nuestros sensores están trabajando y ayudando a caracterizar la variabilidad oceanográfica observada.

2.3.1. Medidas de tendencia central: Media, desviación estándar, varianza

Las medidas estadísticas tienen como objetivo "resumir" la información de un conjunto de datos, permitiendo de este modo adquirir un mejor conocimiento de los mismos y así representar muestras estadísticas. Las medidas de tendencia central permiten analizar los datos en torno a un valor central.

Tanto la Media como la Desviación Estándar son valores que tipifican una muestra y en torno de los cuales se agrupan la mayoría de los datos, estos se denominan estadígrafos.

Media Aritmética: Es lo que se conoce como "promedio". La media aritmética es uno de los estadígrafos más usados, por el hecho de ser de muy fácil cálculo, en el que se obtiene el valor central que representa la

muestra mediante la suma de los datos dividida para el número total de datos.

Desviación Estándar: Es un dato que representa la variabilidad existente en un conjunto de datos, ya que por ejemplo dos conjuntos de datos pueden presentar la misma media aritmética, pero poseer distinta variabilidad, por eso este estadígrafo nos permite saber acerca de la variabilidad o dispersión de los datos respecto a la media. La desviación estándar nos dice cuánto tienden a alejarse los puntos del promedio. La desviación estándar es aproximadamente el promedio de lejanía de los puntos respecto del promedio.

Varianza: El análisis espectral realiza una distribución de la varianza total de la serie, de modo que la varianza en este caso estaría expresando la cantidad de energía (PSD) que le corresponde a cada valor de frecuencia.

2.3.2. Regresión lineal: Métodos de los mínimos cuadrados, determinación de significancia de tendencias

La regresión lineal es un procedimiento estadístico cuyo objetivo es encontrar los coeficientes a y b de la función de una variable aleatoria y , conocida como variable dependiente de una variable aleatoria, llamada variable independiente [1].

Método de los mínimos cuadrados

El método de los mínimos cuadrados constituye una de las mejores técnicas para ajustar un parámetro de un modelo dependiente y a variables independientes x_i . De forma general con este método se intenta hallar aquella función que mejor se aproxime a los datos (un “mejor ajuste”), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. El caso más simple consiste en ajustar una línea recta a un grupo de puntos usando los “mejores” coeficientes a y b .

En el presente trabajo se utilizó la función `polyfit` de las librerías de Matlab, para calcular los coeficientes a y b de la ecuación de la recta que mejor se ajusta a cada una de las cuatro series. Una vez obtenidos los coeficientes, con ayuda del mismo software se procedió a graficar la línea de tendencia para cada una de las series.

2.3.3. Coeficiente de Correlación

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que permite medir el grado de asociación (relación lineal) entre dos variables aleatorias cuantitativas; el cálculo de este índice no toma en consideración la escala de medida de las variables (adimensional). El coeficiente de correlación lineal; es un número real comprendido entre $-1 < r < 1$. Un valor de -1 o 1 indica un correlación perfecta, negativa (relación

inversa) o positiva (relación directa) respectivamente; en estos casos el índice indica una dependencia total entre las dos variables. Si el valor da cero entonces no existe una relación lineal.

Se procedió a calcular el coeficiente de relación entre las series del Océano Pacífico y las series de INOCAR; los valores de los coeficientes fueron agrupados en una matriz para posteriormente elaborar gráficos pcolor en donde pueda apreciarse la correlación existente entre estas variables. Además se calculó este coeficiente entre las series de nivel del mar de INOCAR y sus respectivas series de PSA y TSA.

2.3.4. Estadística de Extremos

La Teoría del Valor Extremo permite conocer importante información sobre futuros acontecimientos “poco normales”, que pudiesen darse ya sea en años, decenios o incluso siglos de antelación. En todos los casos, esta teoría se fundamenta en la documentación sobre sucesos extremos, ocurridos en el pasado; con esta información se puede estimar la probabilidad que eventos ocurridos se repitan, así como eventos nunca antes visto. La estadística de extremos tiene aplicación en varios campos como la altura del nivel del mar, altura de olas, temperatura, precipitación, clima, velocidad de los vientos, contaminación del de aire, hidrología, etc.

En la actualidad, el estudio del impacto del nivel del mar sobre las costas ha adquirido una mayor importancia, por lo cual, la Teoría del Valor Extremo está siendo muy empleada para calcular la probabilidad de que se produzcan acontecimientos extremos, con el fin de desarrollar planes prevención y contingencia frente a dichos acontecimientos. Se han realizado este tipo de estudio en lugares como Australia [7], India [8], Hong Kong [9], Vietnam [10], Uruguay [11] [12], áreas del Mediterráneo [13], entre otros, en ellos se puede encontrar diversas metodologías para los pronósticos de eventos extremos.

Existen varias metodologías para el análisis estadístico de extremos; nos concentraremos en el método a ser empleado en esta tesis, y se hará una breve revisión de las fórmulas empleadas; mayor información puede ser consultada en diversos textos. Para el presente trabajo se seleccionó el método de Gumbel, asumiendo que los datos máximos del nivel del mar atiendan a una distribución normal; lo cual será verificado por medio de graficar los datos, en un paso posterior.

El primer paso de esta metodología consiste en obtener los valores máximos anuales de la serie y ordenarlos ya sea en forma ascendente o descendente, el primer dato de esta nueva serie deberá corresponder al suceso menos probable; para el caso de nivel del mar la serie de

máximos anuales fue ordenada de forma descendente. Con esta información se armó una tabla (Anexo B) para ordenar los datos, a cada valor se le asignó un número de orden i y una probabilidad de ocurrencia p_i , la asignación de la probabilidad se realizó como sigue:

$$p_i = \frac{i}{n+1} = \frac{1}{T_i}$$

A partir de la función de Gumbel [14] y las probabilidades asignadas, se calcula la variable reducida y_i , con la que se formarán los pares ordenados para graficar los datos posteriormente. Esta variable y_i se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$p_i = 1 - \varphi(x_i) = 1 - e^{-e^{-y_i}} \quad \Longrightarrow \quad y_i = -\ln\left(\ln\frac{1}{1-p_i}\right)$$

Donde $\varphi(x_i)$ es la función de Gumbel. Con esta información se procedió a graficar los máximos anuales x_i vs la variable reducida y_i . Para corroborar que la decisión de escoger el método de Gumbel es el más adecuado, se considera lo siguiente: “si un conjunto de pares de valores responde a una función Gumbel, se agruparán sobre una recta cuando sean graficados en papel lineal” [15]

Una vez que los datos fueron graficados se halló la ecuación de la recta, bajo el método propuesto por Gumbel [14], a través de regresión ortogonal mediante un ajuste de mínimos cuadrados. A continuación

se presenta la ecuación de la recta y sus respectivos coeficientes de ajuste:

$$x_i = u_0 + \frac{1}{\alpha_0} y_i \quad ; \quad \frac{1}{\alpha_0^*} = \frac{\sigma_x}{\sigma_n(y)} \quad ; \quad u_0^* = \bar{x} - \frac{\bar{y}_n}{\alpha_0^*}$$

Siendo:

α_0^* : estimador de α_0

u_0^* : estimador de u_0

\bar{x} : media aritmética de los máximos anuales

σ_x : desviación estándar de los máximos anuales

\bar{y}_n : media aritmética de los datos de la variable reducida

$\sigma_n(y)$: desviación estándar de los datos de la variable reducida

Los parámetros correspondientes a la variable reducida se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{y}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n -\ln \left(\ln \frac{n+1}{n+1-i} \right)$$

$$\sigma_n^2(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[-\ln \left(\ln \frac{n+1}{n+1-i} \right) - \bar{y}_n \right]^2$$

Ya obtenida la recta de mejor ajuste con los respectivos coeficientes se calcularon los respectivos intervalos de confianza, los cuales se obtienen de sumar y restar 1.14 (68% de confianza) o 3.07 (95% de confianza) al valor de y_i , en la ecuación de la recta. Estos niveles de

confianza fueron establecidos por Gumbel, las rectas paralelas que corresponden a estos intervalos Gumbel las denominó “líneas de control”.

Existe una relación entre la variable reducida y el periodo de retorno, mediante esta relación y con la ecuación de la recta de ajuste se pudo obtener las proyecciones de altura del nivel medio del mar para diferentes periodos de retorno; esta relación está dada por:

$$\varphi(y) = e^{-e^{-y}} \quad T = \frac{1}{1-\varphi(y)}$$

En la Tabla II se presenta algunos periodos de retorno con sus correspondientes valores de la variable reducida (aproximación).

Tabla II. Variable reducida para diferentes periodos de retorno

Periodo (años)	yi*
10	2,250368
20	2,9701954
50	3,901939
100	4,60015
1000	6,9072551
*La variable reducida (yi) es adimensional	

Para el desarrollo de todas las ecuaciones descritas previamente se trabajó con los comandos de Matlab.

2.4. Análisis de series de tiempo

2.4.1. Análisis armónico

En la naturaleza casi todo responde a períodos y frecuencias, por ello la importancia del Análisis Armónico para comprender el mundo que nos rodea. El Análisis Armónico estudia la representación de una función como superposición de otras más sencillas, estas últimas por lo general son de carácter sinusoidal y reciben el nombre de armónicos.

El Análisis Armónico fue empleado para el análisis de variabilidad de marea pero aplicado de forma equitativa para análisis de periodos anuales y semestrales o cualquier otra oscilación cíclica que se encuentre bien definida. Los principales componentes “armónicos” de marea lo conforman los movimientos diurnos y semidiurnos seguidos por la variabilidad quincenal, mensual, semestral y anual. El análisis armónico proporciona las amplitudes y fases de retraso que requieren los coeficientes armónicos de marea; con estos coeficientes se puede reconstruir la serie de tiempo original.

A medida que la Tierra gira sobre su eje, las fuerzas gravitacionales, principalmente de la Luna y el Sol, actúan sobre el agua de los océanos dando origen a las mareas, cuyas frecuencias corresponden a oscilaciones diurnas y semidiurnas. En las regiones costeras el efecto de la mareas el resultado de la variabilidad oceánica al propagarse a

través de las aguas costeras poco profundas, siendo el resultado de una combinación de ondas [16]. Las fuerzas gravitacionales provocan una oscilación cíclica debido a la órbita de la Tierra alrededor del Sol, y de la Luna alrededor de la Tierra, lo que conlleva a que se generen elevaciones máximas del agua del mar, conocidas como pleamar y descensos de la misma denominados bajamar.

Análisis armónico de mareas

El análisis armónico de las mareas se fundamenta en la hipótesis de que las variaciones de nivel del mar pueden ser descritas en función de un número finito de contribuciones armónicas. El clásico análisis armónico de marea simula el forzamiento de marea como un grupo de líneas espectrales; es decir una suma de un determinado grupo de sinusoides con frecuencias específicas. El propósito de este análisis es determinar la amplitud y fase (componentes armónicas) de las ondas cosenos individuales.

Encontrar las constantes armónicas de marea en un lugar permite predecir las mareas en ese sitio. El análisis armónico permite la resolución de cientos de componentes de marea de los cuales, 45 son básicamente de origen astronómico, e identificados con una frecuencia específica en el potencial de mareas. Los restantes incluyen componentes de aguas poco profundas, efectos friccionales del fondo

y términos no lineales en las ecuaciones de movimiento, inclusive como componentes de irradiación que se originan por efectos atmosféricos. Los principales componentes de marea que contribuyen a la marea astronómica se presentan en la Tabla III.

Existe un mayor número de componentes de mareas de aguas someras; sin embargo, los cuatro listados en la Tabla III hacen un buen trabajo reconstruyendo las asimetrías de la marea. Un análisis armónico perfecto debería generar como marea residual una línea recta; sin embargo, debe considerarse los diferentes factores, que intervienen en aguas poco profundas. Estos factores pueden ser la forma de propagación de la onda en la costa, interacción de la marea con la variación en la topografía; y también, en el caso de grandes estuarios, cambios en la respuesta dinámica debido a variaciones de salinidad y flujo.

Para realizar el análisis armónico se empleó la función `t_tide` de la librería de Matlab, para encontrar las componentes armónicas presentes con su respectiva amplitud y fase. Esta función está diseñada para trabajar con series de hasta 18.6 años que corresponde al periodo de la inclinación de la órbita lunar. Considerando lo mencionado previamente, se escogió la sección de la serie que va desde junio de

1981 hasta septiembre de 1999 para poder abarcar un mayor número de posibles componentes armónicos.

Tabla III. Principales componentes de marea

Nombre	Descripción del componente	W(grados/hora solar)
Componentes principales que determinan el tipo de marea		
M ₂	Lunar Principal semidiurna	28.894
S ₂	Solar Principal semidiurna	30.000
N ₂	Elíptica lunar mayor semidiurna	28.440
K ₁	Lunisolar declinacional diurna	15.041
O ₁	Lunar declinacional diurna	13.943
Componentes para aguas someras		
M ₄	Primer overtide de M ₂	28.894x2
M ₆	Segundo overtide de M ₂	28.894x3
S ₄	Primer overtide de S ₂	30.000x2
MS ₄	Marea compuesta entre M ₂ y S ₂	28.894+30.000
Fuente: http://web.vims.edu/physical/research/TCTutorial/tideanalysis.htm		

EL análisis armónico involucra un sin número de consideraciones; los cuales pueden ser especificados en la corrida de la rutina t_tide; sin embargo, para este trabajo se empleó el caso más sencillo en el cual la única variable de entrada es la altura del nivel del mar en datos horarios. Con la información obtenida de la función t_tide se

realizaron gráficos para el pronóstico de marea y la marea residual, que es la diferencia entre los datos observados y el pronóstico de la marea; así también se generaron gráficos para las amplitudes de los componentes armónicos encontrados y su respectivo ángulo de fase. La información del análisis armónico se muestra en el Anexo A.

2.4.2. Análisis espectral

El análisis de datos secuenciales es conocido como análisis de series de tiempo. El propósito básico de los métodos de análisis de las series de tiempo es definir la variabilidad de una serie de datos en términos de funciones periódicas dominantes. También buscamos conocer la “forma” del espectro.

El objetivo del análisis espectral es describir la distribución de la varianza (respecto a la frecuencia) de una serie de tiempo, lo que es un indicador de la distribución de la energía para las diferentes frecuencias. Para series de tiempo estocásticas tales como los vientos y las olas, las contribuciones de los diferentes componentes de frecuencias son medidas en términos de densidad de potencia (o energía) espectral (PSD por sus siglas en inglés). Los métodos espectrales se clasifican en paramétricos, involucran datos específicos y asignan un modelo predeterminado a las series de tiempo y se usan para series de tiempo cortas; y los no-paramétricos, que se basan en las

transformaciones convencionales de Fourier, en este caso no son datos específicos y son utilizados para series de largo periodo. Estimar el espectro de energía es muy útil en una variedad de aplicaciones, incluyendo la detección de señales ocultas en amplias bandas de ruido.

Para efectos de esta tesis nos enmarcaremos en los métodos no-paramétricos. Dentro de este grupo existen varias técnicas para estimar el PSD, el más simple y comúnmente usado es el método del periodograma; otras técnicas no-paramétricas son el método multitaper, y el método de Welch que es un estimador mejorado de PSD propuesto por Welch [17].

Para calcular el espectro de las series del INOCAR se usó la función `spectrum_v6` que es una modificación de la función `spectrum` de las librerías de Matlab; para obtener la estimación del espectro esta función basa su desarrollo en el método de Welch. Este método divide los datos de la serie de tiempo en segmentos, y calcula un periodograma modificado de cada segmento y luego un promedio de las estimaciones de PSD. Estos promedios reducen la varianza del estimado espectral respecto a la varianza que resultaría de aplicar un periodograma simple al registro completo.

Dentro del análisis espectral es necesario el uso de ventanas, las mismas que se emplean para dividir la serie de tiempo en sub-grupos

de n puntos previo a ser procesadas por la transformada de Fourier [18]. Aunque el traslape entre los segmentos en el método de Welch introduce información redundante, se puede minimizar este efecto mediante el uso de una ventana rectangular, la misma que reduce la importancia o el peso dado a los segmentos traslapados; existen ventanas más complejas que se usan según el tipo de series a ser analizadas. Para el presente trabajo se escogió la ventana Hanning.

Para graficar el PSD se usó una modificación de la función `specplot` de la librería de Matlab, obteniéndose un gráfico de energía espectral con su respectivo rango de confianza del 95% para cada una de las series de INOCAR. El espectro está limitado por la frecuencia Nyquist ($1/2 \Delta t$), para el presente estudio se está trabajando con datos mensuales de anomalías por lo cual la frecuencia Nyquist corresponde a 0.5 cpm (ciclos por mes), así mismo se aplicó el análisis espectral a los promedios diarios de las series, siendo la frecuencia Nyquist 0.5 cpd (ciclos por día).

2.4.3. Análisis espectral cruzado

El término espectro cruzado se refiere a la potencia (poder/energía) “común” entre dos series de tiempo coincidentes. La utilización de este análisis se centra en determinar la concordancia que existe entre dos variables como una función de frecuencia. El análisis espectral cruzado

realiza un análisis similar al momento de estimar la densidad espectral (PSD), con la diferencia de que considera dos series cuyo vector tiempo es coincidente para ambas ($t_1 = t_2$). Para estimar el PSD, el espectro cruzado toma en consideración las porciones correlacionadas de las amplitudes y fases relativas de las dos series en cuestión.

Existen dos maneras de cuantificar las características del espectro cruzado; la primera es una función del espectro cruzado como producto de una función de amplitud, llamada espectro de amplitud cruzada, y la segunda sería una función de fase llamada espectro de fase. El espectro de amplitud cruzada nos da la distribución de pequeñas amplitudes respecto a la frecuencia mientras que el espectro de fase indica el ángulo (o tiempo) por el cual una serie precede o lidera a la otra serie como una función de frecuencia. El espectro cruzado es el resultado del producto matemático entre la amplitud cruzada y el espectro de fase [18].

Como primer paso se aplicó la función `crosscorr` de la librería de Matlab para calcular la correlación cruzada entre las series costeras y las series del Océano Pacífico. Esta rutina calcula la función correlación cruzada para determinados desfases (lags). Con esta información se generó un gráfico `pcolor` para cada lag; en total se graficaron 41 lag por cada estación de INOCAR.

Posteriormente se aplicó una adaptación de la función spectrum de la librería de Matlab, que permite calcular el espectro cruzado entre dos series, obteniéndose así la densidad espectral cruzada (CPSD), los valores de coherencias y el ángulo de desfase para cada punto de grilla.

Capítulo III

RESULTADOS

3.1. Frecuencias Significativas

La aplicación del análisis espectral se realizó primeramente a los datos mensuales de anomalías. Con la finalidad de tener un espectro más suavizado en el que pueda apreciarse mejor las frecuencias que imperan en el mismo, y considerando que el cálculo del espectro, mediante el método de Welch también utiliza el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) que utiliza potencias de 2, se escogieron sub-series de 64 puntos de longitud (potencia de 2 inmediata inferior a la longitud de mi serie) y un traslape de 32 puntos (traslape del 50% de mis sub-serie), estos datos de entrada permiten visualizar en la gráfica, además del espectro, los límites superior e inferior del 95 % de confianza.

Se procedió a graficar los espectros para cada una de las series de INOCAR (Figuras 3 - 6); además, para tener una referencia de las frecuencias que predominan en el Océano Pacífico y ver el comportamiento de las mismas, se seleccionaron 3 puntos de grilla a la altura del ecuador (0°), a diferentes longitudes, las mismos que corresponden a 100°W , 140°W y 180° (Figura 7 – 9).

