



# Título de la tesis o trabajo de investigación

**Franklin Farid Ayala Cruz**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil  
Medellín, Colombia  
2020

# **Título de la tesis o trabajo de investigación**

**Franklin Farid Ayala Cruz**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Civil**

Director(a):  
Andrés Fernando Osorio Arias, M.Sc. Ph.D

Línea de Investigación:  
Oceanografía e ingeniería costera  
Grupo de Investigación:  
OCEÁNICOS

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente  
Medellín, Colombia  
2020

Aquí va mi dedicatoria.

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. Metodología</b>	<b>5</b>
2.1. Datos empleados . . . . .	5
2.2. Análisis exploratorio de los datos . . . . .	6
2.2.1. Análisis de la información del mareógrafo . . . . .	6
2.2.2. Análisis de la información de CMEMS . . . . .	7
2.3. Caracterización del nivel del mar durante eventos ENSO . . . . .	8
2.4. Efecto del ENSO en la variabilidad del nivel del mar . . . . .	9
2.5. Predicción del nivel del mar en una zona costera de interés . . . . .	9
<b>3. Resultados</b>	<b>10</b>
3.0.1. Caracterización de los eventos Niño y Niña . . . . .	13
3.0.2. Análisis espectral . . . . .	17
3.0.3. Variabilidad espacial del nivel del mar en el Pacífico Tropical . . . . .	18
3.0.4. Caracterización del nivel del mar durante un Evento Niño y Niña . . . . .	22
3.0.5. Predicción del nivel del mar debido a ENSO en una zona costera . . . . .	24
3.1. Pronóstico del nivel del mar . . . . .	25
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>29</b>
4.1. Conclusiones . . . . .	29
4.2. Recomendaciones . . . . .	30
<b>A. Anexo: Diagramas de Hovmöller</b>	<b>31</b>
<b>B. Anexo: Mapas de correlación de Spearman entre cada variable y el nivel del mar en la zona costera de interés</b>	<b>32</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>33</b>

# Listas de Figuras

<b>2-1.</b> Series de marea total, meteorológica y residual para un mareógrafo en Tuktoyuktuk, Canadá. Tomado de [18] . . . . .	6
<b>3-1.</b> Series de marea y sus componentes para un período de ejemplo. . . . .	11
<b>3-2.</b> Series de sobrelevaciones y descensos máximos diarios del nivel del mar . . . . .	12
<b>3-3.</b> Sobrelevaciones y descensos mensuales del nivel del mar en la bahía de Buenaventura durante diferentes eventos ENSO. Las franjas rojas y azules representan fenómenos Niño y Niña respectivamente. . . . .	13
<b>3-4.</b> Sobrelevaciones del nivel del mar en la bahía de Buenaventura vs índice oceánico del niñ (ONI) . . . . .	14
<b>3-5.</b> Sobrelevaciones del nivel del mar Bajo diferentes duraciones de eventos ENSO . .	14
<b>3-6.</b> Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niño desde 1993 hasta 2015 . . . . .	15
<b>3-7.</b> Descensos del nivel del mar bajo diferentes duraciones de eventos Niña . . . . .	16
<b>3-8.</b> Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niña desde 1993 hasta 2015 . . . . .	17
<b>3-9.</b> El espectro de potencias de Fourier en el lado izquierdo de la figura y la banda espectral de interés en el lado derecho . . . . .	18
<b>3-10.</b> Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años . . . .	19
<b>3-12.</b> Mapa de porcentaje de varianza . . . . .	19
<b>3-11.</b> Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años . . . .	20
<b>3-13.</b> Modo de oscilación espacial asociado a la primer componente principal . . . . .	20
<b>3-14.</b> Comparación de la primer componente principal y el índice ONI . . . . .	21
<b>3-15.</b> Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante el Niño (1997-1998) . . . . .	22
<b>3-16.</b> Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante el Niño (1997-1998) . . . . .	23
<b>3-17.</b> Selección de la zona costera de interés y su serie representativa del nivel del mar .	24
<b>3-18.</b> Filtrado de la serie de nivel del mar entre 2 y 6 años . . . . .	25
<b>3-19.</b> Mapas de correlación de Spearman para todas las variables predictoras . . . .	26
<b>3-20.</b> Estructura de la red neuronal artificial . . . . .	27

**3-21.** Mapas de correlación de Spearman para todas las variables predictoras . . . . . 28

# 1. Introducción

A causa del aumento continuo del nivel del mar, algunas comunidades del Pacífico Colombiano han sufrido la pérdida de los territorios costeros donde están asentados y de los recursos marinos que emplean para su subsistencia [7], debido a esto, es creciente la necesidad de comprender los diferentes factores que pueden ocasionar estos aumentos y su importancia dentro de la variabilidad del nivel del mar, a fin de proveer herramientas que faciliten la toma de decisiones para la gestión del riesgo en la costa.

Aunque la tendencia global del nivel del mar osciló entre los 2-3 mm/año desde el siglo pasado [4], no es un incremento que represente los aumentos súbitos del nivel del mar que pueden ocurrir local o regionalmente en un año, porque su cálculo se basa en proyecciones de fenómenos que ocurren en el largo plazo. Las variaciones locales del nivel del mar, se deben a fenómenos microclimáticos como patrones de viento, condiciones morfológicas específicas, sistemas convectivos, etc. y a fenómenos macroclimáticos como la expansión térmica del océano [13], el derretimiento de masas de hielo, el aporte de aguas contenidas en reservorios terrestres [5] y oscilaciones climáticas como el ENSO, la PDO y la NAO, los cuales han sido estudiados previamente en diferentes investigaciones por sus efectos en el nivel del mar [3].

En el Pacífico Tropical e incluso en el norte del Atlántico, se han reportado estudios del impacto de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) en la variabilidad interanual del nivel del mar [12], debido a que este fenómeno no sólo condiciona las temperaturas superficiales del mar, sino que también, durante sus fases positivas, favorece el transporte de masas de aguas cálidas hacia el este, condicionando los vientos, las corrientes superficiales [11],[8] y por tanto, el nivel del mar en las costas del este del Pacífico [1]. En regiones del Pacífico Colombiano y del este de California, se han presentado aumentos durante fases cálidas del ENSO que han modificado la línea de costa [2], pero aún existe una falta de conocimiento físico de las condiciones necesarias para que se generen dichos aumentos máximos del nivel y de los aportes que genera cada fenómeno a su variabilidad.

Han existido grandes esfuerzos por entender la variabilidad espacio-temporal de nivel del mar y de sus principales forzadores en el Pacífico Tropical [23], incluso, se han determinado las consecuencias que genera la llegada de una fase cálida del ENSO [6]. En la bahía de Buenaventura, se han registrados aumentos súbitos del nivel del mar por el mareógrafo local que han puesto en

alerta las comunidad de la zona, pero de los cuáles se desconocen las causas y las posibilidades de monitorearse y predecirse antes de que arriben a la costa [21]

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es conocer el efecto del ENSO en la variabilidad interanual del nivel del mar en la zona costera de Buenaventura y en el océano Pacífico tropical, caracterizar su comportamiento en eventos Niño y Niña [22] y adicionalmente, identificar regiones y variables en zonas alejadas de la costa que permitan la predicción de los aumentos y descensos que sólo se deben al fenómeno ENSO.

En el capítulo 2 se desarrolla la metodología que se empleará en el estudio de la variabilidad del nivel del mar desde la bahía de Buenaventura hasta el Pacífico Tropical, se describen la fuentes de información empleados en la investigación y su respectivo análisis exploratorio y se presentan métodos de análisis de datos como la descomposición armónica para la determinación de la marea astronómica, el análisis espectral de la serie mensual del nivel del mar para el espectro de potencias y las funciones empíricas ortogonales para la caracterización espacio-temporal del nivel del mar.

El capítulo 3 presenta los resultados después de la aplicación de las técnicas y herramientas propuestas en el capítulo 2, desde la marea residual hasta la implementación de la red neuronal artificial construida para la predicción del nivel del mar debido al ENSO en la zona costera de la bahía de Buenaventura. Se resalta la comparación de las fuentes de información del mareógrafo y la información espacial con el índice ONI, así como las zonas elegidas para la determinación de las series temporales de las variables predictoras del nivel.