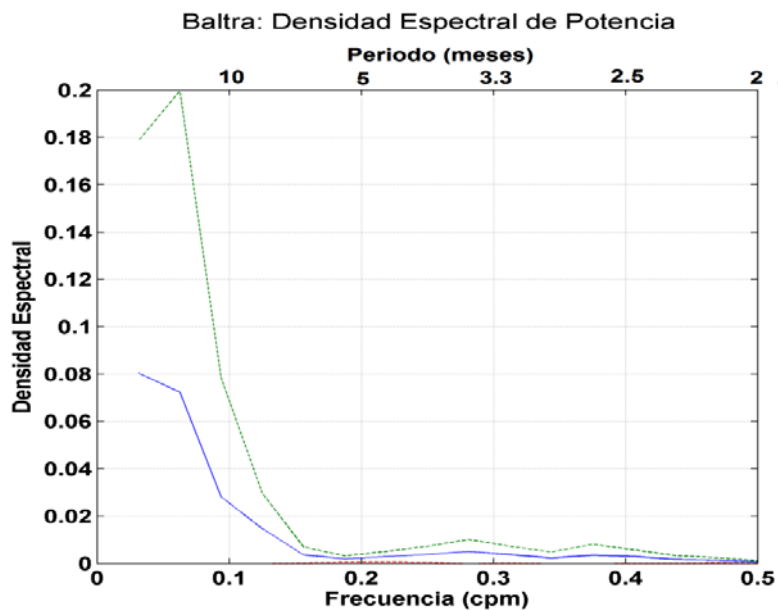


Figura 3. Densidad de Energía Espectral para la estación de Baltra (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

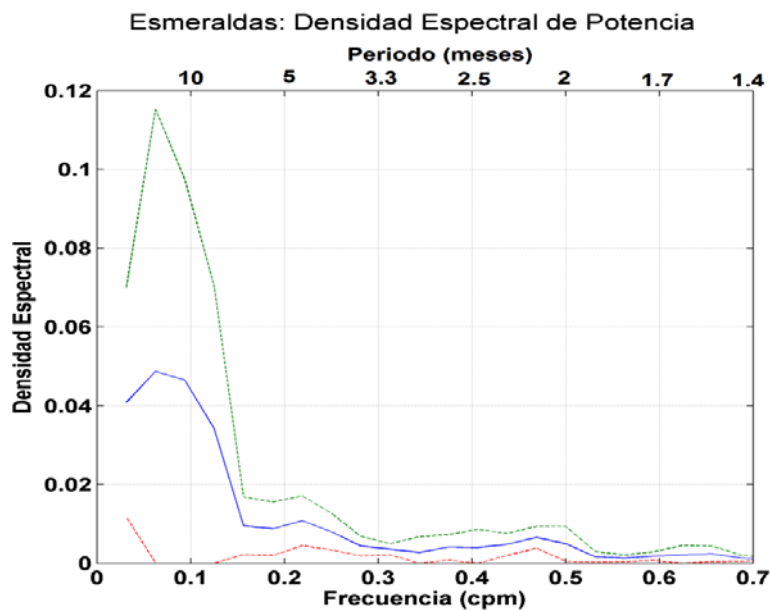


Figura 4. Densidad de Energía Espectral para la estación de Esmeraldas (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

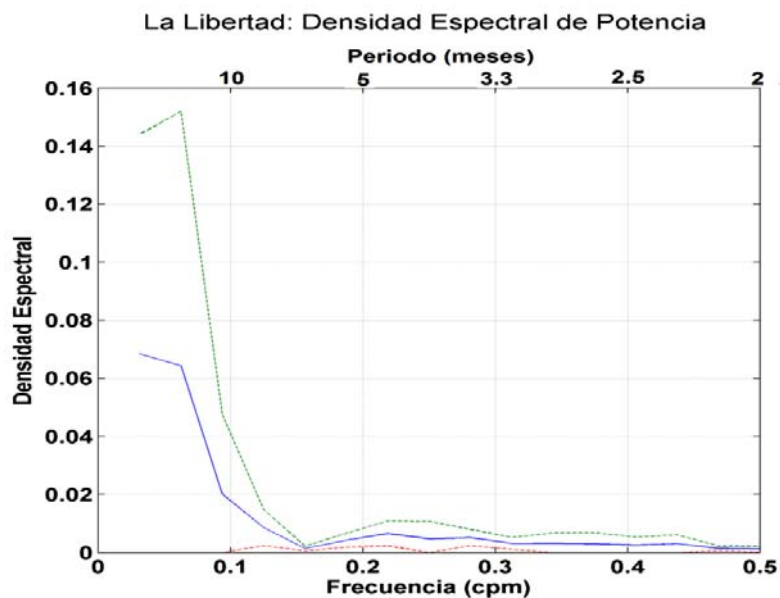


Figura 5. Densidad de Energía Espectral para la estación de La Libertad (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

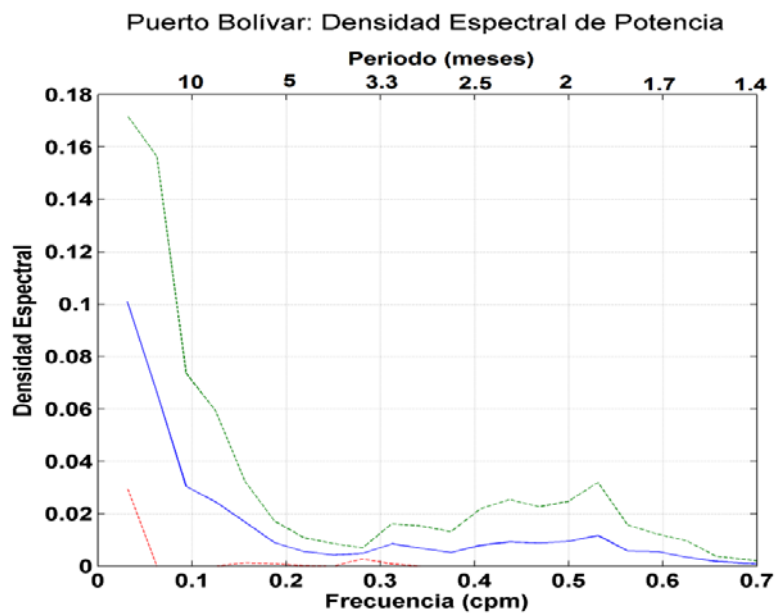


Figura 6. Densidad de Energía Espectral para la estación de Puerto Bolívar (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

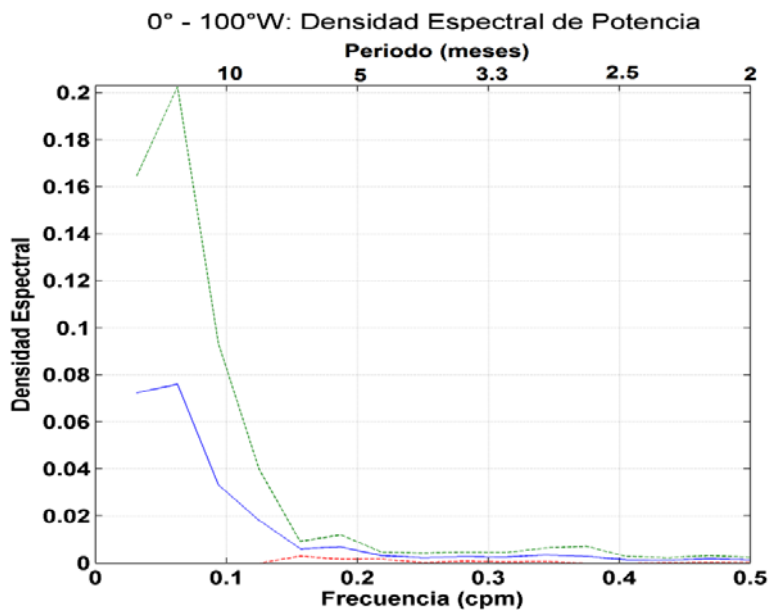


Figura 7. Densidad de Energía Espectral para el punto de grilla 0°-100°W (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

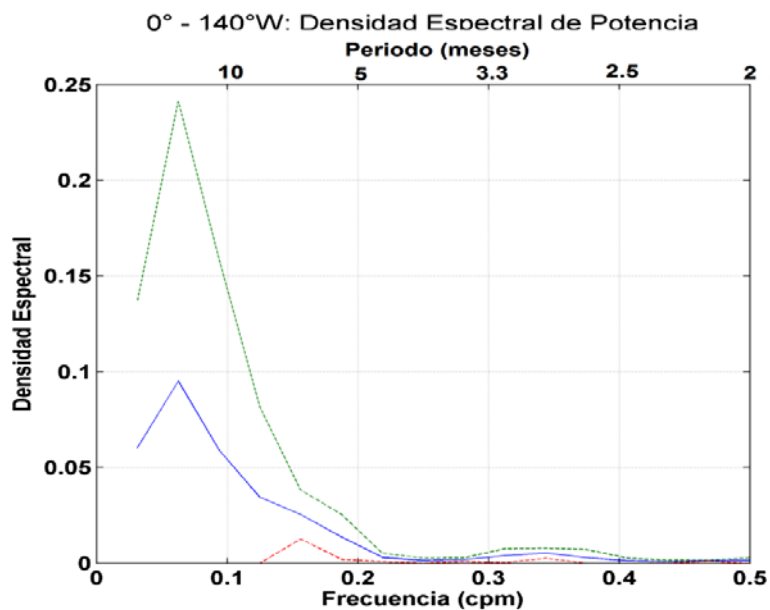


Figura 8. Densidad de Energía Espectral para el punto de grilla 0°-140°W (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

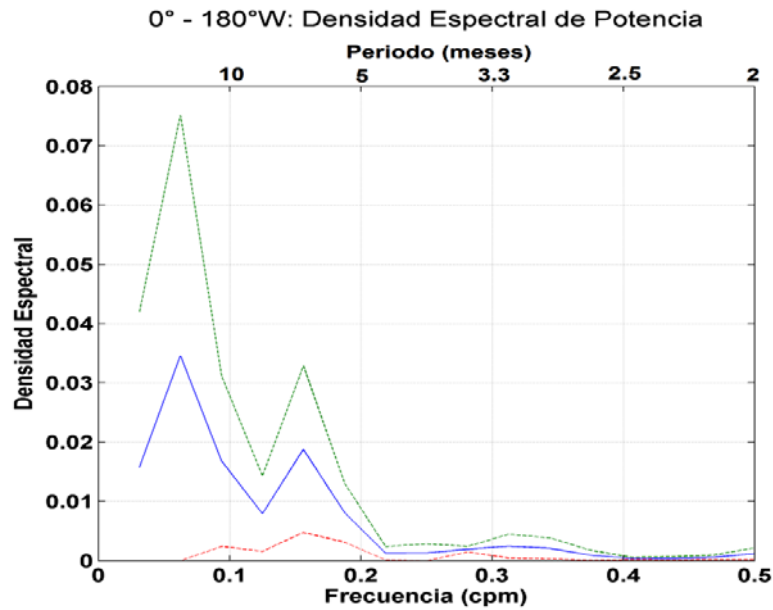


Figura 9. Densidad de Energía Espectral para el punto de grilla 0° - 180° W (datos mensuales). La densidad espectral está en m^2/cpm . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

Puesto que a partir de la frecuencia Nyquist el espectro es casi igual a cero, los gráficos fueron truncados en dicha frecuencia, a excepción de las estaciones de Esmeraldas y Puerto Bolívar en que se truncó el espectro en la frecuencia 0.7. De los gráficos de los espectros se identificaron las frecuencias más representativas; encontrándose una frecuencia significativa de 0.0625 cpm (16 meses) para 3 estaciones, exceptuando la estación de Puerto Bolívar que presenta una frecuencia de 0.03125 (32 meses). La considerable predominancia de esta frecuencia puede deberse al efecto de aliasing (o contaminación); puesto que se está trabajando con anomalías mensuales, algunos de los componentes de frecuencia pueden estar enmascarados en otras

frecuencias y/o ser minimizados por la gran amplitud de la frecuencia encontrada. Considerando lo mencionado el periodo de 16 meses podría ser atribuido al ciclo anual. En la Tabla IV se resume las frecuencias con sus respectivos periodos y densidad espectral para cada una de las series.

Tabla IV. Frecuencias significativas de los espectros de anomalías mensuales de las series de nivel del mar.

Estación	PSD (m²/cpm)	frecuencia (cpm)	período (meses)
BALTRA	0.07235	0.0625	16.00
ESMERALDAS	0.04870	0.0625	16.00
LIBERTAD	0.06435	0.0625	16.00
P. BOLIVAR	0.10089	0.03125	32.00
0°-100°W	0.07599	0.0625	16.00
0°-140°W	0.09507	0.0625	16.00
0°-180°W	0.03455	0.0625	16.00
	0.01881	0.1563	6.40

cpm: ciclos por mes

En los espectros que corresponden a los puntos de grillas del Pacífico se puede observar que la frecuencia significativa es más evidente entre más al oeste se encuentre el punto de grilla; así, en el espectro del punto 0°-180°W llegan a visualizarse dos frecuencias significativas de 0.0625 y 0.01563 cpm (periodos de 16 y 6.4 meses respectivamente), a

diferencia del punto 0° - 100° W que se aprecia solo la frecuencia de 0.0625 (16 meses) y no es un pico tan marcado.

A fin de identificar frecuencias correspondientes a menor escala de tiempo, se aplicó el análisis espectral a las series completas de promedios diarios de las estaciones de INOCAR. Para este análisis se escogieron sub-series de 8192 puntos de longitud (2^{13}) y un traslape de 4096 puntos (2^{12}). Estos valores se aplicaron a las series de Baltra, La Libertad y Puerto Bolívar; en tanto que para la serie de Esmeraldas se consideraron sub-series de 4096 puntos (2^{12}) y un traslape de 2048 puntos (2^{11}). En las Figuras 10 a 13., se muestran los espectros diarios.

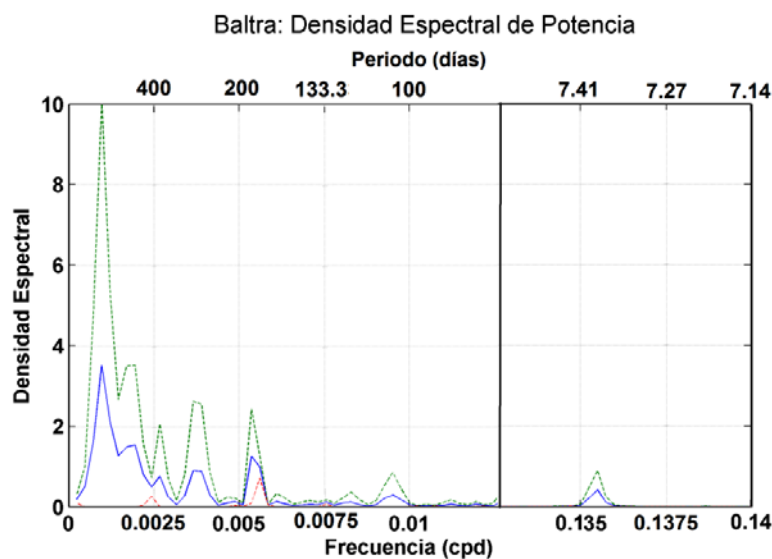


Figura 10. Densidad de Energía Espectral para la estación de Baltra (datos diarios). La densidad espectral está en m^2/cpd . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

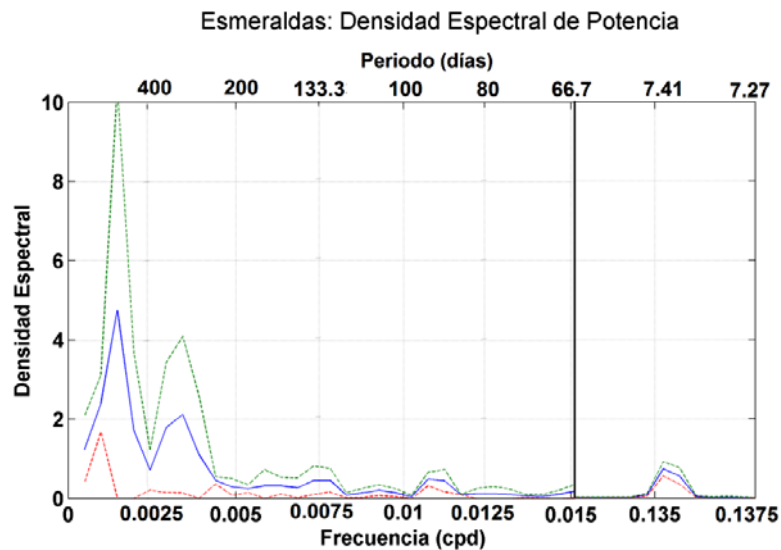


Figura 11. Densidad de Energía Espectral para la estación de Esmeraldas (datos diarios). La densidad espectral está en m^2/cpd . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

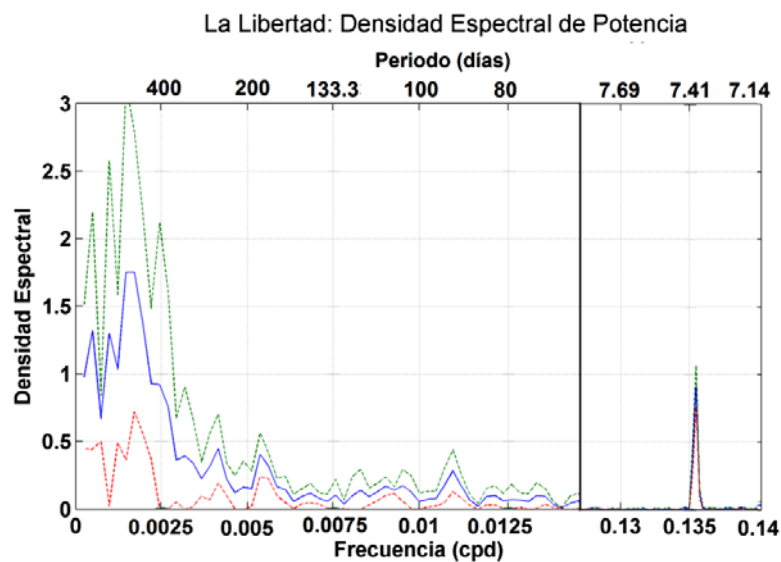


Figura 12. Densidad de Energía Espectral para la estación de La Libertad (datos diarios). La densidad espectral está en m^2/cpd . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

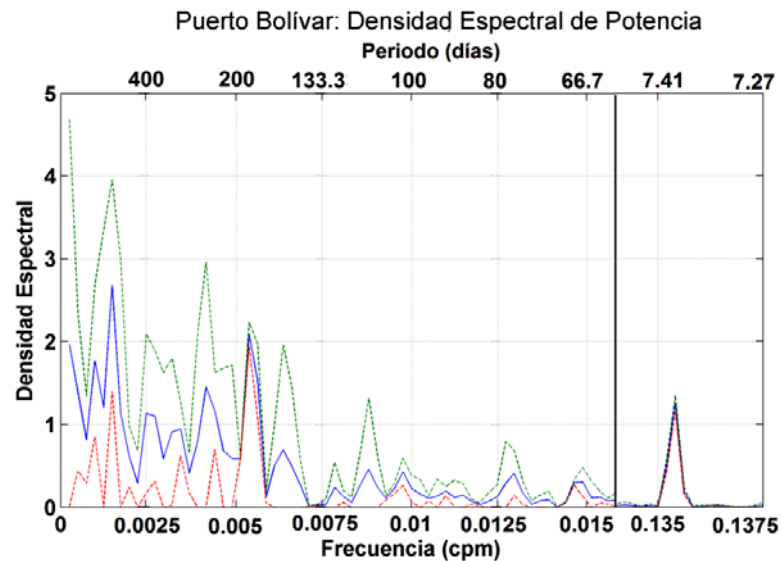


Figura 13. Densidad de Energía Espectral para la estación de Puerto Bolívar (datos diarios). La densidad espectral está en m^2/cpd . La línea azul es el espectro. Los límites de confianza del 95% están representados por las líneas verde y roja.

Para identificar las frecuencias significativas presentes en los espectros se tomó en consideración lo dicho por Stuart et al (1971): Para que la amplitud de un pico sea predominante debe tener por lo menos tres puntos que destaquen del ruido de fondo y esta debe ser dos o tres veces mayor que la amplitud del ruido que lo rodea. Las frecuencias de oscilación encontradas en los espectros de datos diarios se resumen en la Tabla V. La banda de frecuencia significativa para las series se encontró entre las frecuencias de 0.00146-0.00158 cpd (periodos de 22 y 21 meses respectivamente), a excepción de la estación de Baltra, donde se encontró una frecuencia de 0.00098 cpd (periodo de 34.1 meses). Esto difiere con las frecuencias encontradas en el espectro de

anomalías mensuales; cuyas frecuencias significativas corresponde al periodo de 16 meses. Otras frecuencias de oscilación encontradas en los espectros corresponden a periodos 2, 3, 6, 8 y 9 meses (Tabla V).

Tabla V. Frecuencias significativas de las series de nivel del mar del INOCAR (datos diarios).

ESTACIÓN	PSD	frecuencia	período	
	(m ² /cpd)	(cpd)	(días)	(meses)
BALTRA	3.51733	0.00098	1024	34.1
	0.89956	0.00379	263.8	8.8
	1.26419	0.00537	186.2	6.2
	0.22084	0.13525	7.4	0.2
ESMERALDAS	4.76014	0.00146	682.7	22.8
	2.11499	0.00342	292.6	9.8
	0.46881	0.01098	91.0	3.0
	0.73849	0.13525	7.4	0.2
LIBERTAD	1.75224	0.00158	630.9	21.0
	0.44913	0.00415	240.9	8.0
	0.40253	0.00537	186.2	6.2
	0.28346	0.01099	91.0	3.0
	0.90984	0.13550	7.4	0.2
P. BOLIVAR	2.67686	0.00146	682.7	22.8
	1.45430	0.00415	240.9	8.0
	2.08877	0.00537	186.2	6.2
	0.41123	0.01294	77.3	2.6
	1.25557	0.13550	7.4	0.2

cpd: ciclos por día

3.2. Frecuencias de Oscilación

Para determinar que fuerzas astronómicas, o combinaciones de las mismas, gobiernan las oscilaciones que conforman la onda del nivel del mar, se usó el análisis armónico. En este estudio no se va a profundizar tanto en el análisis armónico de marea, simplemente se usará esta herramienta para identificar las frecuencias que corresponden a dichas oscilaciones. Para el desarrollo de este análisis se trabajó con datos horarios de las estaciones mareográficas. Del análisis armónico realizado a cada estación se obtuvieron 68 componentes armónicos estándar, con un intervalo de confianza del 95%; de estos, 50 componentes son significativos para las estaciones de Esmeraldas, La Libertad y Puerto Bolívar y solo 33 para Baltra. En la Tabla VI se muestra las componentes significativas, obtenidas del análisis armónico para la estación de Baltra; para que un componente armónico sea considerado significativo debe tener un valor de SNR mayor a 1; el SNR es la relación al cuadrado entre la amplitud (tercera columna) y el error de amplitud (cuarta columna) [16], la información completa de esta serie, así como de las demás estaciones se encuentra en el Anexo A.

Tabla VI. Resultados del Análisis Armónico de Baltra, componentes significativas.

Marea	frecuencia	amplitud	amp_err	fase	fase_err	snr
*SA	0.0001141	0.0421	0.005	234.90	7.55	66
*MM	0.0015122	0.0095	0.006	6.87	34.25	2.7
*MF	0.0030501	0.0125	0.005	270.21	26.83	6
*2Q1	0.0357064	0.0014	0.001	119.75	38.54	2.3
*Q1	0.0372185	0.0032	0.001	159.93	15.95	8.1
*O1	0.0387307	0.0095	0.001	36.37	6.03	93
*TAU1	0.0389588	0.0021	0.001	312.08	27.48	5.6
*NO1	0.0402686	0.0031	0.001	102.33	16.01	12
*P1	0.0415526	0.0260	0.001	166.88	2.24	6.3e+002
*S1	0.0416667	0.0073	0.001	256.68	7.21	68
*K1	0.0417807	0.0783	0.001	111.01	0.67	5.3e+003
*J1	0.0432929	0.0071	0.001	147.65	7.36	55
*SO1	0.0446027	0.0022	0.001	350.88	21.91	5.6
*OO1	0.0448308	0.0067	0.001	43.90	8.23	54
*2N2	0.0774871	0.0192	0.005	223.60	14.31	16
*MU2	0.0776895	0.0263	0.005	114.97	10.78	25
*N2	0.0789992	0.1537	0.005	260.90	1.79	9.6e+002
*NU2	0.0792016	0.0322	0.005	144.10	8.67	36
*GAM2	0.0803090	0.0102	0.005	290.22	28.19	4.6
*M2	0.0805114	0.7218	0.005	297.44	0.40	2.3e+004
*MKS2	0.0807396	0.0072	0.005	118.03	36.47	2.4
*L2	0.0820236	0.0158	0.005	148.43	17.05	12
*T2	0.0832193	0.0116	0.005	313.53	25.51	5.9
*S2	0.0833333	0.1940	0.005	112.02	1.44	1.8e+003
*K2	0.0835615	0.0509	0.005	231.52	4.90	1,00E+02
*M3	0.1207671	0.0016	0.000	83.37	12.46	17
*SK3	0.1251141	0.0006	0.000	240.26	32.23	2.3
*M4	0.1610228	0.0011	0.000	159.03	17.22	13
*MS4	0.1638447	0.0007	0.000	323.43	24.97	5.1
*S4	0.1666667	0.0008	0.000	207.20	22.73	6.8
*2MK5	0.2028035	0.0003	0.000	291.68	35.48	3.1
*M6	0.2415342	0.0006	0.000	131.08	29.72	4.4
*2MS6	0.2443561	0.0013	0.000	299.60	11.20	27

* Componentes armónicos significativos

En las Figuras 14 - 17 se puede ver la representación gráfica del análisis armónico calculado para todas las estaciones. La frecuencia de oscilación significativa que presenta mayor amplitud para las cuatro estaciones es 0.0805114 cph (periodo de 12h 25min), y corresponde a M2 que es la componente Lunar principal semidiurna, con una amplitud entre 0.7218 y 1.1126 metros y ángulo de fase entre 297.44 y 356.96 grados. Luego se tienen las frecuencias 0.0833333, 0.0789992 y 0.0417807 cph (periodos de 12h00, 12h 40min y 23h 56min respectivamente) que corresponden a los armónicos S₂, N2 y K1 que corresponden a Solar principal semidiurna, Elíptica Lunar mayor semidiurna y Lunisolar declinacional diurna respectivamente; con amplitudes entre 0.0783 y 0.3099 metros, los ángulos de fase para estos armónicos varían entre 111.01 y 319.16 grados.

En las Figuras 14 - 17, literal a) se muestra la serie de datos originales (azul), el pronóstico de marea (verde) y la marea residual (rojo). Como se mencionó en la metodología, existen varios factores que intervienen en las mareas, en especial en las zonas costeras.

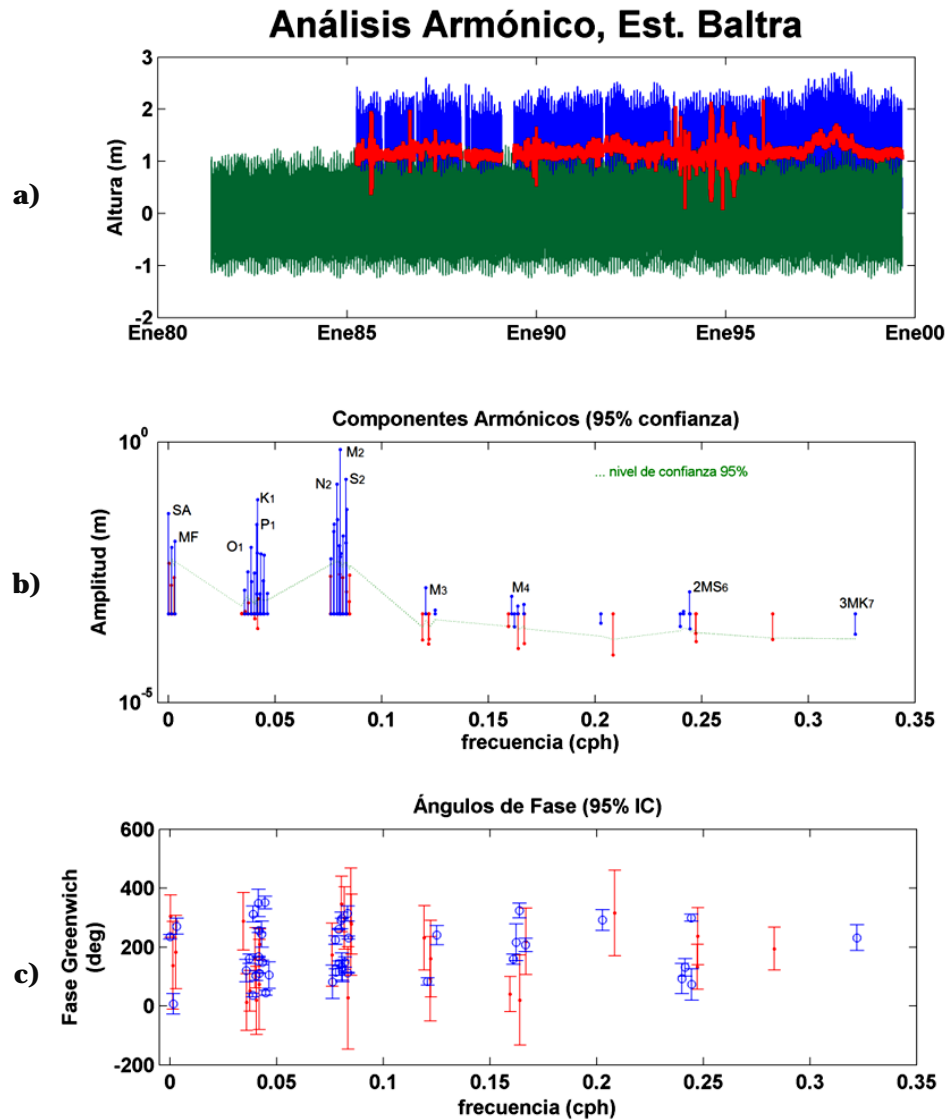


Figura 14. Análisis armónico del nivel del mar en Baltra. a) En azul registro observado, en verde predicción de marea, en rojo residual. b) Amplitud de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo). c) Fase de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo)

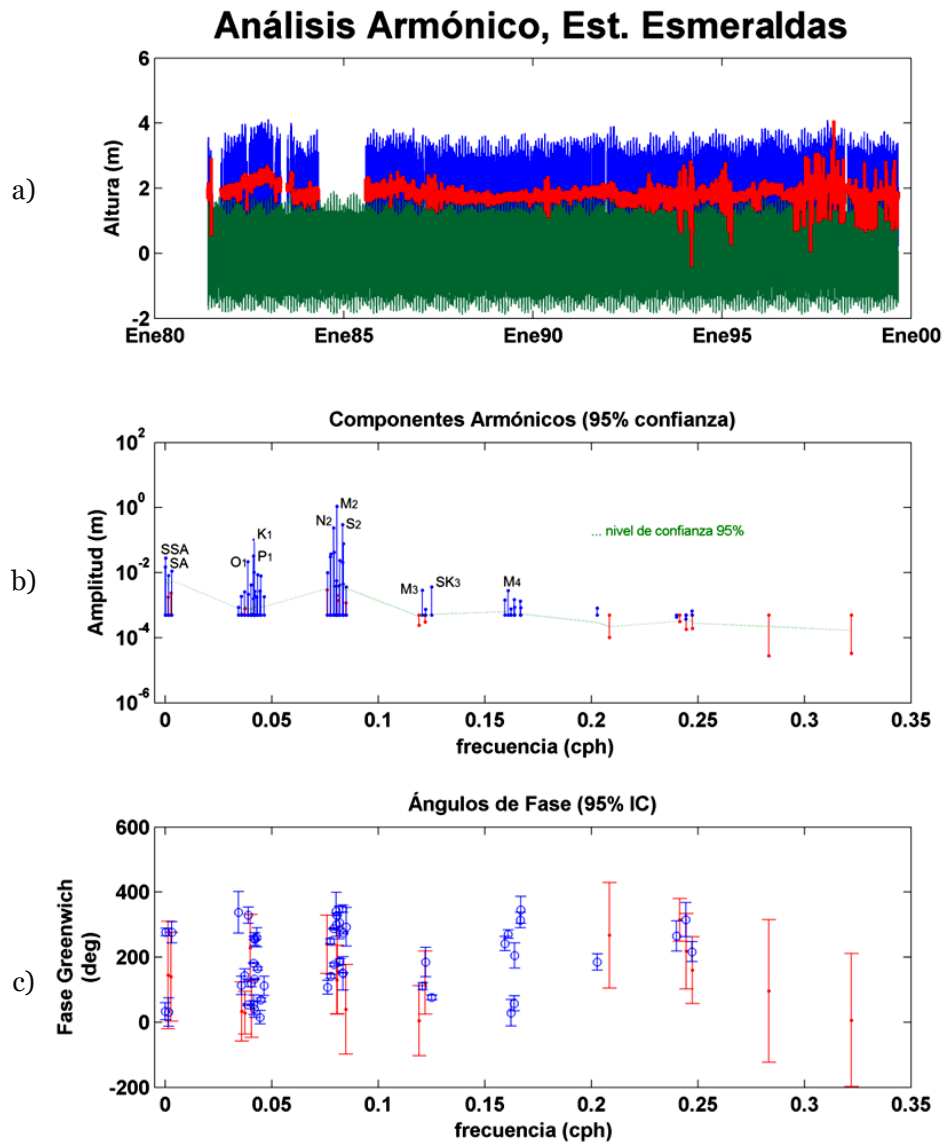


Figura 15. Análisis armónico del nivel del mar en Esmeraldas. a) En azul registro observado, en verde predicción de marea, en rojo residual. b) Amplitud de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo). c) Fase de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo)

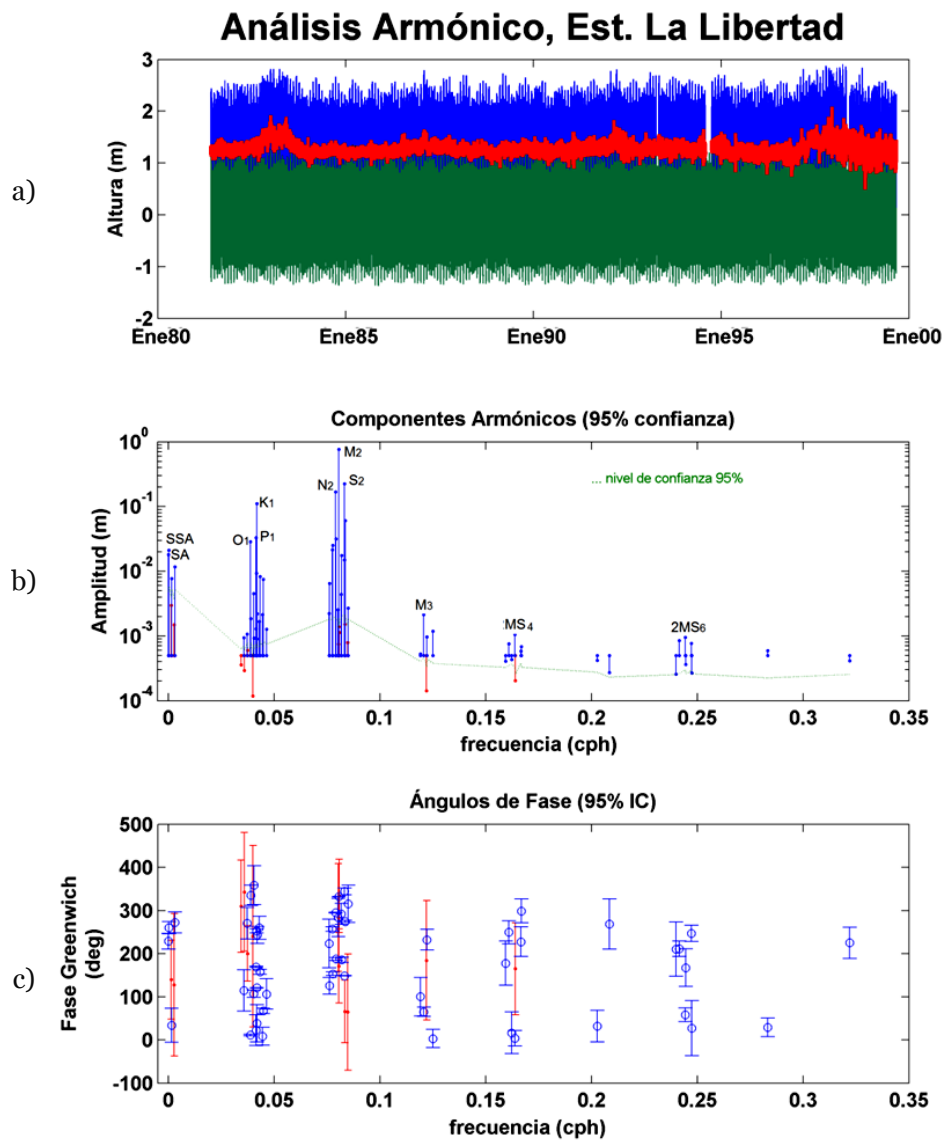


Figura 16. Análisis armónico del nivel del mar en La Libertad. a) En azul registro observado, en verde predicción de marea, en rojo residual. b) Amplitud de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo). c) Fase de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo)

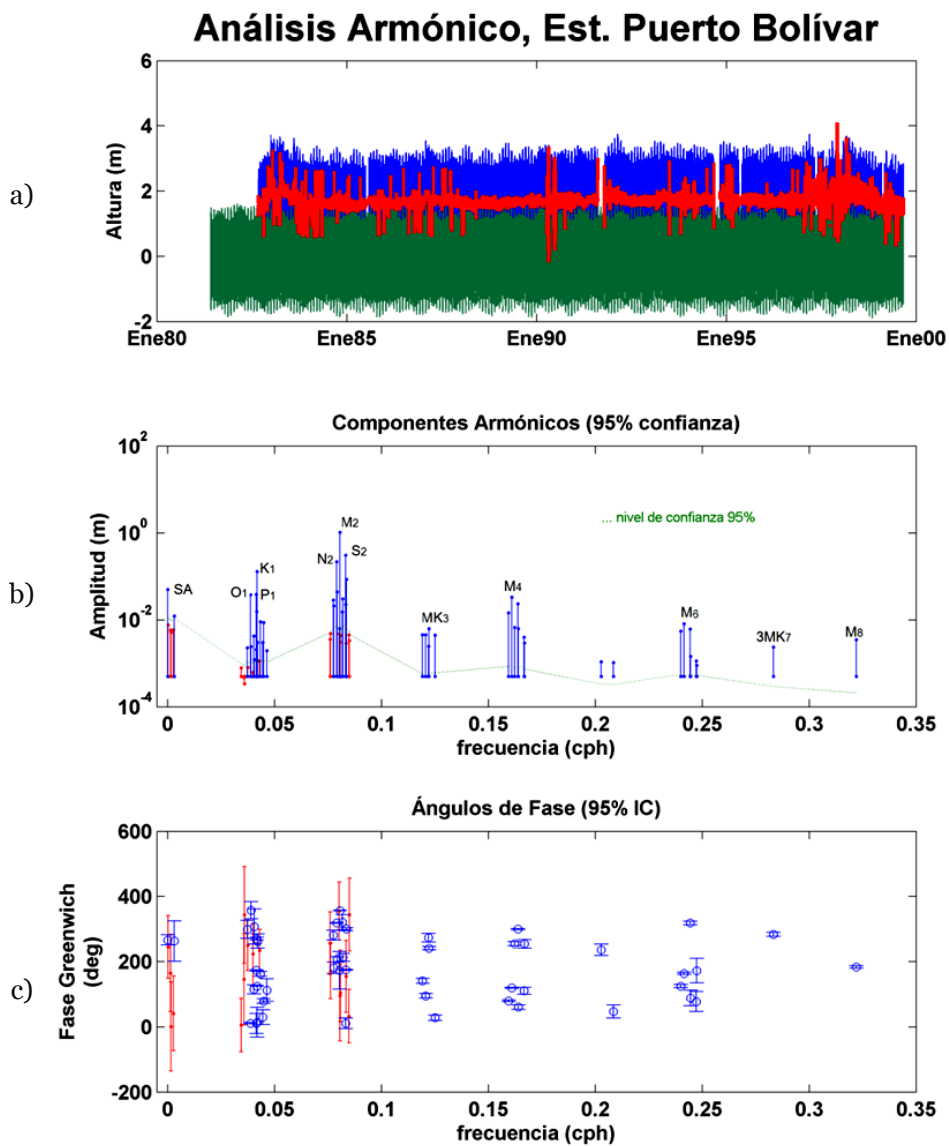


Figura 17. Análisis armónico del nivel del mar en Puerto Bolívar. a) En azul registro observado, en verde predicción de marea, en rojo residual. b) Amplitud de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo). c) Fase de los armónicos encontrados: significativos (azul), no significativos (rojo)

Como resultado de la intervención de ese tipo de factores, en los cuales no se entrará en detalle en el presente trabajo, se ve que la marea residual presenta una variación, indicando que existe un desfase entre la serie original y la predicha, esta variación es más evidente en la estación de Puerto Bolívar, donde posiblemente tenga la influencia de los factores que intervienen en el estuario. La estación que presenta una menor variación es La Libertad.

Para realizar el análisis armónico se seleccionó el período que va desde junio de 1981 hasta septiembre de 1999, permitiendo abarcar los eventos Niño más notables como fueron el Niño 82-83 y 97-98. Se puede observar que, la marea residual además del desfase existente respecto a la marea predicha, también muestra un aumento durante los eventos Niño.

Realizando una comparación entre los periodos, correspondientes a las frecuencias obtenidas del análisis armónico, y los obtenidos del análisis espectral tanto para las anomalías mensuales como los promedios diarios, se encontró común un ciclo semestral (182 días = análisis armónico y 186 días = análisis espectral); además se denotó la presencia de un ciclo anual (12 meses en el análisis armónico y ≈ 16 meses en el análisis espectral).

3.3. Desfase entre oscilaciones del Océano Pacífico y el NMM de la costa del Ecuador

Se procedió a calcular el coeficiente de relación lineal para medir el grado de asociación que existe entre las series de INOCAR y los datos de altimetría, para establecer el área del océano Pacífico cuyas oscilaciones se relacionan con el NMM en la costa ecuatoriana. Con los coeficientes de correlación se realizaron gráficos pcolor para cada una de las 4 estaciones de INOCAR (Figura 18). Esto nos permitió tener una idea preliminar del área del océano Pacífico que tiene mayor influencia sobre nuestras costas. Los límites de dicha área varían para cada estación (Tabla VII), y corresponden al área del Pacífico con coeficientes de correlación mayores a 0.4.

Tabla VII. Coordenadas del área del Océano Pacífico que tiene influencia sobre el nivel del mar en la costa ecuatoriana.

Estaciones	Coordenadas (esquinas)			
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
Baltra	08°28'56" N	148°12'44" W	10°43'40" S	79°21'00" W
Esmeraldas	05°14'21" N	128°45'09" W	07°59'24" S	79°21'00" W
La Libertad	07°44'02" N	146°42'55" W	10°58'38" S	79°21'00" W
Puerto Bolívar	01°59'45" S	142°13'28" W	14°58'08" S	86°50'24" W

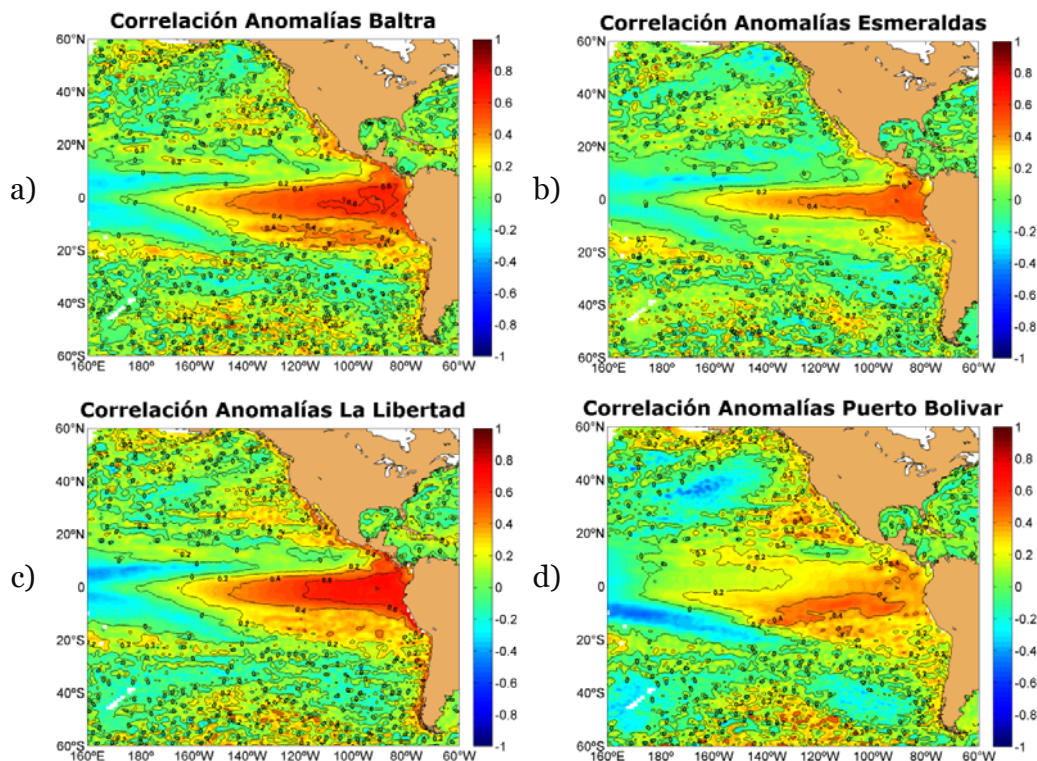


Figura 18. Gráficos de correlación entre las series de INOCAR y los datos de altimetría. a) Baltra, b) Esmeraldas, c) La Libertad, y d) Puerto Bolívar.

Las estaciones que muestran una mayor correlación son Baltra y La Libertad, para estas estaciones el área de influencia es mayor, y va desde la costa continental hasta aproximadamente 150°W y de ahí reduce paulatinamente hasta alcanzar una correlación de cero a la altura de 180° de longitud oeste. La estación de esmeraldas, aunque mantiene casi la misma área de influencia, presenta menores coeficientes de correlación. Por último el área de influencia que le corresponde a la estación de Puerto Bolívar es más reducida y no

comienza en la costa continental; y, de forma similar que la estación de Esmeraldas, los coeficientes de correlación son bajos.

Es necesario conocer también el comportamiento de los parámetros meteorológicos. Se realizó un breve análisis de los datos de temperatura superficial del aire (TSA) y presión atmosférica superficial (PSA) de las estaciones de INOCAR; de este análisis, la mínima temperatura (19.6° C) se observó en la serie de La Libertad, y la máxima (28.1° C) en La Libertad y P. Bolívar. La TSA promedio está entre 24° y 26° C. Para los datos de PSA, se encontró el valor mínimo en Puerto Bolívar y el máximo en La Libertad; los valores promedios oscilan entre 1011.1 y 1012.4 mb. La desviación estándar mostró que la distribución de los datos está cercana al promedio, encontrándose para los datos de PSA, una variación menor a 0.14%; en tanto que para la TSA esta variación osciló entre 2.22 y 9.08% (Tabla VIII).