En el capítulo 4 se presentan las conclusiones del presente estudio, se resumen y comentan los resultados obtenidos, sus posibles causas y consecuencias y sus limitaciones. Adicionalmente, se presentan las posibilidades y recomendaciones para los trabajos futuros.

## 2. Metodología

### 2.1. Datos empleados

a) Datos de mareógrafo: En la bahía de Buenaventura se han captado registros del nivel del mar mediante un mareógrafo ubicado en 3.8906 °N, -77.0808 °W. Este equipo radar consta de un transmisor que lanza un haz electromagnético hacia la superficie libre con una frecuencia modulada y bajo el efecto doppler, determina la distancia existente entre el transmisor y la superficie libre. Los errores que se pueden obtener bajo este método son debidos a cambios en la temperatura del aire, la interferencia de objetos en el haz e inclusive a la acción de las olas [20]. Este mareógrafo hace parte de la red de estaciones del nivel del mar creada por la comisión oceanográfica intergubernamental de la UNESCO y sus registros del nivel del mar están disponibles desde 1953 hasta 2014, a resolución horaria. Debido a operaciones de mantenimiento y reparación, existen datos faltantes a largo del registro que han generado problemas en el tratamiento de la información explicados posteriormente. La información está disponible en la página web [www.ioc-sealevelmonitoring.org](http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).

b) Datos de reanálisis: Diferentes centros de análisis de información meteorológica y oceánica como el ECFMW y el CMEMS, desarrollan y ejecutan diferentes modelos para describir la evolución espacio-temporal de variables termodinámicas como temperatura, salinidad, concentración de hielo, nivel del mar, etc. CMEMS usó el modelo de circulación global oceánica NEMO en conjunto con técnicas de reanálisis para generar un producto llamado GLORYS12V1, allí se puede obtener información del nivel del mar a partir de datos altimétricos desde 1993 hasta 2018 [10]. La resolución espacial es de 1/12°x 1/12°y la resolución temporal es mensual. La región de descarga está comprendida entre -10°N y 10°N y entre 130°E y -74°W y se eligió así para evitar problemas de borde cuando se construyan las funciones empíricas ortogonales. La información está disponible en la página web [marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu).

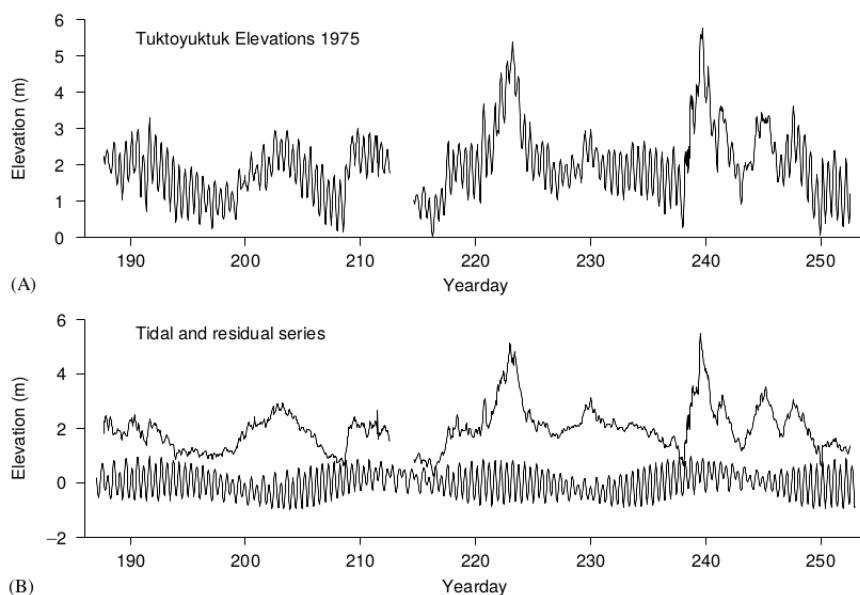
## 2.2. Análisis exploratorio de los datos

### 2.2.1. Análisis de la información del mareógrafo

Los registros del mareógrafo de Buenaventura se utilizan para conocer la evolución temporal del nivel del mar en la costa, y en este caso, sus aumentos/descensos durante las fases cálidas/frías del ENSO. Por lo tanto, se debe iniciar por identificar qué componente de la marea es útil en este estudio.