Tabla VIII. Análisis de los parámetros meteorológicos

Estación	Parámetro	Min.	Max.	Prom.	DE	CV
Esmeraldas	PSA (mb)	1009.2	1015	1012.4	± 0.948	0.09%
	TSA (° C)	24.9	27.9	26.1	± 0.580	2.22%
La Libertad	PSA (mb)	1009.9	1016.9	1013.4	± 1.440	0.14%
	TSA (° C)	19.6	28.1	23.98	± 2.178	9.08%
Puerto Bolívar	PSA (mb)	1008.1	1013.5	1011.1	± 1.140	0.11%
	TSA (° C)	21.6	28.1	24.8	± 1.748	7.05%
DE: Desviación Estándar		CV: Coeficiente de Variación				

Luego de este análisis, se procedió a calcular el coeficiente de correlación entre el nivel del mar y los datos meteorológicos. Mediante este coeficiente se determinó la correlación que existe entre los datos del nivel del mar y los datos de TSA y PSA. Existe una relación inversa entre el nivel del mar y la PSA, sin embargo no es una relación muy marcada, ya que los valores de r están entre -0.41 y -0.23 ; entre el nivel del mar y la TSA existe una relación directa, de forma similar que con la PSA, la dependencia de las variables no es tan marcada, presentando valores de r entre 0.25 y 0.36 (Tabla IX).

Tabla IX. Coeficiente de correlación entre el Nivel del mar y los datos meteorológicos (estaciones de INOCAR).

Estación	r (PSA)	r (TSA)
Esmeraldas	-0.2395	0.2560
La Libertad	-0.4876	0.4115
Puerto Bolívar	-0.4145	0.3620

Para aplicar la correlación cruzada se asumió que las ondas generadas en el Pacífico son las que influyen el nivel del mar en la costa ecuatoriana; como resultado de esta correlación se generaron una serie de 41 gráficos para cada estación del INOCAR, en total 164 gráficos, no todos mostrados en este trabajo, cada gráfico corresponde a un ciclo de desfase (lag). Como se está trabajando con anomalías mensuales, las

unidades del desfase corresponden a meses. Un desfase positivo indica que la serie del Océano Pacífico lidera sobre la serie costera, en tanto que un desfase negativo indica lo opuesto.

Para encontrar los desfases en que existe mayor correlación se hizo un análisis visual. De este análisis se observó que, para la estación de Baltra, los desfases de mayor correlación están entre -4 y 4 meses, para la estación de Esmeraldas entre -4 y 3 meses, para la estación de La Libertad entre -8 y 3 meses y para la estación de Puerto Bolívar entre 0 y 10 meses (Figuras 19 1 22).

De este análisis se observa que el área que presenta las mayores correlaciones se localiza entre 10°N y 20°S y desde la costa continental hasta aproximadamente 180°W , lo que corrobora el área de influencia que se encontró en la correlación lineal realizada previamente. Los demás lag no son mencionados, considerando que los coeficientes de correlación de los mismos presentan valores muy bajos.

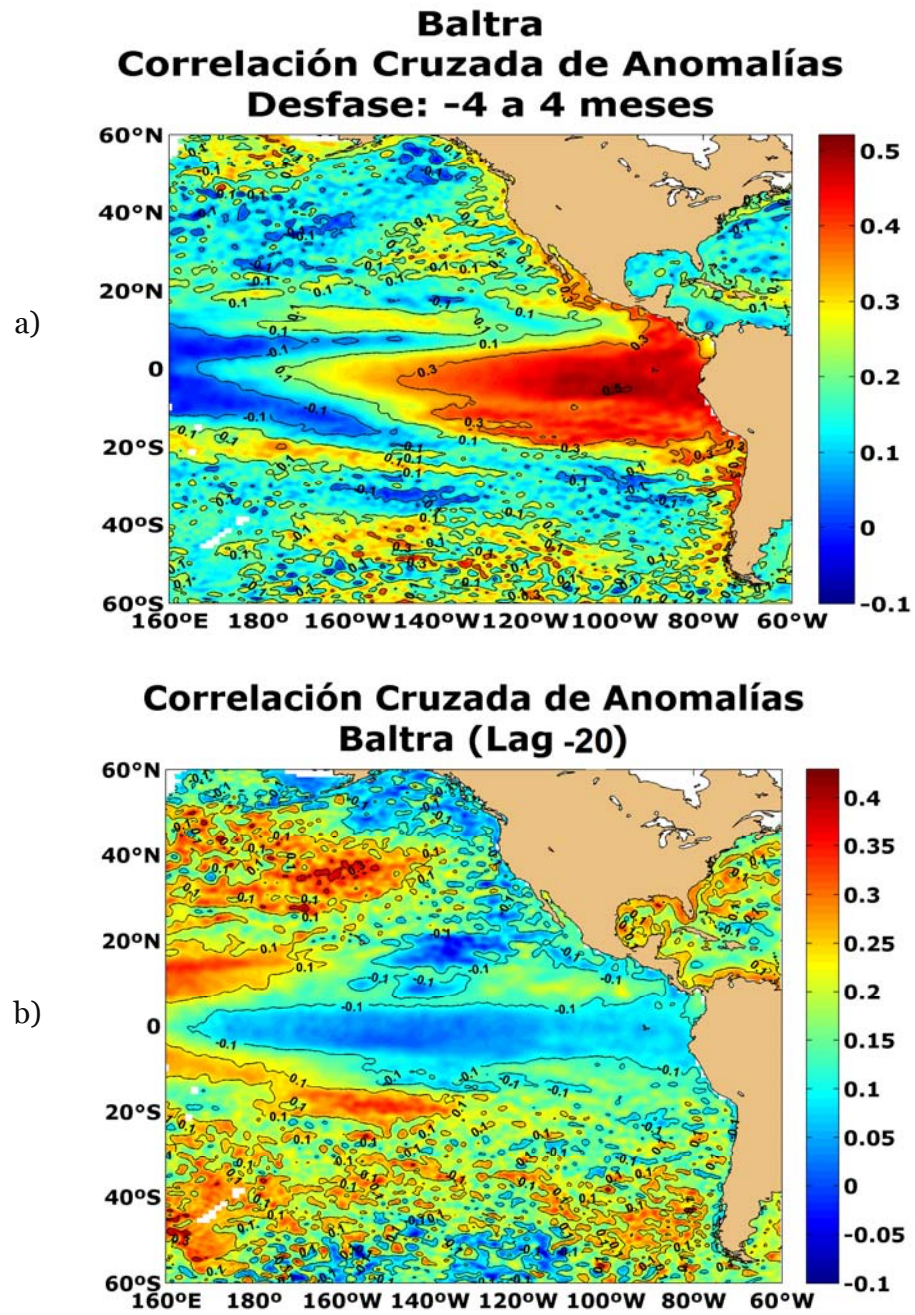


Figura 19. Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de Baltra. a) Promedio de las mayores correlaciones (-4 a 4 meses); b) Menor correlación, desfase negativo de 20 meses.

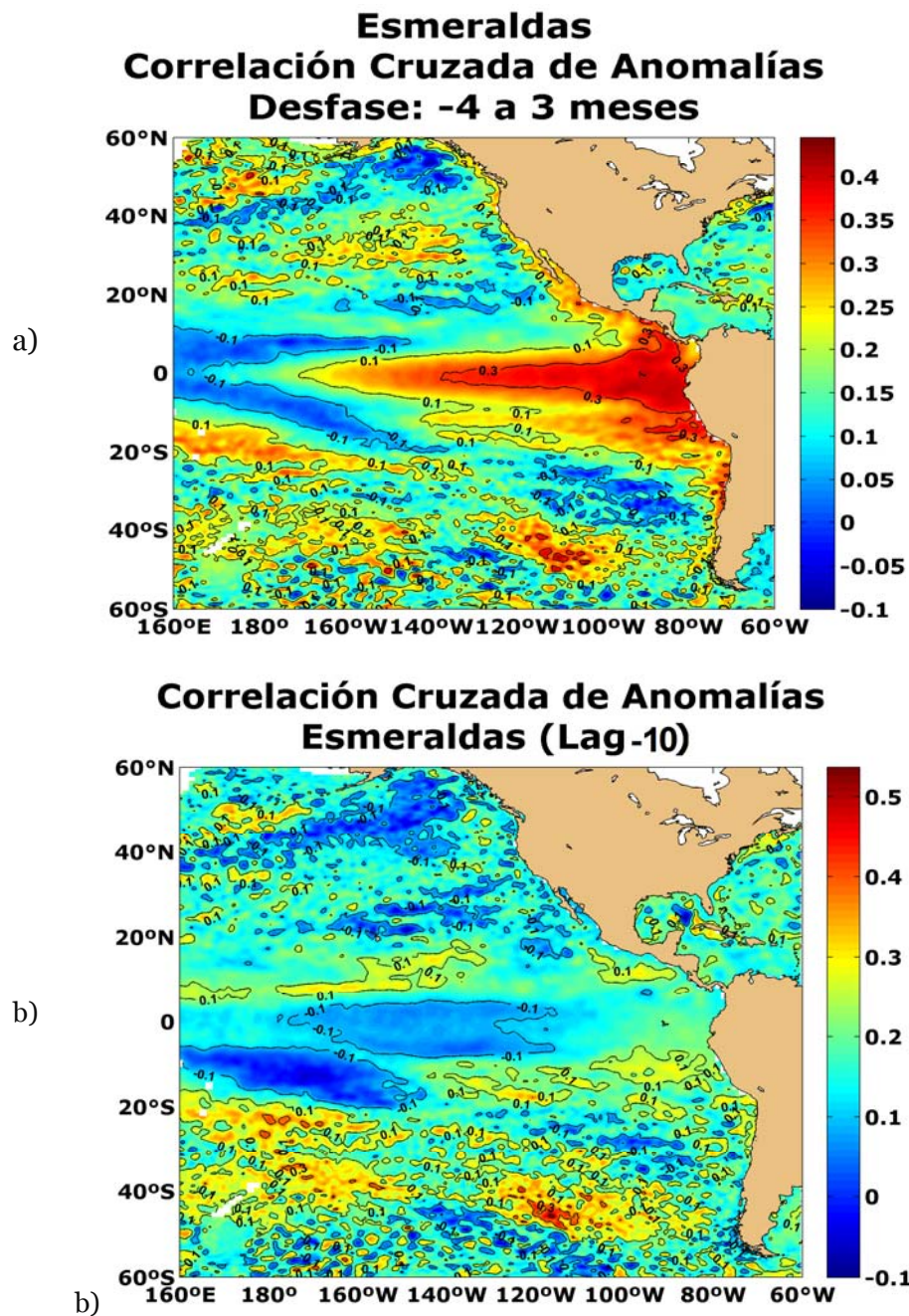


Figura 20. Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de Esmeraldas. a) Promedio de las mayores correlaciones (-4 a 3 meses); b) Menor correlación, desfase negativo de 10 meses.

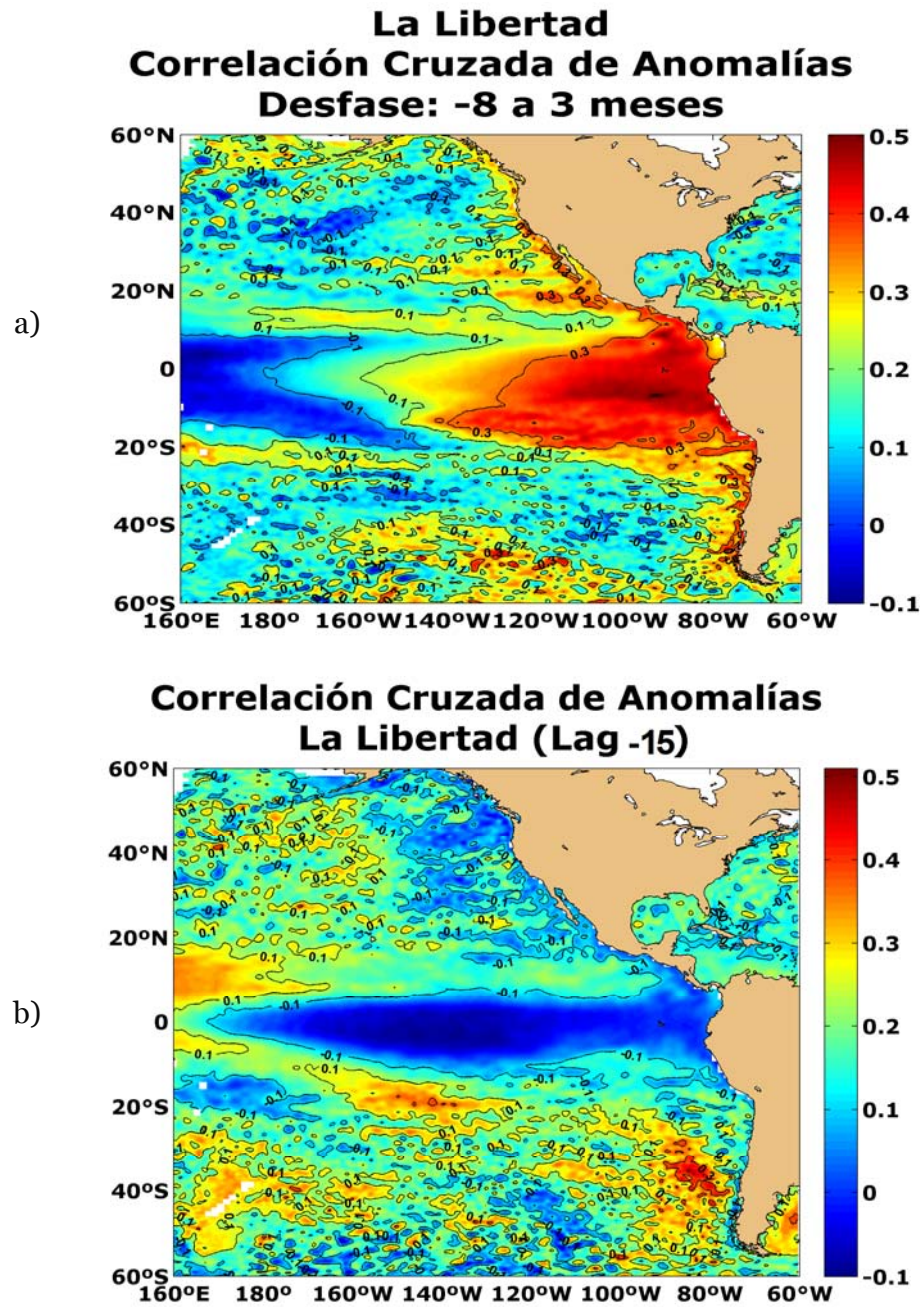


Figura 21. Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de La Libertad. a) Promedio de las mayores correlaciones (-8 a 3 meses); b) Menor correlación, desfase negativo de 15 meses.

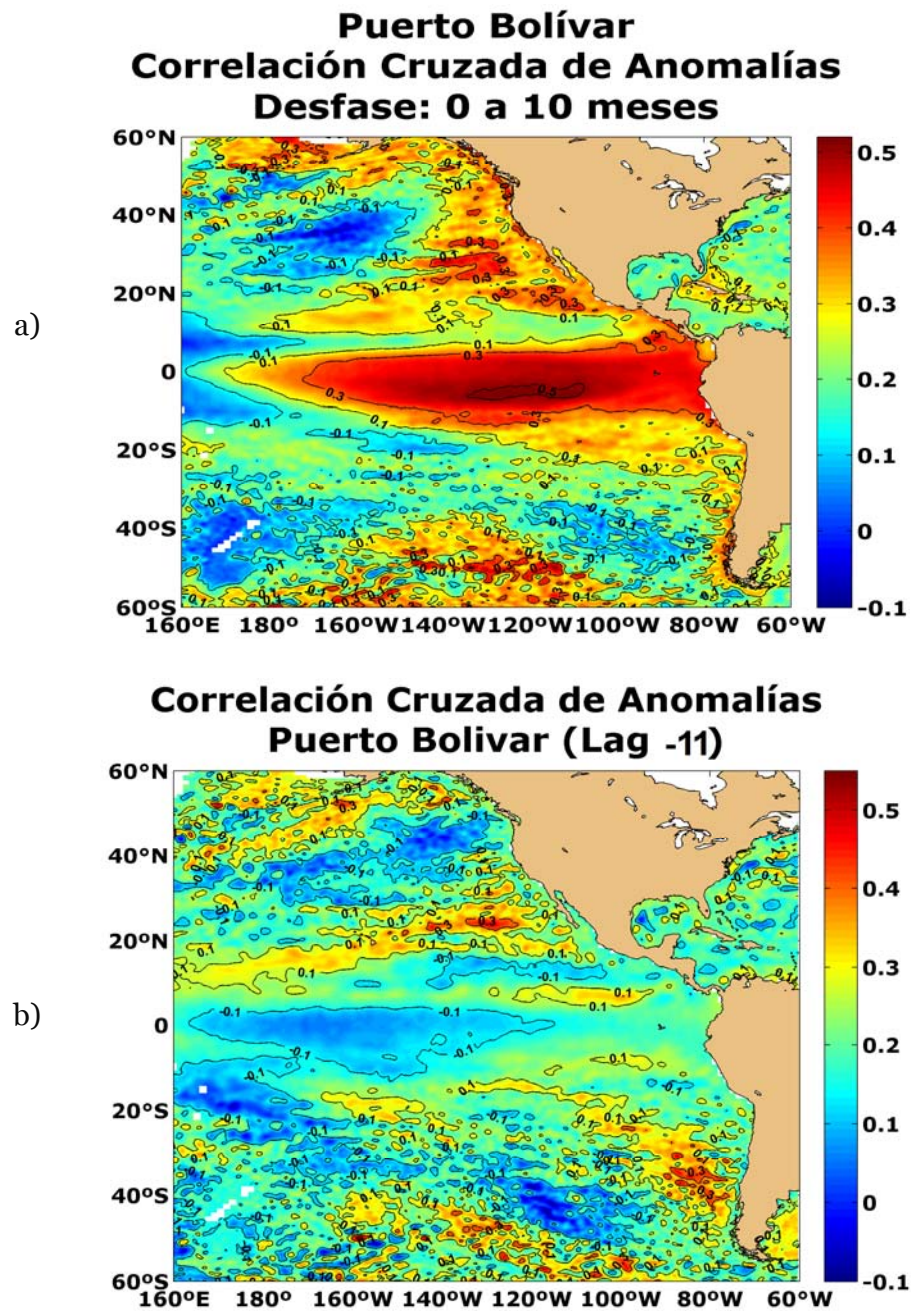


Figura 22. Correlación cruzada entre las series del Océano Pacífico y la estación de Puerto Bolívar. a) Promedio de las mayores correlaciones (0 a 10 meses); b) Menor correlación, desfase negativo de 20 meses.

Como complemento de la correlación cruzada se realizó el espectro cruzado entre las series del Océano Pacífico y las series del INOCAR; de aquí se obtuvieron los valores de densidad espectral, los valores de coherencia y los ángulos de fase de cada espectro. Con esta información se buscó las coherencias mayores a 0.5 y se encontró las frecuencias relacionadas a las mismas, con el fin de establecer aquellos periodos que eran comunes para las cuatro estaciones. La Figura 23, muestra las frecuencias que más se repiten para cada estación y el respectivo porcentaje (respecto al número de frecuencias encontradas) que corresponde a desfases positivos; es decir que las series del Pacífico lideran sobre series de INOCAR de cada frecuencia; estos porcentajes bordean el 40 y 60 % para casi todas las frecuencias.

Se puede observar que existe un mayor número de datos cuya frecuencia se aproxima a cero, 0.03125 cpm, con un desfase positivo del 100 %. Además de esta frecuencia, enfocándonos en la línea que corresponde a porcentajes de desfases positivos se notó que existen cinco picos, con un porcentaje mayor a 50 %, que se repiten para las cuatro series. Las frecuencias correspondientes a esos porcentajes se listan en la. Tabla X, y comprenden periodos de 1.5, 2, 5 y 32 meses.

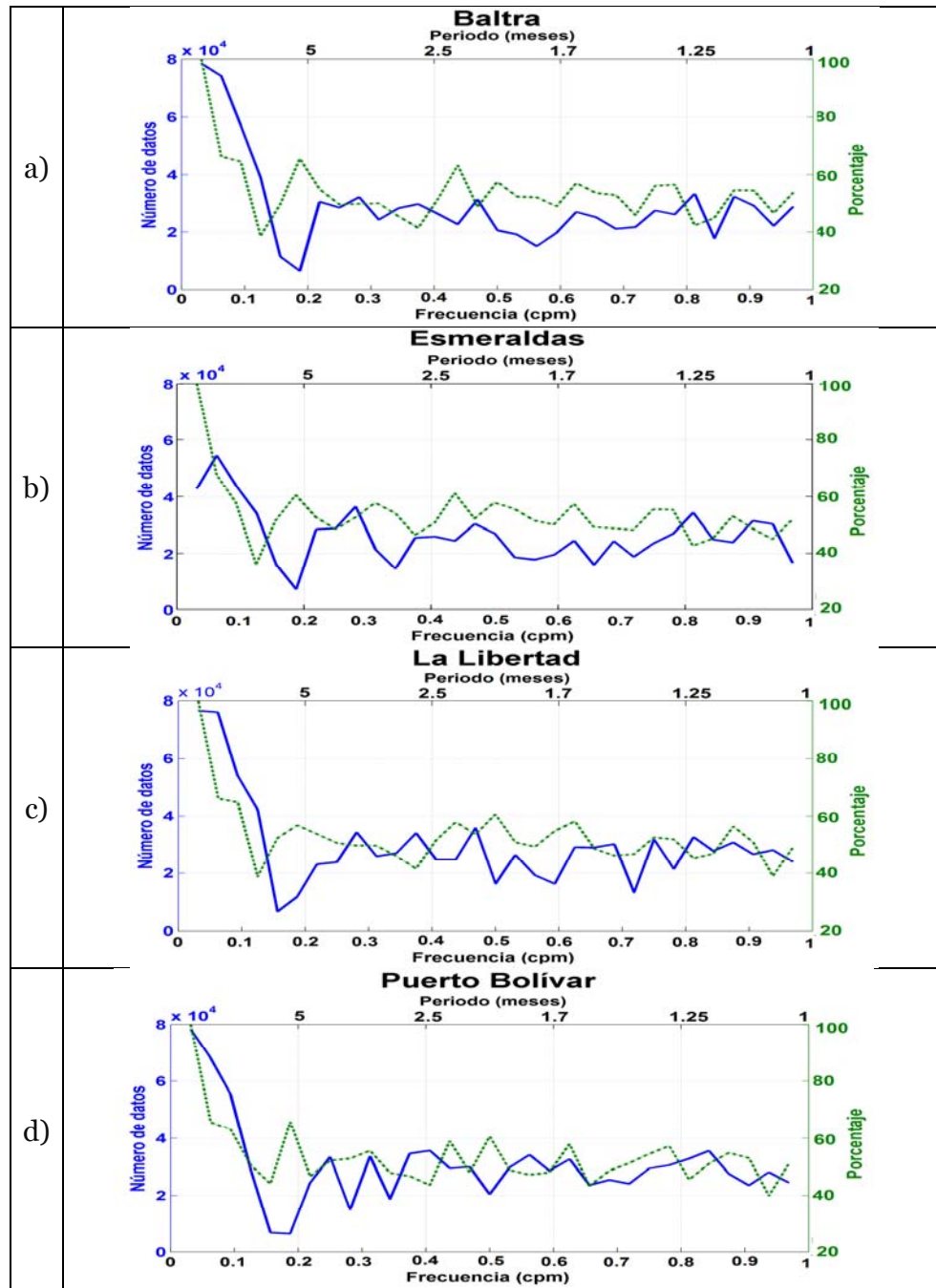


Figura 23. Frecuencias correspondientes a los valores de coherencia mayores a 0.5, obtenidas del espectro cruzado entre las series del Océano Pacífico y a) la Est. de Baltra; b) la Est. de Esmeraldas; c) la Est. de La Libertad; y d) la Est. de Puerto Bolívar. Eje derecho es el porcentaje de desfase positivo que corresponde a cada frecuencia.

Tabla X. Frecuencias y periodos propios de las coherencias mayores a 0.5, obtenidas del espectro cruzado.

f (cpm)	P (meses)	Desfase positivo (%)			
		Baltra	Esmeraldas	La Libertad	P. Bolívar
0.0312	32	100	100	100	100
0.1876	5.3	65	60	56	66
0.4373	2.3	63	61	57	59
0.5019	2.0	57	58	60	60
0.6254	1.6	56	57	58	57
0.7811	1.3	56	55	52	57

3.4. Tendencias del Nivel del Mar en la costa del Ecuador

Para hallar los coeficientes a y b, y la respectiva ecuación de la recta de la línea de tendencia, se trabajó con las series de promedios diarios de cada una de las estaciones del INOCAR.

El cálculo de las líneas de tendencia se realizó tanto para las series completas como para las series en las que se omitió los eventos Niño 82-83 y 97-98; en la Figura 24 se muestran las líneas de tendencia para series sin los eventos Niño mencionados.

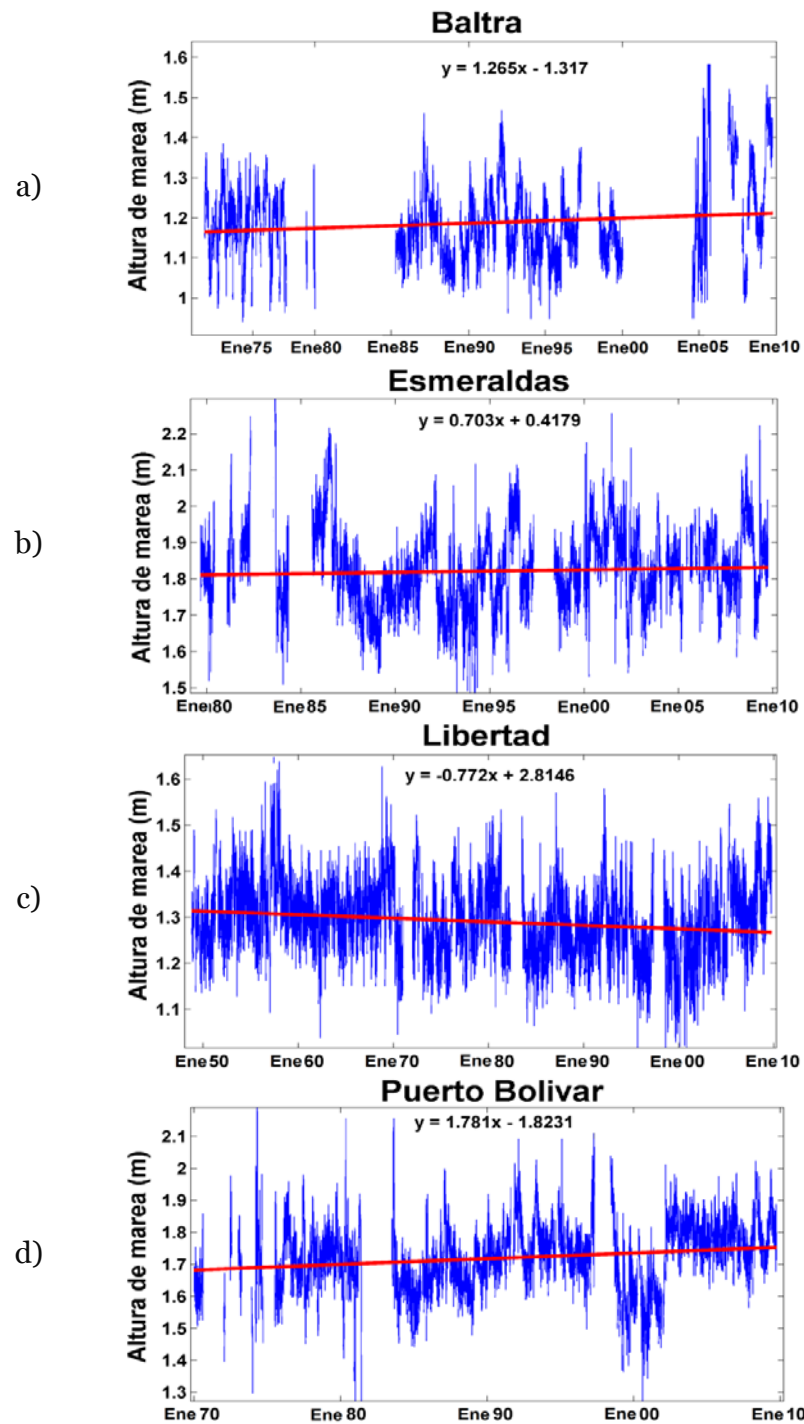


Figura 24. Tendencias del Nivel del mar en la estación de a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; y d) Puerto Bolívar. No se consideró los eventos Niño 82-83 y 97-98

Se puede observar que las estaciones de Baltra, Esmeraldas y Puerto Bolívar presentan una pendiente positiva, lo que indicaría un incremento en el nivel del mar; en tanto que la estación de La Libertad presenta una pendiente negativa en su línea de tendencia, indicando una disminución en el nivel del mar. Al realizar una comparación entre las tendencias de las series completas y aquellas en las que se excluyeron los eventos Niño extremos, se observó que estos eventos extremos influyen sobre la variación del nivel del mar, haciendo que éste presente un ligero aumento. En la Tabla XI se muestra la variación del nivel del mar para ambos escenarios.

Tabla XI. Tendencias del nivel del mar en la costa ecuatoriana.

Estación	Serie con eventos extremos (mm/año)	Serie sin eventos extremos (mm/año)
Baltra	+ 1.617	+ 1.265
Esmeraldas	- 1.277	+ 0.703
La Libertad	- 0.586	- 0.772
P. Bolívar	+ 1.786	+ 1.781

Nota: El signo indica aumento (+) o descenso (-) del nivel del mar.

Con esta información se calculó cuál ha sido la variación del nivel del mar en la costa ecuatoriana y en el Pacífico (3 puntos de grilla), durante el periodo de estudio del presente trabajo. En la Tabla XII nuevamente se presentan ambos escenarios. Aquí se puede apreciar

que la variación del nivel del mar es ligeramente mayor para las series que incluyen los eventos Niño 82-83 y 97-98, sin embargo para los puntos de grilla 140°W y 180° esta variación es menor para el escenario en que no se considera los eventos Niño. Este comportamiento demuestra la influencia de estos eventos, ya sea aumentando o disminuyendo ligeramente las variaciones del nivel del mar.

Tabla XII Variación del NMM en la costa ecuatoriana y de las ANMM en el Pacífico, durante el periodo: Diciembre 1992 a Septiembre 2008.

Estación	Variación del NMM	
	Serie con eventos extremos (cm/15.8años)	Serie sin eventos extremos (cm/15.8años)
Baltra	+ 2.555	+ 1.999
Esmeraldas	- 2.017	+ 1.111
La Libertad	- 0.926	- 1.220
Puerto Bolívar	+ 2.821	+ 2.814
Estación	Variación de las ANMM	
	Serie con eventos extremos (cm/15.8años)	Serie sin eventos extremos (cm/15.8años)
0° - 100°W	- 1.41	- 1.42
0° - 140°W	- 0.96	- 0.95
0° - 180° W	+ 3.88	+ 3.91
Nota: El signo indica aumento (+) o descenso (-) del nivel del mar o las anomalías en el caso del las series del Pacífico.		

En la Tabla XII se observa que hacia el lado del Pacífico occidental, durante los eventos Niño el nivel del mar es menor respecto a la tendencia normal (que no considera eventos extremos). Además se hizo un gráfico pcolor de las tendencias de ANMM (Figura 25). Existe

una clara tendencia global que indica un incremento en el nivel medio del mar; sin embargo, se aprecia una gran diferencia regional, teniendo que hacia el Pacífico occidental hay un mayor incremento del nivel medio del mar de más de 10 mm por año.

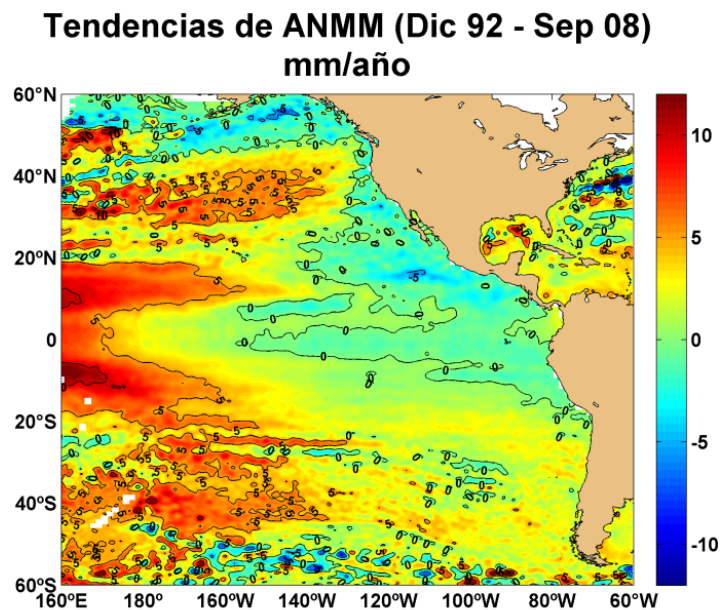


Figura 25. Tendencia de anomalías del Nivel del mar en el Océano Pacífico.

Como se mencionó al principio de esta tesis, esta variación del nivel del mar puede deberse a varios factores; debido a la complejidad de los mismos no se entrará en detalles respecto al aporte de cada uno sobre la variación del nivel del mar.

3.5. Influencia de los Eventos El Niño/La Niña sobre las oscilaciones del nivel del mar en la costa del Ecuador

Para establecer si ha habido una influencia por parte de los eventos ENOS sobre las variaciones del nivel medio del mar, se tomó en consideración el Índice Niño Oceánico (ONI por sus siglas en inglés) como indicador Niño/a [19]; este índice se ha convertido en el estándar que la NOAA utiliza para la identificación de los eventos El Niño (caliente) y La Niña (frío) en el Pacífico tropical. En base a este índice se graficaron las anomalías del nivel del mar de las cuatro estaciones costeras, resaltando los eventos Niño y Niña (Figura 26.).

Se puede apreciar en la Figura 26 que el nivel del mar tiende a aumentar en los años Niño y descende en los años niña. En general, para las cuatro series se observó máximas anomalías positivas, promediando los 0.5 m, durante los eventos Niño 82-83 y 97-98, y las más bajas anomalías, del orden de -0.2 m, para algunos eventos Niña como el del 98-99.

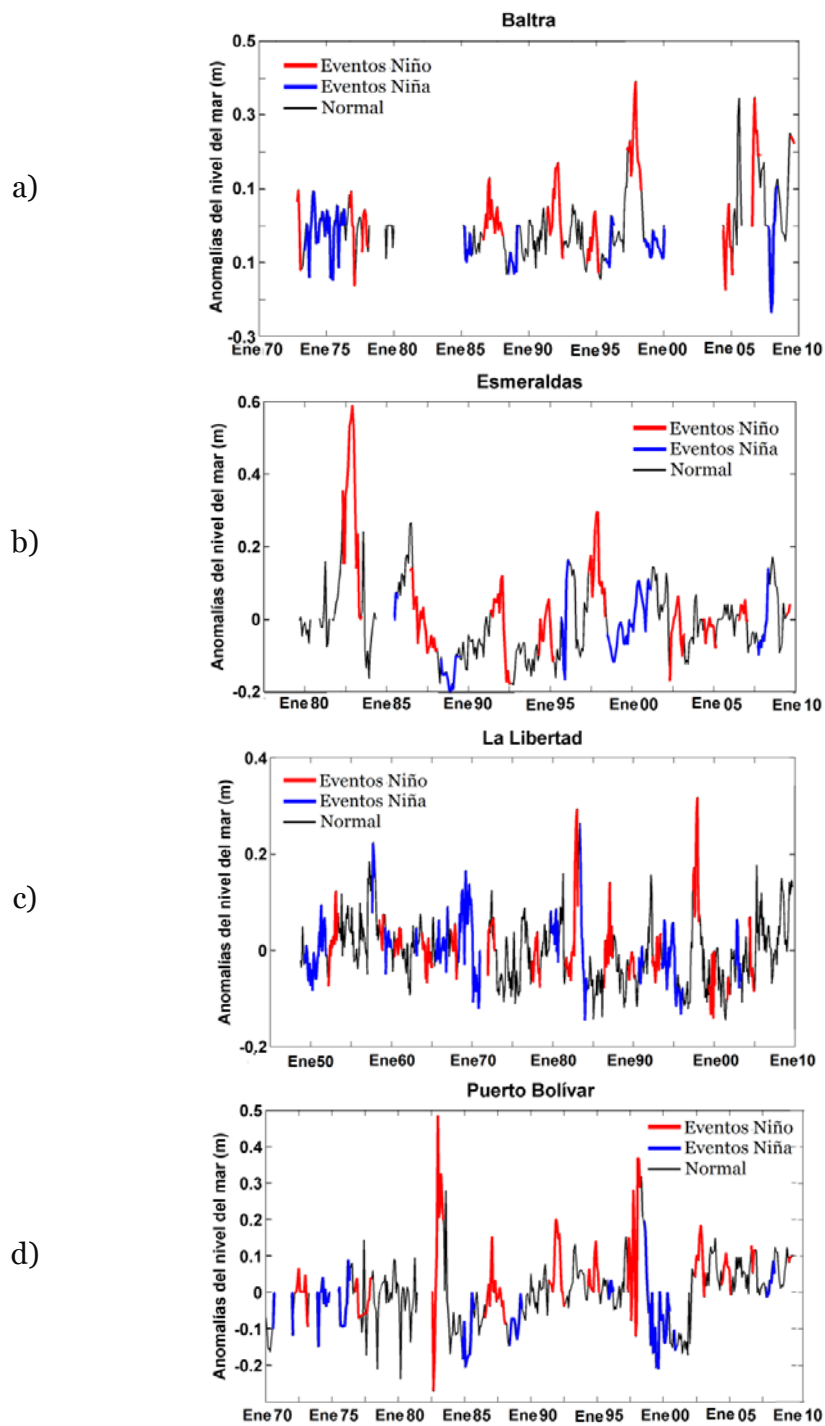


Figura 26. Anomalías del nivel del mar y los respectivos eventos Niño y Niña según el Índice Niño Oceánico (ONI). a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; d) Puerto Bolívar.

También se realizó las gráficas de los parámetros meteorológicos en base al ONI, para ver cuál es el comportamiento de éstos. En las figuras 27 - 29 se puede observar la relación inversa de la PSA y la relación directa de la TSA con respecto a los eventos ENOS. Estas relaciones se evidenciaron también en el coeficiente de correlación calculado para estos parámetros vs el nivel del mar. Wang y Fiedler [22] encontraron una relación similar para las anomalías de temperatura y presión superficial del mar (TSM y PSM respectivamente).

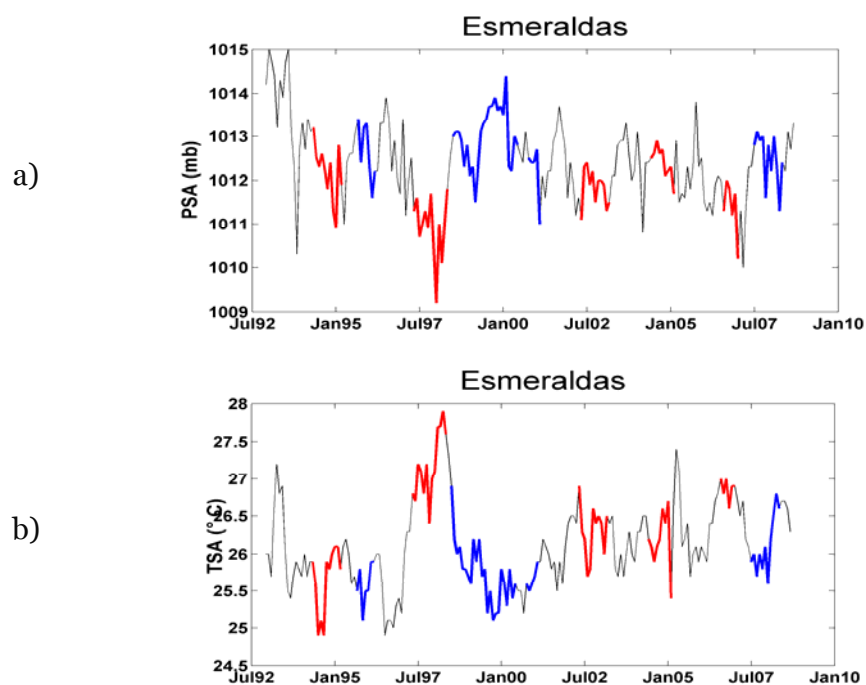


Figura 27. Gráficos de Presión atmosférica superficial (a) y temperatura superficial del aire (b) en base al Índice Niño Oceánico para la estación de Esmeraldas

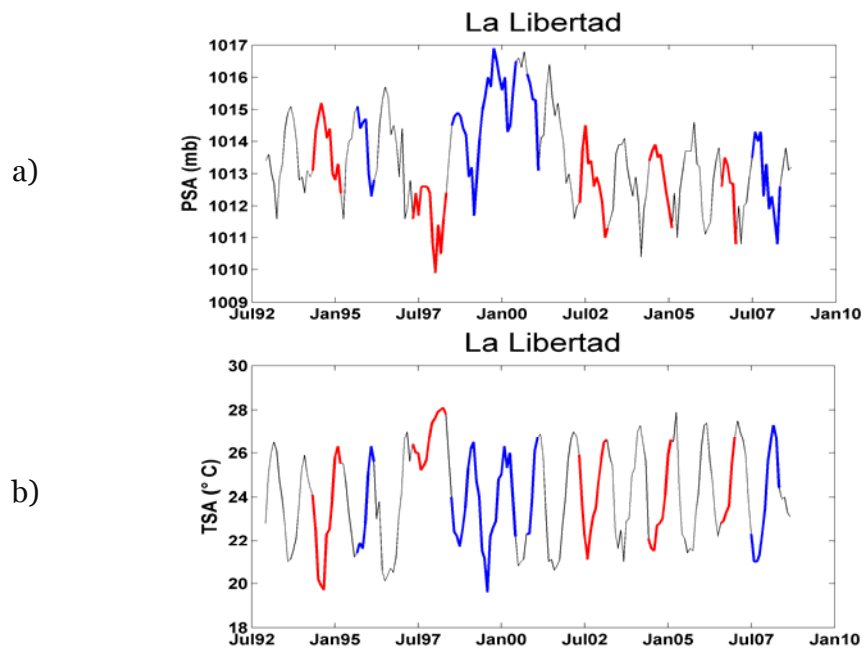


Figura 28. Gráficos de Presión atmosférica superficial (a) y temperatura superficial del aire (b) en base al Índice Niño Oceánico para la estación de La Libertad.

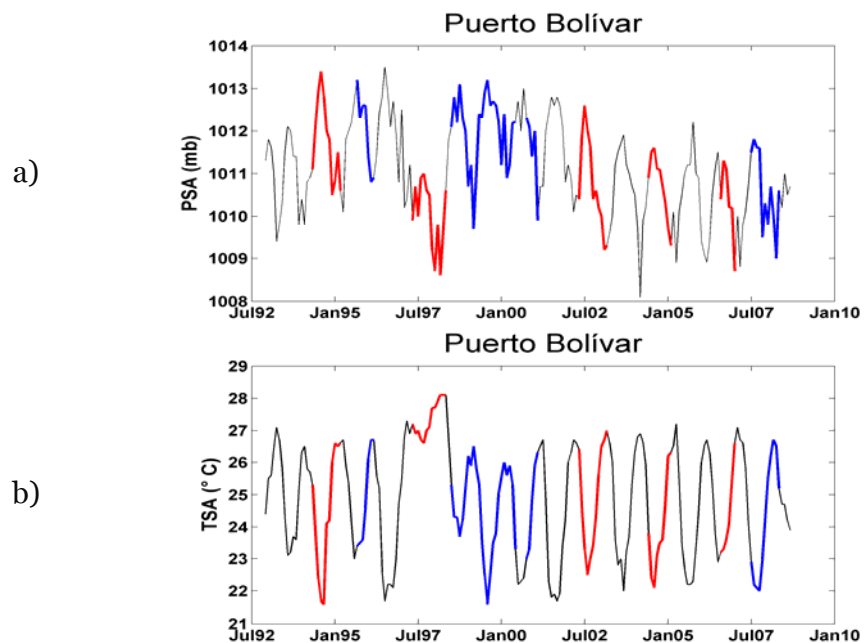


Figura 29. Gráficos de Presión atmosférica superficial (a) y temperatura superficial del aire (b) en base al Índice Niño Oceánico para la estación de Puerto Bolívar.