La marea puede dividirse en dos componentes: marea astronómica y marea meteorológica (Fig.). La marea astronómica se deriva de la atracción gravitatoria en el sistema Tierra-Sol-Luna y por lo tanto, es fácil precisar su aporte en cualquier región del mundo. Por otro lado, la marea meteorológica o residual se debe tanto a fenómenos microclimáticos como macroclimáticos, que a su vez ocurren en escalas temporales diferentes, dificultando su predicción

La marea astronómica de una serie se obtiene con una técnica llamada descomposición armónica [9], esta técnica descompone la señal de marea en diferentes señales (componentes armónicas) que tienen amplitud, período y fase asociados. Estas componentes armónicas en conjunto, explican la marea astronómica total, la cuál se debe a la acción de la fuerza generadora de marea, originada por el desbalance entre la fuerza de atracción gravitacional entre la tierra y otros cuerpos celestes y la fuerza centrífuga.



**Figura 2-1.:** Series de marea total, meteorológica y residual para un mareógrafo en Tuktoyuktuk, Canadá. Tomado de [18]

Existen herramientas computacionales que realizan la descomposición armónica de la marea, algunas de estas están estructuradas en MATLAB o Python [18] y para su implementación correcta no pueden existir muchos datos faltantes, debido a que la identificación de la fase y amplitud de los armónicos se vuelve imprecisa.

Inicialmente, se desiste de usar todo el registro del mareógrafo por tener años con hasta 80 % de datos faltantes que no permiten que la herramienta T-TIDE estime bien la amplitud de los armónicos más importantes (ej: el armónico  $M_2$  debería tener una amplitud de 150 cm, pero sólo reconoce 105 cm); como alternativa, se usan los 18.6 años más completos dentro de la serie, debido a que cada período de estos, la declinación lunar cumple un ciclo llamado ciclo nodal lunar y las fuerzas generadoras de marea pasan por una fase completa, aun con esta acotación de la serie la descomposición armónica siguió siendo imprecisa. Mientras se decidía usar los 6 años de registro continuo con los que se cuenta y obtener el comportamiento de los armónicos para luego extrapolarlos para todo el registro (asumiendo la pérdida de información de las componentes que sólo ocurren en el largo plazo) se conoció una herramienta más precisa y y más reciente para realizar la descomposición armónica, PyTides [19].

Con la marea astronómica se obtiene la serie de marea residual, restándola de la serie medida por el mareógrafo. Después se centra en su valor medio para posteriormente, hacer referencia a los ascensos como **sobrelevaciones del nivel medio del mar**. A partir de esta serie se determinan las series de sobrelevaciones y descensos tanto diarios como mensuales, así como la serie mensual de nivel del mar comparada posteriormente con la información espacial y empleada en otros usos.

### 2.2.2. Análisis de la información de CMEMS

Los registros de nivel del mar en cada píxel se centran en su media, al igual que se hizo con la marea residual, con el objetivo de comparar las magnitudes de las sobrelevaciones con las registradas por el mareógrafo.

Posteriormente, se determina una región costera frente a la bahía de Buenaventura y por ende, de la isla Punta Soldado, en este caso el criterio para elegir su ancho longitudinal es marcado por la isobara de 200 m [17]. Su ubicación está entre -3.65°N y 3.85°N y entre -77.6°W y -77.2°W, después se promedia espacialmente el nivel medio del mar para obtener una serie representativa, usada posteriormente en correlaciones con otras regiones del océano. Esta serie también se compara con la serie mensual de los datos medidos por el mareógrafo para validar su comportamiento.

## 2.3. Caracterización del nivel del mar durante eventos ENSO

Al haber especial interés en los valores máximos por la amenaza que representan en la costa y por ser tan alta la resolución de la serie residual o meteorológica del mareógrafo para el análisis del comportamiento del nivel durante los eventos ENSO, se decide calcular su envolvente diaria, es decir, las **sobrelevaciones máximas diarias**. La serie de sobrelevaciones y descensos mensuales a partir de esta envolvente, se grafica en conjunto con los períodos de tiempo donde se presentaron fases cálidas y frías del ENSO según el índice ONI, con el objetivo de conocer su comportamiento durante esos meses. Se suavizó la serie de sobrelevaciones en ventanas de 3 meses para captar mejor las variaciones del nivel del mar (similar a las medias trimestrales del ONI); la serie mensual también se compara con el índice ONI.