Además se realizaron gráficos de dispersión entre los datos de anomalías del nivel del mar (ANMM) de las estaciones de INOCAR y el ONI. En la Figura 27, se presenta el gráfico de dispersión entre la estación de La Libertad y el ONI; sin embargo, aquí no se logra apreciar que exista relación alguna.

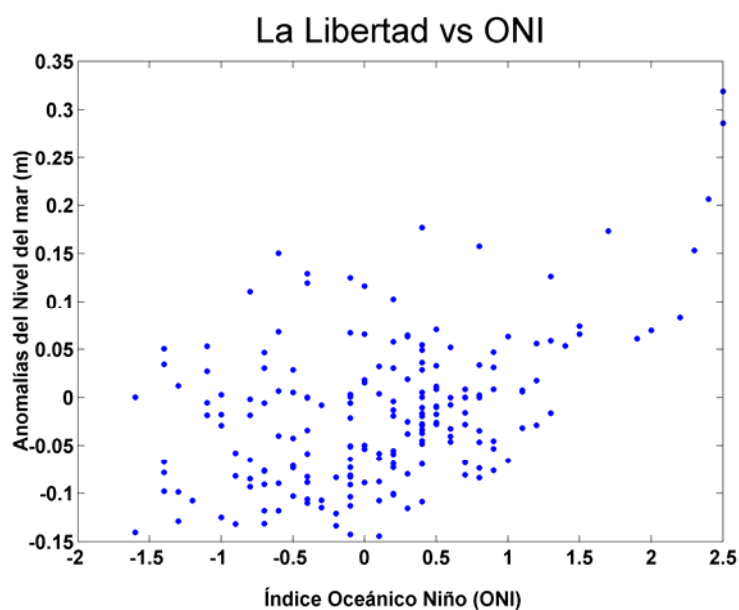


Figura 30. Gráfico de dispersión entre los datos de anomalías de La Libertad y el índice Niño Oceánico.

Al no evidenciarse ninguna tendencia, se le asignó un marcador diferente (en forma y color) para cada evento El Niño y La Niña, a fin de tener una mejor visualización de la distribución de las anomalías para cada evento, con esta misma finalidad solo se consideró el periodo que va de diciembre de 1992 a septiembre del 2008 (Figura 28). Con estos marcadores claramente se observa que los eventos La Niña se

agrupan hacia el lado izquierdo de los gráficos correspondiendo a valores negativos del Índice Niño Oceánico (ONI); de igual forma las anomalías para eventos El Niño se agrupan hacia la derecha en respuesta a valores positivos del mismo índice.

Además, la distribución de cada evento Niño o Niña muestra cierta tendencia, ya que los marcadores correspondientes a los mismos, no presentan una mayor dispersión. Sin embargo esto no aplica a la serie de Puerto Bolívar, específicamente para los eventos Niño 97-98 y Niña 98-99, en los cuales se muestra una gran dispersión de los valores de anomalías.

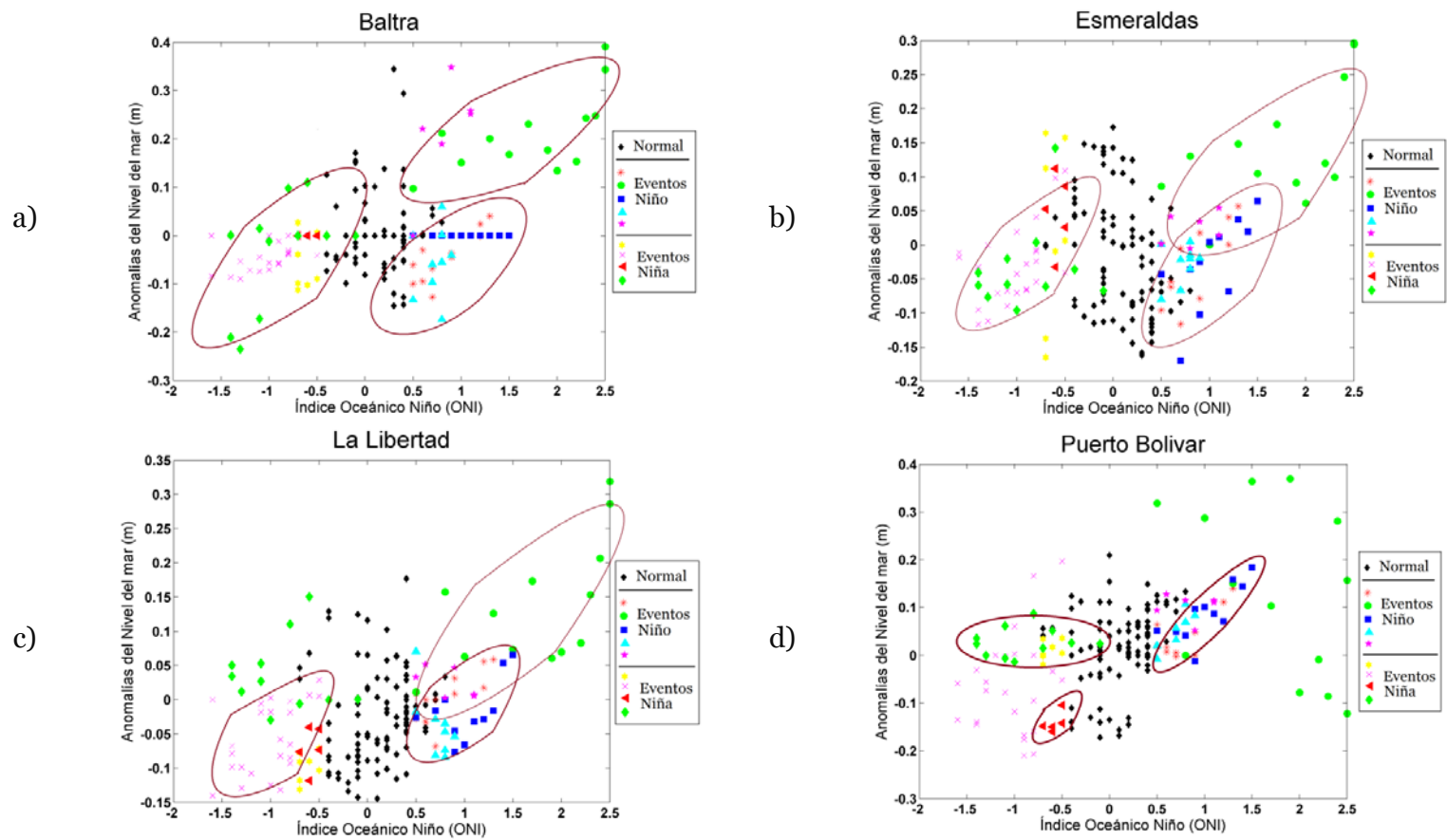


Figura 31. Gráfico de dispersión entre los datos de anomalías del nivel del mar y el índice Niño Oceánico. a) Baltra; b) Esmeraldas; c) La Libertad; y d) Puerto Bolívar. Periodo: Dic/1992 – Sep/2008.

3.6. Máximos anuales del NMM y su proyección estadística para diferentes períodos de retorno

Para realizar el análisis estadístico de extremos se trabajó con las series completas de las estaciones mareográficas del INOCAR. Se creó una serie de máximos anuales para cada estación ordenando los datos en forma descendente (Tabla XIII).

Tabla XIII. Máximos anuales de las series del nivel del mar del INOCAR y sus respectivos años de ocurrencia (16 valores más altos).

Baltra		Esmeraldas		La Libertad		Puerto Bolívar	
altura (m)	año	altura (m)	año	altura (m)	año	altura (m)	año
2.91	2005	4.12	1983	2.95	1957	3.76	1997
2.82	2006	4.09	1997	2.91	1998	3.75	1992
2.77	1998	4.04	1982	2.88	1997	3.73	1983
2.71	1997	3.91	1981	2.86	1953	3.70	1998
2.67	2007	3.91	2006	2.86	1958	3.63	2002
2.61	1987	3.90	1992	2.82	1983	3.58	2006
2.61	2009	3.85	1986	2.81	1992	3.55	1987
2.59	1975	3.85	1998	2.81	2002	3.54	1993
2.53	1974	3.85	2000	2.79	1966	3.52	1994
2.53	1992	3.84	1996	2.79	1987	3.49	1974
2.52	1993	3.84	2002	2.79	2006	3.49	1979
2.51	1976	3.83	1985	2.78	1979	3.48	2003
2.50	1980	3.83	1994	2.78	1980	3.48	1991
2.50	1981	3.81	2001	2.78	1982	3.48	1989
2.50	1982	3.80	1984	2.77	1976	3.48	1995
2.50	1983	3.79	2003	2.77	1981	3.47	2009

A los datos de máximos anuales se les asignó una probabilidad de ocurrencia, con lo cual se calculó la variable reducida de las series; la información completa contenida en la tabla de Gumbel se encuentra en el Anexo B. Con la información de la tabla de Gumbel se procedió a graficar los máximos anuales vs la variable reducida.

En la Tabla XIII se tiene que los valores más altos observados durante la longitud de registro de cada serie se encuentra entre 2.91 y 4.12 metros. Los primeros tres lugares en la Tabla XIII los ocupan los eventos Niño 82-83 y 97-98; debido a la escasa información con la que cuenta la estación de Baltra los tres primeros lugares los ocupan los eventos Niño de los años 1998, 2005 y 2006.

En las Figuras 29 y 30, se muestra la distribución de Gumbel para los máximos anuales de las 4 estaciones mareográficas. Al observarse que para todas las estaciones, los pares de valores caen sobre una línea recta se tiene la certeza de que la curva de distribución de probabilidad de Gumbel es la más idónea para esta tesis. Una vez que los datos fueron graficados se halló los coeficientes de ajuste para encontrar la ecuación de la recta, a través del método de regresión ortogonal. Ya obtenida la recta de mejor ajuste se calcularon los respectivos intervalos de confianza del 68% y 95%, los mismos que también están representados en las Figuras 29 y 30.

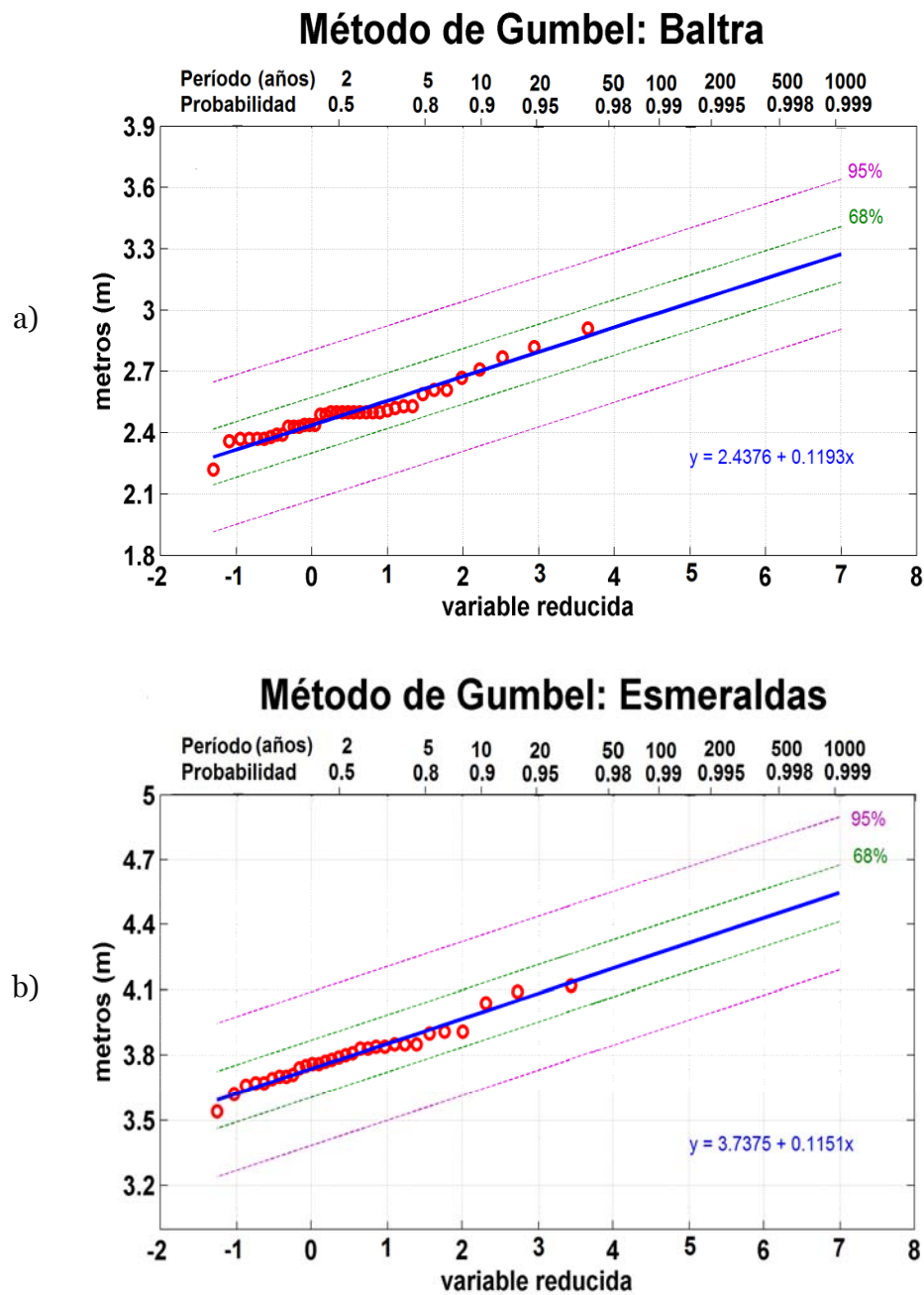


Figura 32. Representación de Gumbel para los máximos anuales de las series del nivel del mar del INOCAR. a) Baltra, b) Esmeraldas.

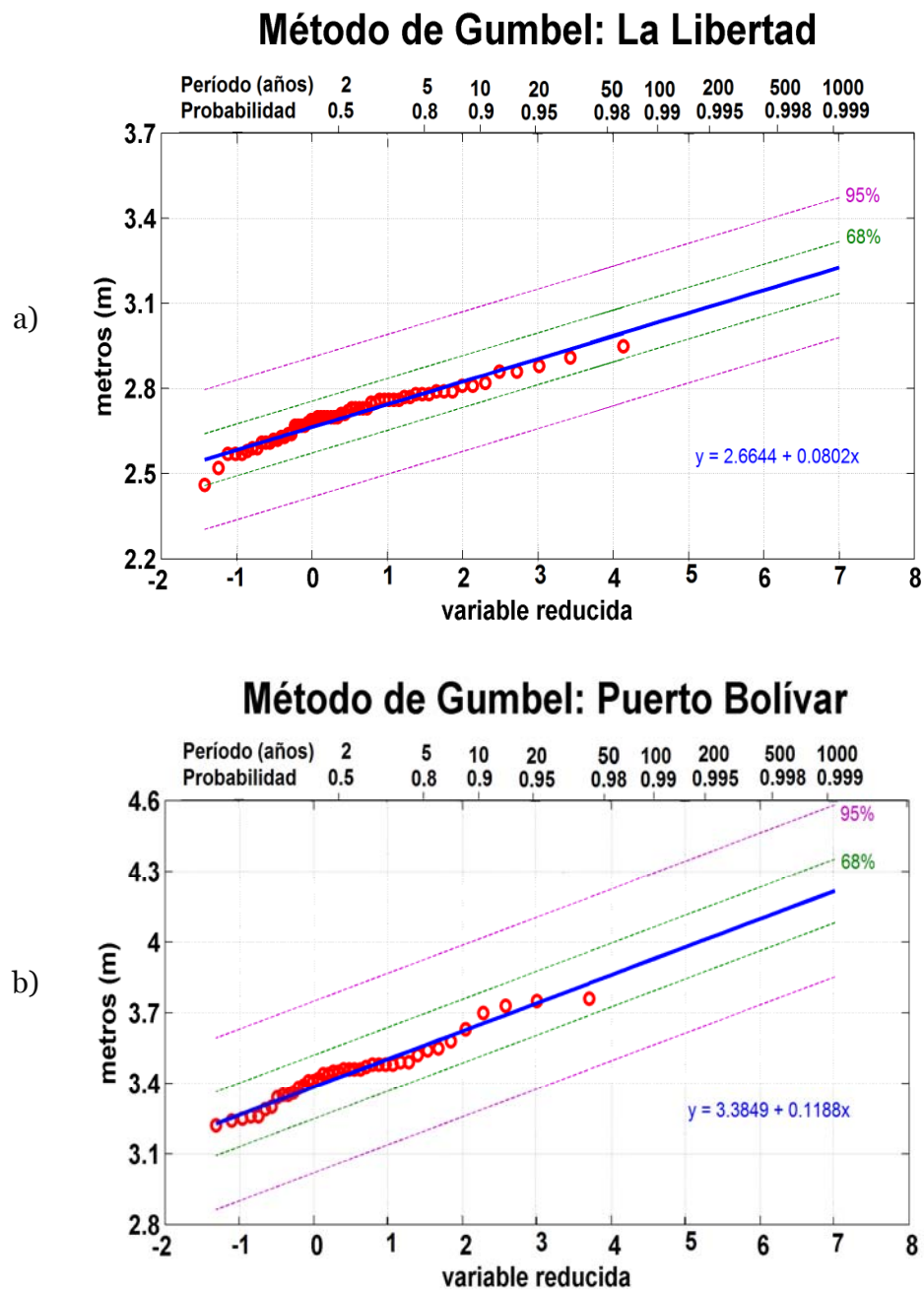


Figura 33. Representación de Gumbel para los máximos anuales de las series del nivel del mar del INOCAR. c) La Libertad, y d) Puerto Bolívar.

Tabla XIV. Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de Baltra. Método de Gumbel.

Parámetros de los datos (n = 38)	
Valor medio	2.5024 m
Desviación Estándar	0.1356 m
Parámetros de la variable reducida (n = 38)	
Valor medio	0.5424
Desviación Estándar	1.1365
Coefficientes de ajuste	
Pendiente de la recta de regresión	0.1193 m
Ordenada al origen	2.4376 m
Extrapolaciones*	
T=10 años	2.90 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.53 – 3,27 m
T=20 años	2.92 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.56 – 3.29 m
T=50 años	2.97 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.61 – 3.34 m
T=100 años	3.02 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.66 – 3.39 m
T=1000 años	3.27 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.90 – 3.63 m
*Los periodos de retorno se cuentan a partir del año 2009	

Tabla XV. Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de Esmeraldas. Método de Gumbel.

Parámetros de los datos (n = 31)	
Valor medio	3.7994 m
Desviación Estándar	0.1285 m
Parámetros de la variable reducida (n = 31)	
Valor medio	0.5371
Desviación Estándar	1.1159
Coefficientes de ajuste	
Pendiente de la recta de regresión	0.1151 m
Ordenada al origen	3.7375 m
Extrapolaciones*	
T=10 años	4.17 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.81 – 4.52 m
T=20 años	4.19 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.84 – 4.54 m
T=50 años	4.24 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.89 – 4.6 m
T=100 años	4.3 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.95 – 4.65 m
T=1000 años	4.54 m
Intervalo de confianza (95 %)	4.18 – 4.89 m
*Los periodos de retorno se cuentan a partir del año 2009	

Tabla XVI. Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de La Libertad. Método de Gumbel.

Parámetros de los datos (n = 62)	
Valor medio	2.7087 m
Desviación Estándar	0.0944 m
Parámetros de la variable reducida (n = 62)	
Valor medio	0.5527
Desviación Estándar	1.1770
Coefficientes de ajuste	
Pendiente de la recta de regresión	0.0802 m
Ordenada al origen	2.6644 m
Extrapolaciones*	
T=10 años	3.01 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.76 – 3.25 m
T=20 años	3.02 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.77 – 3.26 m
T=50 años	3.04 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.8 – 3.29 m
T=100 años	3.07 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.83 – 3.32 m
T=1000 años	3.22 m
Intervalo de confianza (95 %)	2.98 – 3.47 m
*Los periodos de retorno se cuentan a partir del año 2009	

Tabla XVII. Ajustes de los máximos anuales del nivel del mar de la serie de Puerto Bolívar. Método de Gumbel.

Parámetros de los datos (n = 40)	
Valor medio	3.4495 m
Desviación Estándar	0.1356 m
Parámetros de la variable reducida (n = 40)	
Valor medio	0.5436
Desviación Estándar	1.1413
Coefficientes de ajuste	
Pendiente de la recta de regresión	0.1188 m
Ordenada al origen	3.3849 m
Extrapolaciones*	
T=10 años	3.85 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.49 – 4.22 m
T=20 años	3.87 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.51 – 4.24 m
T=50 años	3.92 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.56 – 4.28 m
T=100 años	3.97 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.61 – 4.34 m
T=1000 años	4.21 m
Intervalo de confianza (95 %)	3.84 – 4.57 m
*Los periodos de retorno se cuentan a partir del año 2009	

En las Tablas XIV, XV, XVI Y XVII se muestra un resumen de los parámetros encontrados para cada serie de máximos anuales; cabe recalcar que los periodos de retorno mostrados se cuentan a partir del último año del registro en este caso 2009; en base a esto se observa que las mayores alturas, para diferentes periodos de retorno se esperarían en el sector de Esmeraldas, con alturas entre 4.17 y 4.54 m, seguido del sector de Puerto Bolívar con posibles alturas entre 3.85 y 4.21 m; por último, para las estaciones de Baltra y La Libertad la altura estimada se encuentra entre 2.9 y 3.27 m. Estos valores del nivel del mar corresponden a los periodos de retorno de 10 y 1000 años respectivamente, contados a partir del 2009. Los valores mencionados previamente corresponderían a las alturas del nivel del mar que podrían llegar a registrar los mareógrafos pertenecientes al INOCAR de aquí en 10, 20, 50 o más años.

Capítulo IV

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- a) Las series del nivel del mar con las que cuenta el INOCAR presentan algunas inconsistencias, como datos perdidos, outliers, spikes, los que podrían deberse a variaciones de energía, alterando las mediciones del equipo; así también se presentan puntos de cambio, que han sido considerados no documentados, los mismos que no pueden atribuirse a sucesos naturales. La estación que presenta mayores problemas, y con menor porcentaje de datos válidos (61.6%) es Baltra.

- b) La frecuencia significativa, basada en las anomalías mensuales del NMM, presente tanto en las estaciones costeras como del Océano Pacífico corresponde 0.0625 cpm, con un periodo de 16 meses, lo cual difiere con las frecuencias encontradas en el espectro de promedios diarios donde se presentó una marcada banda de frecuencia entre 0.00146-0.00158 cpd (periodos de 22 y 21 meses respectivamente). Este periodo de 16 meses podría ser atribuido a un ciclo anual, el cual también se identificó en el análisis armónico, siendo la frecuencia correspondiente al ciclo anual solar (SA).

También se evidenció un ciclo semestral (182 días = análisis armónico y 186 días = análisis espectral).

- c) Se encontró también oscilaciones con periodos entre 8 y 10 meses. Para las estaciones de Esmeraldas, Libertad y Puerto Bolívar se encontró también una banda de frecuencias entre 0.011 y 0.013 cpd que corresponden a periodos de 91 y 77.3 días, lo cual podría relacionarse con ondas kelvin de 20 – 90 días [20]; se encontró además una frecuencia de 0.13550 cpd correspondiente a un periodo de 7.4 días que podría estar relacionada con una onda Rossby-gravedad, o también representar una onda kelvin 8-10 días [21].
- d) Las frecuencias de oscilación estarían representadas por al menos 50 componentes armónicos significativos, que son los que conforman la onda de marea (en su mayor parte) en nuestras costas. Los armónicos propios de estas frecuencias que presentan las mayores amplitudes son M₂, S₂, N₂ y K₁; los tres primeros reiteran la predominancia de mareas semidiurnas (periodos de aproximadamente 12 horas) en la costa; principalmente M₂ con amplitudes del orden de 0.7218 y 1.1126 metros. El último armónico hace referencia a la componente Lunisolar declinacional diurna con un periodo de aproximadamente 24 horas.

- e) Del análisis de correlación cruzada, el área que presenta las mayores correlaciones (de hasta 0.5) se localiza entre 10°N y 20°S y desde la costa continental hasta aproximadamente 180°W . Se evidenció que las oscilaciones del Océano Pacífico son las que influyen sobre el nivel del mar en la costa, encontrándose desfases positivos entre 0 y 4 meses para las estaciones de Baltra, Esmeraldas y Libertad, y entre 0 y 10 meses en Puerto Bolívar. También se encontró un desfase negativo, ondas propagándose hacia el Pacífico, de hasta -4 meses para Baltra y Esmeraldas y hasta -8 meses para Libertad.
- f) Del análisis de espectro cruzado, para valores de coherencia mayores a 0.5, se tiene que las oscilaciones del Océano Pacífico lideran sobre el nivel del mar en el Ecuador entre un 40 y 60%; siendo estos porcentajes más significativos para los periodos de 1.5, 2, 5 y 32 meses.
- g) De forma global existe un incremento en el nivel medio del mar; el mayor incremento del NMM se presenta hacia el Pacífico occidental con más de 10 mm por año. Del mapa de tendencias de la zona del Pacífico se observó que los valores de tendencias en los sectores cercanos al continente son similares a los obtenidos de los datos del nivel del mar de las estaciones costeras del INOCAR; así, las

estaciones de Baltra, Esmeraldas y Puerto Bolívar presentan un incremento en el nivel del mar; en tanto que la estación de La Libertad presenta una disminución en el mismo.

- h) Aunque no es tan significativo, los eventos ENOS extremos tienen influencia sobre el nivel del mar, ya sea de forma positiva (aumento) o negativa (descenso). De este modo, las tendencias de las estaciones costeras y el punto de grilla 100°W , que incluyen los eventos Niño 82-83 y 97-98, presentaron un valor ligeramente mayor, sin embargo para los puntos de grilla 140°W y 180°W los valores fueron menores. El nivel del mar en la costa ecuatoriana, entre Dic-1992 y Sep-2008, ha incrementado entre 1.1 y 2.8 cm, a excepción del sector de La Libertad en que se registró un descenso del nivel del mar de 1.2 cm, estos valores no consideran los eventos Niño 82-83 y 97-98.
- i) En base al Índice Niño Oceánico (ONI), se estableció que el nivel del mar tiende a aumentar en los años Niño y descende en los años Niña, presentándose máximas anomalías positivas, promediando los 0.5 m, durante los eventos Niño 82-83 y 97-98, y las más bajas anomalías, del orden de -0.2 m, para algunos eventos Niña como el del 98-99. Esto se evidenció también en el análisis armónico, donde para los años Niño 82-83 y 97-98, la marea residual en

respuesta a estos eventos presentó un incremento. Además en base al ONI y al coeficiente de correlación se encontró que existe una relación inversa entre la PSA y e los eventos ENOS y una relación directa entre la TSA y los mismos eventos. Wang y Fiedler [22] encontraron una relación similar para las anomalías de temperatura y presión superficial del mar.

- j) Los gráficos de dispersión entre los datos de ANMM de las estaciones de INOCAR versus el ONI, muestran que cada evento Niño o Niña se agrupa mostrando una tendencia, la excepción se presentó en Puerto Bolívar, para el evento Niño 97-98.

- k) La estadística de extremos, mediante la función de Gumbel, determinó que las mayores alturas, para diferentes periodos de retorno es esperarían en el sector de Esmeraldas, con alturas entre 4.17 y 4.54 m, seguido del sector de Puerto Bolívar con posibles alturas entre 3.85 y 4.21 m; por último, para las estaciones de Baltra y La Libertad la altura estimada se encuentra entre 2.9 y 3.27 m. Estos valores nivel del mar corresponden a los periodos de retorno de 10 y 1000 años respectivamente.

4.2. Recomendaciones

- a) Se recomienda dar un control de calidad más profundo a los datos de nivel del mar del INOCAR, a fin de contar con una base de datos depurada que permita realizar futuras investigaciones en los diferentes aspectos que involucra la Oceanografía.
- b) Teniendo en cuenta que al realizar el análisis espectral con datos de mensuales (en el presente estudio anomalías del NMM), el efecto de aliasing podría ser la causa de que el espectro muestre una sola frecuencia, cuya gran amplitud puede estar minimizando las demás frecuencias. Para optimizar el análisis espectral en estos casos, se recomienda aplicar a las series de tiempo un filtro pasa alto o pasa bajo según el caso lo amerite, con la finalidad de observar otras frecuencias que sean de importancia para el estudio.
- c) Al encontrarse que la marea residual muestra la existencia de un desfase entre la serie original y la marea predicha, posiblemente debido a factores de variabilidad interna, variación de topografía, variación en la dinámica del estuario (Ej. Puerto Bolívar), etc., se recomienda revisar otras metodologías para la determinación de componentes armónicos como el análisis wavelet. Descripciones más completas de técnicas de análisis, su uso y sus limitaciones se dan en, por ejemplo, Foreman et al. (1995) y Godin (1991). [15].

ANEXOS

ANEXO A Tablas del Análisis Armónico

BALTRA

```
[tidestruc_baltra,pout_baltra]=plot_ttide(Baltral);
  number of standard constituents used: 68
  Points used: 118136 of 159985
  percent of var residual after lsqfit/var original: 4.80 %
  Phases at central time
  Using nonlinear bootstrapped error estimates
  Generating prediction without nodal corrections, SNR is
2.000000
  percent of var residual after synthesis/var original: 4.83
%
```

```
-----
date: 27-Jun-2011
nobs = 159985,  ngood = 118136,  record length (days) =
6666.04
rayleigh criterion = 1.0
Phases at central time
```

x0= 1.19, x trend= 0

var(x)= 0.31278 var(xp)= 0.29775 var(xres)= 0.015098
percent var predicted/var original= 95.2 %

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
*SA	0.0001141	0.0421	0.006	234.90	7.84	47
SSA	0.0002282	0.0047	0.005	304.14	71.59	0.89
MSM	0.0013098	0.0018	0.004	137.64	143.48	0.25
*MM	0.0015122	0.0095	0.005	6.87	32.56	3.3
MSF	0.0028219	0.0025	0.004	182.54	129.83	0.32
*MF	0.0030501	0.0125	0.006	270.21	27.37	4.4
ALP1	0.0343966	0.0005	0.001	287.58	106.67	0.33
*2Q1	0.0357064	0.0014	0.001	119.75	38.84	3
SIG1	0.0359087	0.0006	0.001	12.95	96.11	0.63
*Q1	0.0372185	0.0032	0.001	159.93	17.32	10
RHO1	0.0374209	0.0008	0.001	50.96	68.39	1
*O1	0.0387307	0.0095	0.001	36.37	5.59	1e+002
*TAU1	0.0389588	0.0021	0.001	312.08	26.81	4.9
BET1	0.0400404	0.0005	0.001	163.33	92.99	0.49
*NO1	0.0402686	0.0031	0.001	102.33	19.09	9.6
CHI1	0.0404710	0.0004	0.001	18.86	133.08	0.3
PI1	0.0414385	0.0012	0.001	349.30	46.23	1.5
*P1	0.0415526	0.0260	0.001	166.88	2.30	9.5e+002
*S1	0.0416667	0.0073	0.001	256.68	7.37	77
*K1	0.0417807	0.0783	0.001	111.01	0.71	7.6e+003
PSI1	0.0418948	0.0003	0.001	72.85	170.61	0.15

PHI1	0.0420089	0.0010	0.001	208.92	49.62	1.6
THE1	0.0430905	0.0012	0.001	243.22	46.63	1.8
*J1	0.0432929	0.0071	0.001	147.65	7.35	61
*SO1	0.0446027	0.0022	0.001	350.88	23.49	5.7
*OO1	0.0448308	0.0067	0.001	43.90	7.49	54
UPS1	0.0463430	0.0012	0.001	104.64	45.09	2
OQ2	0.0759749	0.0026	0.004	173.66	100.39	0.37
EPS2	0.0761773	0.0058	0.004	81.89	46.95	1.7
*2N2	0.0774871	0.0192	0.004	223.60	15.95	20
*MU2	0.0776895	0.0263	0.005	114.97	9.52	28
*N2	0.0789992	0.1537	0.005	260.90	1.85	1.1e+003
*NU2	0.0792016	0.0322	0.005	144.10	7.87	35
*GAM2	0.0803090	0.0102	0.005	290.22	25.58	4.3
H1	0.0803973	0.0029	0.004	345.64	98.87	0.47
*M2	0.0805114	0.7218	0.005	297.44	0.40	1.9e+004
H2	0.0806255	0.0063	0.005	133.23	41.68	1.6
*MKS2	0.0807396	0.0072	0.005	118.03	39.03	2.3
LDA2	0.0818212	0.0025	0.004	298.12	101.21	0.35
*L2	0.0820236	0.0158	0.005	148.43	17.28	12
*T2	0.0832193	0.0116	0.005	313.53	24.39	6
*S2	0.0833333	0.1940	0.005	112.02	1.49	1.7e+003
R2	0.0834474	0.0013	0.003	27.14	140.19	0.15
*K2	0.0835615	0.0509	0.005	231.52	5.18	87
MSN2	0.0848455	0.0009	0.003	286.27	223.03	0.07
ETA2	0.0850736	0.0028	0.004	277.86	105.57	0.48
MO3	0.1192421	0.0002	0.000	231.66	118.17	0.27
*M3	0.1207671	0.0016	0.000	83.37	13.37	22
SO3	0.1220640	0.0001	0.000	92.67	163.37	0.22
MK3	0.1222921	0.0002	0.000	160.93	110.72	0.39
*SK3	0.1251141	0.0006	0.000	240.26	37.44	2.1
MN4	0.1595106	0.0003	0.000	40.41	62.75	1.3
*M4	0.1610228	0.0011	0.000	159.03	17.27	11
SN4	0.1623326	0.0003	0.000	215.42	73.33	0.91
*MS4	0.1638447	0.0007	0.000	323.43	25.62	5.1
MK4	0.1640729	0.0001	0.000	19.87	123.97	0.24
*S4	0.1666667	0.0008	0.000	207.20	23.25	4.5
SK4	0.1668948	0.0001	0.000	219.13	131.18	0.32
*2MK5	0.2028035	0.0003	0.000	291.68	38.17	2.5
2SK5	0.2084474	0.0001	0.000	315.68	124.87	0.34
2MN6	0.2400221	0.0003	0.000	92.65	52.29	1.5
*M6	0.2415342	0.0006	0.000	131.08	23.98	5.1
*2MS6	0.2443561	0.0013	0.000	299.60	11.31	40
2MK6	0.2445843	0.0003	0.000	73.05	53.15	1.3
2SM6	0.2471781	0.0002	0.000	133.16	67.03	0.85
MSK6	0.2474062	0.0001	0.000	236.56	99.61	0.48
3MK7	0.2833149	0.0002	0.000	194.21	66.06	1.2
M8	0.3220456	0.0002	0.000	231.83	43.95	1.6

ESMERALDAS

```
[tidestruc_esmer,pout_esmer]=plot_ttide(Esmeraldas1);
  number of standard constituents used: 68
  Points used: 139209 of 159985
  percent of var residual after lsqfit/var original: 4.36 %
  Phases at central time
  Using nonlinear bootstrapped error estimates
  Generating prediction without nodal corrections, SNR is
2.000000
  percent of var residual after synthesis/var original: 4.37
%
```

```
-----
date: 13-Jun-2011
nobs = 159985, ngood = 139209, record length (days) =
6666.04
rayleigh criterion = 1.0
Phases at central time
```

x0= 1.84, x trend= 0

```
var(x)= 0.73846   var(xp)= 0.70613   var(xres)= 0.032276
percent var predicted/var original= 95.6 %
```

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
*SA	0.0001141	0.0149	0.005	33.45	24.05	7.5
*SSA	0.0002282	0.0286	0.006	276.74	12.31	21
MSM	0.0013098	0.0018	0.004	144.93	175.93	0.16
*MM	0.0015122	0.0082	0.006	30.73	48.28	2
MSF	0.0028219	0.0024	0.005	140.37	129.43	0.25
*MF	0.0030501	0.0113	0.006	276.10	32.76	3.6
ALP1	0.0343966	0.0009	0.001	337.79	57.04	1.1
*2Q1	0.0357064	0.0019	0.001	113.08	25.61	5.4
SIG1	0.0359087	0.0005	0.001	33.28	102.16	0.47
*Q1	0.0372185	0.0026	0.001	143.25	20.63	10
RHO1	0.0374209	0.0008	0.001	28.82	62.91	1.1
*O1	0.0387307	0.0215	0.001	53.53	2.38	5.6e+002
*TAU1	0.0389588	0.0022	0.001	328.88	23.59	6.4
BET1	0.0400404	0.0005	0.001	229.15	107.41	0.56
*NO1	0.0402686	0.0042	0.001	120.40	10.75	30
CHI1	0.0404710	0.0005	0.001	42.15	105.20	0.54
*PI1	0.0414385	0.0016	0.001	53.67	32.55	2.4
*P1	0.0415526	0.0325	0.001	181.67	1.59	1.2e+003
*S1	0.0416667	0.0103	0.001	259.03	5.06	1.4e+002
*K1	0.0417807	0.1032	0.001	132.61	0.42	1.3e+004
*PSI1	0.0418948	0.0020	0.001	40.70	24.71	5.4
*PHI1	0.0420089	0.0026	0.001	255.22	19.63	9.2
*THE1	0.0430905	0.0018	0.001	260.30	28.24	3.7
*J1	0.0432929	0.0087	0.001	164.90	6.05	1.4e+002
*SO1	0.0446027	0.0027	0.001	15.25	19.05	10
*OO1	0.0448308	0.0079	0.001	68.96	6.24	90
*UPS1	0.0463430	0.0018	0.001	111.81	32.35	3.9

OQ2	0.0759749	0.0030	0.004	239.76	71.18	0.68
*EPS2	0.0761773	0.0100	0.004	107.38	21.81	7.4
*2N2	0.0774871	0.0305	0.004	248.45	7.11	66
*MU2	0.0776895	0.0379	0.004	141.07	6.21	1e+002
*N2	0.0789992	0.2400	0.004	287.61	1.02	3.9e+003
*NU2	0.0792016	0.0425	0.004	176.97	5.66	1.1e+002
GAM2	0.0803090	0.0038	0.004	340.93	61.72	1.1
*H1	0.0803973	0.0056	0.004	299.57	44.72	2.2
*M2	0.0805114	1.1116	0.004	327.36	0.20	8.6e+004
H2	0.0806255	0.0020	0.003	130.51	107.96	0.37
MKS2	0.0807396	0.0014	0.003	157.94	141.01	0.22
LDA2	0.0818212	0.0041	0.004	305.93	57.42	1.2
*L2	0.0820236	0.0238	0.004	185.68	9.48	34
*T2	0.0832193	0.0207	0.004	349.34	9.50	26
*S2	0.0833333	0.3011	0.004	151.22	0.70	6.1e+003
R2	0.0834474	0.0044	0.004	149.51	52.85	1.3
*K2	0.0835615	0.0772	0.004	274.80	2.75	4.4e+002
MSN2	0.0848455	0.0012	0.003	39.76	138.56	0.22
ETA2	0.0850736	0.0036	0.003	292.96	62.13	1.1
MO3	0.1192421	0.0002	0.000	4.14	126.36	0.34
*M3	0.1207671	0.0029	0.001	110.73	9.68	29
SO3	0.1220640	0.0003	0.000	121.40	94.88	0.4
*MK3	0.1222921	0.0007	0.000	184.78	36.86	2.4
*SK3	0.1251141	0.0037	0.001	75.75	9.44	50
*MN4	0.1595106	0.0015	0.001	241.89	22.56	7.7
*M4	0.1610228	0.0028	0.001	270.73	12.52	23
*SN4	0.1623326	0.0008	0.001	28.96	42.41	2.1
*MS4	0.1638447	0.0015	0.001	57.65	22.09	7.6
*MK4	0.1640729	0.0009	0.001	205.11	43.19	2.4
*S4	0.1666667	0.0013	0.001	313.88	23.77	6.5
*SK4	0.1668948	0.0008	0.000	345.77	39.36	3.2
*2MK5	0.2028035	0.0008	0.000	184.98	21.32	6
2SK5	0.2084474	0.0001	0.000	267.32	162.75	0.2
2MN6	0.2400221	0.0004	0.000	265.16	45.56	1.5
M6	0.2415342	0.0003	0.000	314.58	70.05	0.77
2MS6	0.2443561	0.0004	0.000	314.97	51.12	1.4
2MK6	0.2445843	0.0002	0.000	218.64	98.91	0.4
*2SM6	0.2471781	0.0007	0.000	216.75	28.17	3.4
MSK6	0.2474062	0.0002	0.000	160.09	104.31	0.36
3MK7	0.2833149	0.0000	0.000	95.63	258.26	0.024
M8	0.3220456	0.0000	0.000	6.48	211.71	0.036

LA LIBERTAD

```
[tidestruc_lib,pout_lib]=plot_ttide(Libertad1);
  number of standard constituents used: 68
  Points used: 155068 of 159985
  percent of var residual after lsqfit/var original: 3.34 %
  Phases at central time
  Using nonlinear bootstrapped error estimates
  Generating prediction without nodal corrections, SNR is
2.000000
  percent of var residual after synthesis/var original: 3.34
%
```

```
-----
date: 27-Jun-2011
nobs = 159985, ngood = 155068, record length (days) =
6666.04
rayleigh criterion = 1.0
Phases at central time
```

x0= 1.28, x trend= 0

var(x)= 0.3603 var(xp)= 0.34824 var(xres)= 0.012043
percent var predicted/var original= 96.7 %

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
*SA	0.0001141	0.0179	0.005	228.66	16.66	14
*SSA	0.0002282	0.0212	0.005	260.09	13.54	19
MSM	0.0013098	0.0030	0.004	139.64	94.68	0.45
*MM	0.0015122	0.0077	0.005	33.54	36.31	2.2
MSF	0.0028219	0.0015	0.004	127.74	140.84	0.13
*MF	0.0030501	0.0118	0.005	272.42	26.44	5.6
ALP1	0.0343966	0.0004	0.001	309.86	120.80	0.34
2Q1	0.0357064	0.0009	0.001	114.69	39.86	1.8
SIG1	0.0359087	0.0003	0.001	343.02	140.40	0.24
*Q1	0.0372185	0.0011	0.001	270.18	41.96	2.3
RHO1	0.0374209	0.0006	0.001	200.14	79.39	0.65
*O1	0.0387307	0.0286	0.001	11.39	1.48	1.7e+003
*TAU1	0.0389588	0.0018	0.001	335.19	26.11	6.3
BET1	0.0400404	0.0001	0.000	240.48	196.39	0.056
*NO1	0.0402686	0.0045	0.001	107.01	9.28	32
CHI1	0.0404710	0.0009	0.001	358.70	44.08	1.8
*PI1	0.0414385	0.0013	0.001	22.43	33.90	2.9
*P1	0.0415526	0.0331	0.001	169.43	1.23	1.9e+003
*S1	0.0416667	0.0094	0.001	252.54	4.77	1.7e+002
*K1	0.0417807	0.1118	0.001	120.81	0.37	2.6e+004
PSI1	0.0418948	0.0009	0.001	38.51	44.54	1.6
*PHI1	0.0420089	0.0022	0.001	242.81	20.61	9.2
*THE1	0.0430905	0.0017	0.001	259.77	28.01	5.3
*J1	0.0432929	0.0082	0.001	157.87	4.93	1.1e+002
*SO1	0.0446027	0.0021	0.001	8.42	20.30	9.2
*OO1	0.0448308	0.0075	0.001	67.47	5.77	1.2e+002
*UPS1	0.0463430	0.0013	0.001	106.40	35.67	3.1