Con el fin de obtener los períodos donde hay fenómenos que aportan más a la variabilidad del nivel del mar, se determina el espectro de potencias de Fourier de la serie mensual de nivel del mar a través de la transformada de Fourier [14] definida en la ecuación 2-1.

$$\mathcal{F}\{s\}(\omega) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} s_j e^{-i2\pi\omega j} \quad (2-1)$$

Dónde  $s_j$  representa la componente  $j$ -ésima que tiene una frecuencia ( $\omega$ ) asociada dentro del espectro.

Seguidamente se emplea la transformada de Fourier inversa para determinar la serie de nivel del mar que representa la variabilidad en una bandapectral de interés que se seleccione, como se representa en la ecuación 2-2

$$s_j = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \mathcal{F}\{s\}(\omega) e^{i2\pi\omega j} d\omega \quad (2-2)$$

En este caso cada componente  $j$ -ésima de la serie mensual de nivel del mar se obtiene integrando el espectro de potencias de Fourier en su respectiva frecuencia ( $\omega$ )

Con la información del CMEMS, se grafica un diagrama de Hovmöller para conocer la evolución temporal de las sobrelevaciones del nivel del mar durante las fases cálidas y frías del ENSO y compararla con la información mensual del mareógrafo. Finalmente, con la relación de la información espacial y temporal, se determina la duración y frecuencia de los eventos ENSO registrados, las épocas del año en las que se presentaron y las sobrelevaciones que ocurrieron.

## 2.4. Efecto del ENSO en la variabilidad del nivel del mar

Para estudiar el aporte del ENSO en la variabilidad del nivel del mar, se analiza la escala interanual a través de dos procedimientos diferentes. Por un lado, para cada píxel, se filtra la serie de nivel medio del mar en la banda de interés del espectro de potencias de Fourier, definida entre 2 años y 6 años, con el objetivo de obtener sólo la variabilidad en la escala temporal donde el ENSO ocurre. Posteriormente se determinan los patrones espacio-temporales más dominantes a través de una función ortogonal empírica (EOF por sus siglas en inglés) [14] y se seleccionan la componente principal que más aporta a la varianza junto con su modo de oscilación temporal. Finalmente, se compara esa componente principal con un índice macroclimático del ENSO, en este caso, el índice oceánico del niño (ONI por sus siglas en inglés).

Por otro lado, se calcula para cada píxel, la varianza total y la varianza asociada a la banda de interés especificada anteriormente y con ello, se determinan los mapas de varianza, varianza en la banda y porcentaje de varianza. Estos mapas permiten identificar las regiones donde la varianza en la escala interanual aporta más o menos a la varianza total.

## 2.5. Predicción del nivel del mar en una zona costera de interés

A fin de encontrar una región que permita pronosticar el comportamiento del nivel del mar en la zona costera elegida en el literal 2.2.2, se realizan mapas para toda la región donde en cada píxel se calcula la correlación de Spearman entre la serie representativa de la zona costera rezagada 1, 2 y 3 meses y las series de nivel del mar, temperatura, velocidad de las corrientes en la longitud y velocidad de las corrientes en la latitud. Para cada variable, se obtuvo diferentes zonas donde se presentaron las mayores correlaciones y en ellas se realizó un promedio espacial para obtener las series que funcionen como predictoras del nivel del mar en la zona costera.

Finalmente, se construyó y entrenó una red neuronal artificial con la función tangente hiperbólica como función de activación y con **corrección del sesgo**, se filtraron las series de todas las variables en la banda de espectral de 2 a 6 años y adicionalmente, para optimizar las predicciones en la zona costera a partir de las series de las variables predictoras en las regiones mar afuera respectivas, se escalaron las series entre -1 y 1 y se evaluaron las redes más óptimas, así como los pesos que asignaban a las diferentes conexiones entre los nodos de cada capa, se eligió una configuración específica que presentó la mayor correlación con los datos de validación.