OQ2	0.0759749	0.0022	0.002	223.53	47.23	1.6
*EPS2	0.0761773	0.0065	0.002	125.43	18.03	11
*2N2	0.0774871	0.0216	0.002	257.01	5.20	99
*MU2	0.0776895	0.0253	0.002	153.44	4.10	1.7e+002
*N2	0.0789992	0.1688	0.002	294.92	0.61	7.3e+003
*NU2	0.0792016	0.0319	0.002	187.53	3.27	2.4e+002
GAM2	0.0803090	0.0025	0.002	283.66	40.91	1.7
H1	0.0803973	0.0007	0.001	283.65	130.43	0.28
*M2	0.0805114	0.7714	0.002	331.94	0.15	1.4e+005
H2	0.0806255	0.0014	0.002	171.24	83.34	0.63
MKS2	0.0807396	0.0011	0.002	333.98	85.59	0.49
*LDA2	0.0818212	0.0044	0.002	291.93	26.25	5.5
*L2	0.0820236	0.0177	0.002	185.86	6.69	76
*T2	0.0832193	0.0149	0.002	344.48	7.93	52
*S2	0.0833333	0.2260	0.002	148.64	0.50	1.8e+004
R2	0.0834474	0.0015	0.002	65.97	78.97	0.75
*K2	0.0835615	0.0602	0.002	274.62	1.82	1e+003
MSN2	0.0848455	0.0008	0.002	64.33	143.36	0.27
*ETA2	0.0850736	0.0027	0.002	315.47	40.94	2.2
MO3	0.1192421	0.0005	0.000	100.06	47.34	1.8
*M3	0.1207671	0.0021	0.000	65.24	11.04	32
SO3	0.1220640	0.0001	0.000	184.36	147.83	0.24
*MK3	0.1222921	0.0010	0.000	232.14	21.25	5.1
*SK3	0.1251141	0.0012	0.000	3.07	20.78	10
MN4	0.1595106	0.0004	0.000	177.82	44.34	1.5
*M4	0.1610228	0.0008	0.000	249.47	26.99	5.8
SN4	0.1623326	0.0004	0.000	16.42	45.19	1.6
*MS4	0.1638447	0.0011	0.000	3.68	18.01	11
MK4	0.1640729	0.0002	0.000	165.12	90.57	0.46
*S4	0.1666667	0.0006	0.000	227.39	35.52	3.4
*SK4	0.1668948	0.0007	0.000	298.98	29.64	4.7
*2MK5	0.2028035	0.0004	0.000	31.93	42.02	3.5
2SK5	0.2084474	0.0003	0.000	268.60	54.12	1.2
2MN6	0.2400221	0.0003	0.000	209.99	63.12	1
*M6	0.2415342	0.0009	0.000	211.28	18.41	10
*2MS6	0.2443561	0.0010	0.000	58.17	16.28	14
*2MK6	0.2445843	0.0004	0.000	167.46	44.77	2.2
*2SM6	0.2471781	0.0008	0.000	246.84	20.26	7.1
MSK6	0.2474062	0.0003	0.000	26.97	57.50	1.1
*3MK7	0.2833149	0.0006	0.000	29.14	25.19	7.9
*M8	0.3220456	0.0004	0.000	225.14	38.46	2.5

PUERTO BOLÍVAR

```
[tidestruc_pbol,pout_pbol]=plot_ttide(PtoBolivar1);
  number of standard constituents used: 68
  Points used: 142157 of 159985
  percent of var residual after lsqfit/var original: 4.73 %
  Phases at central time
  Using nonlinear bootstrapped error estimates
  Generating prediction without nodal corrections, SNR is
2.000000
  percent of var residual after synthesis/var original: 4.77
%
```

```
-----
date: 27-Jun-2011
nobs = 159985, ngood = 142157, record length (days) =
6666.04
rayleigh criterion = 1.0
Phases at central time
```

x0= 1.73, x trend= 0

var(x)= 0.64452 var(xp)= 0.61378 var(xres)= 0.030726
percent var predicted/var original= 95.2 %

tidal amplitude and phase with 95% CI estimates

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
*SA	0.0001141	0.0505	0.013	266.68	14.98	15
SSA	0.0002282	0.0077	0.012	244.74	88.41	0.43
MSM	0.0013098	0.0059	0.010	165.42	133.32	0.33
MM	0.0015122	0.0052	0.010	1.05	125.17	0.27
MSF	0.0028219	0.0059	0.010	41.14	131.45	0.33
MF	0.0030501	0.0123	0.011	263.40	63.39	1.2
ALP1	0.0343966	0.0008	0.001	5.72	83.18	0.57
2Q1	0.0357064	0.0005	0.001	146.11	132.72	0.32
SIG1	0.0359087	0.0003	0.001	343.56	138.41	0.17
*Q1	0.0372185	0.0023	0.001	299.39	27.98	5
RHO1	0.0374209	0.0008	0.001	250.18	79.69	0.79
*O1	0.0387307	0.0376	0.001	11.11	1.72	1.1e+003
*TAU1	0.0389588	0.0024	0.001	357.80	26.17	5.5
BET1	0.0400404	0.0006	0.001	223.60	104.01	0.37
*NO1	0.0402686	0.0043	0.001	114.62	15.41	17
CHI1	0.0404710	0.0012	0.001	307.67	58.61	1.1
*PI1	0.0414385	0.0021	0.001	10.70	28.96	3.6
*P1	0.0415526	0.0383	0.001	173.44	1.60	1.4e+003
*S1	0.0416667	0.0157	0.001	270.31	3.86	1.5e+002
*K1	0.0417807	0.1307	0.001	125.28	0.51	1.3e+004
PSI1	0.0418948	0.0012	0.001	13.85	51.43	1.5
*PHI1	0.0420089	0.0030	0.001	263.16	19.74	6.9
THE1	0.0430905	0.0011	0.001	234.86	61.88	1.3
*J1	0.0432929	0.0090	0.001	162.95	7.23	65
*SO1	0.0446027	0.0030	0.001	30.26	21.89	7.3
*OO1	0.0448308	0.0087	0.001	79.06	6.17	60
*UPS1	0.0463430	0.0019	0.001	112.80	27.40	2.9

OQ2	0.0759749	0.0035	0.006	256.54	87.83	0.4
EPS2	0.0761773	0.0048	0.005	171.58	72.46	0.83
*2N2	0.0774871	0.0284	0.007	281.21	11.89	18
*MU2	0.0776895	0.0212	0.006	180.98	18.96	11
*N2	0.0789992	0.2180	0.006	319.16	1.51	1.2e+003
*NU2	0.0792016	0.0439	0.007	207.20	8.85	39
GAM2	0.0803090	0.0048	0.006	355.27	77.46	0.63
H1	0.0803973	0.0063	0.006	173.60	63.00	1.1
*M2	0.0805114	1.0237	0.006	356.96	0.38	2.5e+004
H2	0.0806255	0.0031	0.005	96.40	113.46	0.41
MKS2	0.0807396	0.0043	0.006	104.53	87.28	0.52
*LDA2	0.0818212	0.0151	0.007	321.22	25.04	4.8
*L2	0.0820236	0.0307	0.007	213.37	12.59	19
*T2	0.0832193	0.0224	0.006	10.99	18.30	13
*S2	0.0833333	0.3099	0.006	174.40	1.17	2.4e+003
R2	0.0834474	0.0029	0.005	155.14	141.45	0.34
*K2	0.0835615	0.0860	0.006	299.65	4.19	1.8e+002
MSN2	0.0848455	0.0045	0.006	32.49	94.58	0.63
ETA2	0.0850736	0.0033	0.005	344.50	109.16	0.46
*MO3	0.1192421	0.0046	0.001	141.57	6.77	67
*M3	0.1207671	0.0046	0.000	95.35	7.11	83
*SO3	0.1220640	0.0025	0.001	273.51	12.25	20
*MK3	0.1222921	0.0062	0.000	240.82	4.71	1.8e+002
*SK3	0.1251141	0.0045	0.001	28.01	6.49	56
*MN4	0.1595106	0.0146	0.001	79.76	2.70	4.4e+002
*M4	0.1610228	0.0331	0.001	119.68	1.27	2e+003
*SN4	0.1623326	0.0067	0.001	255.20	5.98	73
*MS4	0.1638447	0.0233	0.001	299.98	1.81	8.4e+002
*MK4	0.1640729	0.0063	0.001	60.63	6.81	49
*S4	0.1666667	0.0040	0.001	110.59	10.89	24
*SK4	0.1668948	0.0029	0.001	254.48	13.90	17
*2MK5	0.2028035	0.0011	0.000	236.07	15.14	11
*2SK5	0.2084474	0.0011	0.000	47.68	19.01	9.3
*2MN6	0.2400221	0.0056	0.001	124.74	5.66	87
*M6	0.2415342	0.0081	0.001	163.88	4.30	2e+002
*2MS6	0.2443561	0.0061	0.001	318.53	5.12	1.3e+002
*2MK6	0.2445843	0.0014	0.001	88.65	19.66	7.2
*2SM6	0.2471781	0.0011	0.001	77.43	30.43	4.4
*MSK6	0.2474062	0.0009	0.001	172.75	36.20	2.7
*3MK7	0.2833149	0.0024	0.000	283.60	7.34	77
*M8	0.3220456	0.0035	0.000	184.00	3.38	3e+002

ANEXO B
Tablas de Gumbel

i	Xi (metros)	Estación de Baltra		año	ln Xi
		i/(n+1)	yi		
1	2.91	0.02564103	3.651	2005	1.06815308
2	2.82	0.05128205	2.944	2006	1.03673688
3	2.77	0.07692308	2.525	1998	1.01884732
4	2.71	0.10256410	2.224	1997	0.99694863
5	2.67	0.12820513	1.986	2007	0.98207847
6	2.61	0.15384615	1.789	1987	0.95935022
7	2.61	0.17948718	1.620	2009	0.95935022
8	2.59	0.20512821	1.472	1975	0.95165788
9	2.53	0.23076923	1.338	1974	0.92821930
10	2.53	0.25641026	1.216	1992	0.92821930
11	2.52	0.28205128	1.105	1993	0.92425890
12	2.51	0.30769231	1.000	1976	0.92028275
13	2.50	0.33333333	0.903	1980	0.91629073
14	2.50	0.35897436	0.810	1981	0.91629073
15	2.50	0.38461538	0.723	1982	0.91629073
16	2.50	0.41025641	0.639	1983	0.91629073
17	2.50	0.43589744	0.558	1984	0.91629073
18	2.50	0.46153846	0.480	2000	0.91629073
19	2.50	0.48717949	0.404	2001	0.91629073
20	2.50	0.51282051	0.330	2002	0.91629073
21	2.50	0.53846154	0.257	2003	0.91629073
22	2.49	0.56410256	0.186	1988	0.91228271
23	2.49	0.58974359	0.115	2008	0.91228271
24	2.44	0.61538462	0.046	1990	0.89199804
25	2.44	0.64102564	-0.024	1991	0.89199804
26	2.44	0.66666667	-0.094	1996	0.89199804
27	2.43	0.69230769	-0.164	1972	0.88789126
28	2.43	0.71794872	-0.236	1985	0.88789126
29	2.43	0.74358974	-0.308	1999	0.88789126
30	2.39	0.76923077	-0.383	1994	0.87129337
31	2.39	0.79487179	-0.460	2004	0.87129337
32	2.38	0.82051282	-0.541	1986	0.86710049
33	2.37	0.84615385	-0.627	1973	0.86288996
34	2.37	0.87179487	-0.720	1977	0.86288996
35	2.37	0.89743590	-0.823	1979	0.86288996
36	2.37	0.92307692	-0.942	1989	0.86288996
37	2.36	0.94871795	-1.089	1995	0.85866162
38	2.22	0.97435897	-1.298	1978	0.79750720

Estación de Esmeraldas					
i	Xi (metros)	i/(n+1)	yi	año	ln Xi
1	4.12	0.03125000	3.450	1983	1.41585316
2	4.09	0.06250000	2.740	1997	1.40854497
3	4.04	0.09375000	2.318	1982	1.39624469
4	3.91	0.12500000	2.013	1981	1.36353737
5	3.91	0.15625000	1.773	2006	1.36353737
6	3.90	0.18750000	1.572	1992	1.36097655
7	3.85	0.21875000	1.399	1986	1.34807315
8	3.85	0.25000000	1.246	1998	1.34807315
9	3.85	0.28125000	1.108	2000	1.34807315
10	3.84	0.31250000	0.982	1996	1.34547237
11	3.84	0.34375000	0.865	2002	1.34547237
12	3.83	0.37500000	0.755	1985	1.34286480
13	3.83	0.40625000	0.651	1994	1.34286480
14	3.81	0.43750000	0.553	2001	1.33762919
15	3.80	0.46875000	0.458	1984	1.33500107
16	3.79	0.50000000	0.367	2003	1.33236602
17	3.78	0.53125000	0.277	2008	1.32972401
18	3.77	0.56250000	0.190	2005	1.32707500
19	3.76	0.59375000	0.104	2009	1.32441896
20	3.76	0.62500000	0.019	1999	1.32441896
21	3.75	0.65625000	-0.066	1993	1.32175584
22	3.74	0.68750000	-0.151	1979	1.31908561
23	3.71	0.71875000	-0.238	2007	1.31103188
24	3.70	0.75000000	-0.327	1991	1.30833282
25	3.70	0.78125000	-0.419	1989	1.30833282
26	3.69	0.81250000	-0.515	1980	1.30562646
27	3.67	0.84375000	-0.619	1990	1.30019166
28	3.67	0.87500000	-0.732	1995	1.30019166
29	3.66	0.90625000	-0.862	1987	1.29746315
30	3.62	0.93750000	-1.020	1988	1.28647403
31	3.54	0.96875000	-1.243	2004	1.26412673

Estación de La Libertad

i	Xi (metros)	i/(n+1)	yi	año	ln Xi
1	2.95	0.01587302	4.135	1957	1.08180517
2	2.91	0.03174603	3.434	1998	1.06815308
3	2.88	0.04761905	3.020	1997	1.05779029
4	2.86	0.06349206	2.724	1953	1.05082162
5	2.86	0.07936508	2.493	1958	1.05082162
6	2.82	0.09523810	2.302	1983	1.03673688
7	2.81	0.11111111	2.139	1992	1.03318448
8	2.81	0.12698413	1.997	2002	1.03318448
9	2.79	0.14285714	1.870	1966	1.02604160
10	2.79	0.15873016	1.755	1987	1.02604160
11	2.79	0.17460317	1.651	2006	1.02604160
12	2.78	0.19047619	1.554	1979	1.02245093
13	2.78	0.20634921	1.465	1980	1.02245093
14	2.78	0.22222222	1.381	1982	1.02245093
15	2.77	0.23809524	1.302	1976	1.01884732
16	2.77	0.25396825	1.228	1981	1.01884732
17	2.76	0.26984127	1.157	1954	1.01523068
18	2.76	0.28571429	1.089	1961	1.01523068
19	2.76	0.30158730	1.025	1963	1.01523068
20	2.76	0.31746032	0.963	1967	1.01523068
21	2.76	0.33333333	0.903	2009	1.01523068
22	2.75	0.34920635	0.845	1993	1.01160091
23	2.75	0.36507937	0.789	2005	1.01160091
24	2.73	0.38095238	0.735	1959	1.00430161
25	2.73	0.39682540	0.682	1962	1.00430161
26	2.73	0.41269841	0.631	1970	1.00430161
27	2.73	0.42857143	0.581	1989	1.00430161
28	2.73	0.44444444	0.531	2001	1.00430161
29	2.72	0.46031746	0.483	1972	1.00063188
30	2.71	0.47619048	0.436	1994	0.99694863
31	2.71	0.49206349	0.389	1971	0.99694863
32	2.70	0.50793651	0.344	1949	0.99325177
33	2.70	0.52380952	0.298	1955	0.99325177
34	2.70	0.53968254	0.254	1956	0.99325177
35	2.70	0.55555556	0.210	1965	0.99325177
36	2.70	0.57142857	0.166	1988	0.99325177
37	2.70	0.58730159	0.122	1995	0.99325177
38	2.70	0.60317460	0.079	2008	0.99325177
39	2.69	0.61904762	0.036	1969	0.98954119
40	2.69	0.63492063	-0.008	1975	0.98954119

i	Xi (metros)	Estación de La Libertad			In Xi
		i/(n+1)	yi	año	
41	2.68	0.65079365	-0.051	1974	0.98581679
42	2.67	0.66666667	-0.094	1952	0.98207847
43	2.67	0.68253968	-0.138	1968	0.98207847
44	2.67	0.69841270	-0.181	1978	0.98207847
45	2.67	0.71428571	-0.225	1984	0.98207847
46	2.64	0.73015873	-0.270	1950	0.97077892
47	2.64	0.74603175	-0.315	2007	0.97077892
48	2.63	0.76190476	-0.361	1977	0.96698385
49	2.63	0.77777778	-0.408	2003	0.96698385
50	2.62	0.79365079	-0.456	1991	0.96317432
51	2.62	0.80952381	-0.506	1996	0.96317432
52	2.61	0.82539683	-0.557	1951	0.95935022
53	2.61	0.84126984	-0.610	1960	0.95935022
54	2.61	0.85714286	-0.666	1985	0.95935022
55	2.59	0.87301587	-0.724	1990	0.95165788
56	2.59	0.88888889	-0.787	1999	0.95165788
57	2.58	0.90476190	-0.855	1964	0.94778940
58	2.57	0.92063492	-0.930	1986	0.94390590
59	2.57	0.93650794	-1.014	2000	0.94390590
60	2.57	0.95238095	-1.113	2004	0.94390590
61	2.52	0.96825397	-1.238	1973	0.92425890
62	2.46	0.98412698	-1.421	1948	0.90016135

Estación de Puerto Bolívar

i	Xi (metros)	i/(n+1)	yi	año	ln Xi
1	3.76	0.02439024	3.701	1997	1.32441896
2	3.75	0.04878049	2.996	1992	1.32175584
3	3.73	0.07317073	2.577	1983	1.31640823
4	3.70	0.09756098	2.276	1998	1.30833282
5	3.63	0.12195122	2.040	2002	1.28923265
6	3.58	0.14634146	1.844	2006	1.27536280
7	3.55	0.17073171	1.676	1987	1.26694760
8	3.54	0.19512195	1.528	1993	1.26412673
9	3.52	0.21951220	1.395	1994	1.25846099
10	3.49	0.24390244	1.274	1974	1.24990174
11	3.49	0.26829268	1.164	1979	1.24990174
12	3.48	0.29268293	1.061	2003	1.24703229
13	3.48	0.31707317	0.964	1991	1.24703229
14	3.48	0.34146341	0.873	1989	1.24703229
15	3.48	0.36585366	0.786	1995	1.24703229
16	3.47	0.39024390	0.704	2009	1.24415459
17	3.46	0.41463415	0.625	2005	1.24126859
18	3.46	0.43902439	0.548	2007	1.24126859
19	3.46	0.46341463	0.474	2001	1.24126859
20	3.46	0.48780488	0.402	1981	1.24126859
21	3.45	0.51219512	0.332	1971	1.23837423
22	3.45	0.53658537	0.262	1996	1.23837423
23	3.44	0.56097561	0.195	1976	1.23547147
24	3.44	0.58536585	0.127	1978	1.23547147
25	3.42	0.60975610	0.061	1988	1.22964055
26	3.41	0.63414634	-0.006	1990	1.22671229
27	3.41	0.65853659	-0.072	2008	1.22671229
28	3.39	0.68292683	-0.139	1984	1.22082992
29	3.38	0.70731707	-0.206	1980	1.21787571
30	3.36	0.73170732	-0.274	1977	1.21194097
31	3.35	0.75609756	-0.344	2004	1.20896035
32	3.35	0.78048780	-0.416	1982	1.20896035
33	3.34	0.80487805	-0.491	1970	1.20597081
34	3.30	0.82926829	-0.570	1986	1.19392247
35	3.29	0.85365854	-0.653	1985	1.19088756
36	3.26	0.87804878	-0.744	1973	1.18172720
37	3.26	0.90243902	-0.845	1999	1.18172720
38	3.25	0.92682927	-0.961	1975	1.17865500
39	3.24	0.95121951	-1.105	2000	1.17557333
40	3.22	0.97560976	-1.312	1972	1.16938136

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMERY WILLIAM J. Y THOMSON RICHARD E., Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Second and Revised Edition (2001).
- [2] PONS V., JOSEP M., La medición del nivel del mar: principios y métodos. Universidad Politécnica de Cataluña. (2009).
- [3] JH PRATT, "On the Influence of the Ocean on the Plumb-Line in India," Royal Society Philosophical Transactions, Vol. 149 (1859), pp. 779-96.
- [4] JH PRATT, "On the Constitution of the Solid Crust of the Earth," Royal Society Philosophical Transactions, Vol. 161 (1871), pp. 335-57.
- [5] KENNETH G. MILLER; JAMES D. WRIGHT Y JAMES V. BROWNING. Visions of ice sheets in a greenhouse world. Department of Geological Sciences, Rutgers University, Piscataway, NJ 08854, United States (2005).
- [6] CAZENAVE A., NEREM R. S., Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes. (2004).
- [7] HUNTER JOHN, "Estimating sea-level extremes under conditions of uncertain sea-level rise", © Springer Science+Business Media B.V. 2009.
- [8] DONA PAULA, GOA. "Extreme sea level variability along the coast of India". Volume 1. National Institute of Oceanography, 2004.
- [9] CHAN Y. K. "Statistics of Extreme Sea-levels in Hong Kong". Royal Observatory Hong Kong. Technical Note (Local) No. 35, 1983.
- [10] VAN HUAN PHAM. "Extremum sea level in Vietnam coast". College of Natural Science. Vietnam National University. Hanoi (2003).
- [11] PIEDRA-CUEVA ISMAEL, Gestión en la zona costera de Rocha: Playa la Balconada. IMFIA. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República, 2006.

- [12] PIEDRA CUEVA ISMAEL, “Estudio de la ampliación del Puerto de La Paloma”; IMFIA. Montevideo, Uruguay, 1988,
- [13] PIRAZZOLI PAOLO ANTONIO, TOMASIN ALBERTO, ULLMANN ALBIN, “Extreme sea levels in two northern Mediterranean areas”, Méditerranée N° 108 – 2007.
- [14] GUMBEL E. J., “Méthodes graphiques pour l'analyse des débits de crue”. La Houille Blanche N°5, 1956.
- [15] MAGGIO GUILLERMO E., “Análisis estadístico de valores extremos”, Aplicaciones en hidrología.
- [16] R. PAWLOWICZ, B. BEARDSLEY, AND S. LENTZ, "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE", Computers and Geosciences 28 (2002), 929-937.
- [17] WELCH, P.D. "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms." IEEE Trans. Audio Electroacoust. Vol. AU-15 (June 1967). Pgs.70-73.
- [18] CARDÍN VANESSA, Análisis Espectral de la interacción vientos-ondas en la provincia de Manabí. Tesis de grado, ESPOL (1989).
- [19] NOAA. Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/oni.data>
- [20] LUTHER DOUGLAS SCOTT, Observations of long period waves in the tropical oceans and atmosphere. Tesis de Doctorado, Massachusetts Institute of Technology & Woods Hole Oceanographic Institution 1980.
- [21] BAYOT BONNY, Variabilidad de baja frecuencia de parámetros océano-atmosféricos en Salinas y Galápagos durante el periodo 1985 – 1988. Tesis de grado, ESPOL (1993).

- [22] WANG C., FIEDLER P. "ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review". NOAA Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory. NOAA Southwest Fisheries Science Center. 2006.
- [23] TRENBERTH K., STEPANIAK D. "Indices of El Niño evolution". National Center for Atmospheric Research, 2000.