### 3. Resultados

La descomposición armónica bajo el uso de la herramienta PyTides, determinó los armónicos que más aportan a la componente astronómica de la marea en Buenaventura, reconociendo su importancia en función su amplitud. A continuación, se presentan las siete componentes más importantes y sus respectivas amplitudes

Componente	Amplitud [m]
M2	1.496
S2	0.421
N2	0.314
K1	0.115
K2	0.104
Sa	0.074
M4	0.065

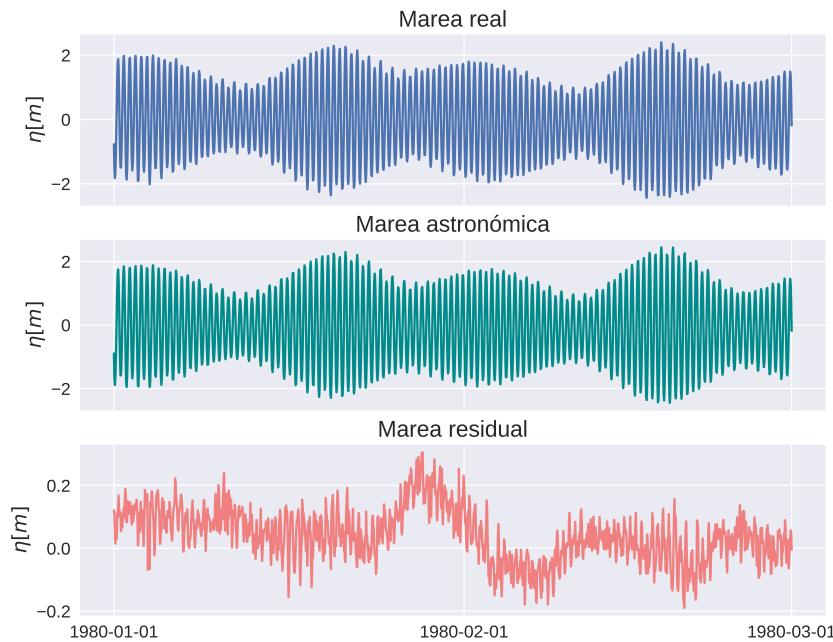
**Tabla 3-1.**: Principales 7 componentes de la marea astronómica

Según la tabla 3-1, las principales componentes son: principal lunar ( $M_2$ ), principal solar ( $S_2$ ), principal elíptica ( $N_2$ ), principal menor ( $K_2$ ) y principal medio-mayor ( $K_1$ ); estas componentes y sus respectivos valores de amplitud son congruentes con los reportados en estudios anteriores [15]. Para clasificar el tipo de marea se calcula el coeficiente de Coutier (F) definido como:

$$F = \frac{K_1 - O_1}{M_2 - S_2} \quad (3-1)$$

Dónde los símbolos de cada componente representan su respectiva amplitud

El coeficiente de Coutier, F, tiene un valor de 0.081, lo cual clasifica la marea como tipo **semidiurna**[16]. Después de obtener los armónicos y por tanto, la marea astronómica; se determinó la marea residual o meterológica. Se eligió un período de dos meses la graficación de las series de marea con el fin de percibir las variaciones que ocurren con las fases lunares (Fig 3-1).

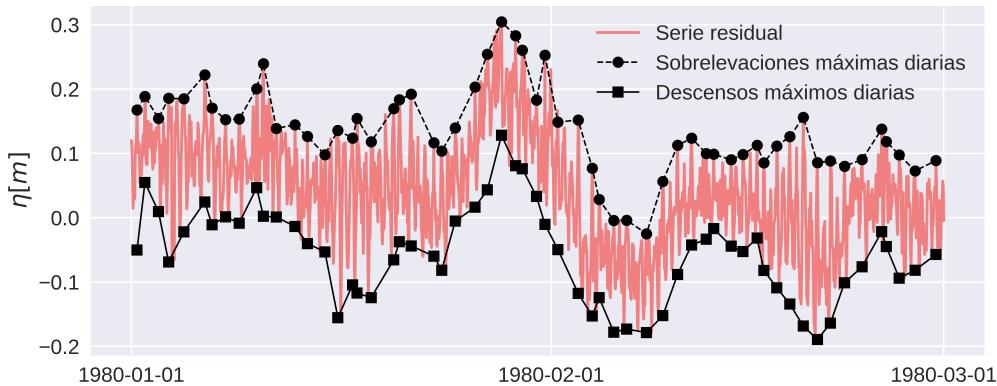


**Figura 3-1.:** Series de marea y sus componentes para un período de ejemplo.

En la figura 3-1, pueden notarse una diferencia de nivel entre la pleamar y la bajamar (carrea de marea), cercana a los 4 metros y común en esta zona del Pacífico Colombiano. Además, se notan los períodos de marea viva o de sicigia, dónde la alineación del sol, la tierra y la luna genera la mayor fuerza de atracción y por ende, hay pleamares mayores al promedio y bajamares menores al promedio, de igual forma se perciben los períodos de marea muerta o de cuadratura dónde sucede lo contrario. La serie residual de la marea (serie roja clara) es la serie de interés en este estudio, puesto que es la componente que está condicionada por fenómenos meteorológicos. Para fines prácticos, se llamará de aquí en adelante **serie de nivel del mar** y dado que su resolución es horaria, se determinaron 3 series a partir de ella con una resolución menor que permitan entender análisis posteriores.

1. Serie mensual de nivel del mar: Obtenida a partir del promedio mes a mes de la serie de nivel del mar en resolución horaria.
2. Series de sobrelevaciones y descensos diarios de nivel del mar: Obtenidas a partir de los máximas sobrelevaciones y descensos del nivel que ocurren en un día (Fig 3-2)
3. Series de sobrelevaciones y descensos mensuales del nivel del mar: Obtenidas a partir de la media mensual de las series de sobrelevaciones y descensos diarios.

La última serie se calcula porque debe distinguirse que un valor medio mensual del nivel desde el registro horario será menor a un valor medio mensual desde el registro de máximos diarios. Estos últimos series brindan información más fidedigna que lo que registró el mareografo.



**Figura 3-2.: Series de sobrelevaciones y descensos máximos diarios del nivel del mar**

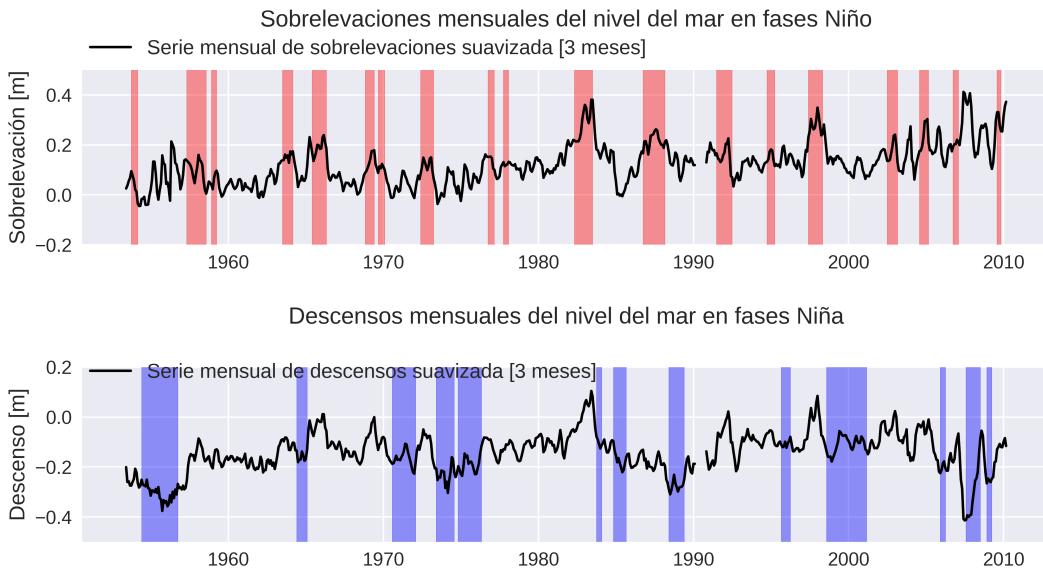
A fin de conocer el comportamiento del nivel del mar en la bahía durante las fases cálidas y frías del ENSO, se grafican las sobrelevaciones mensuales junto a las franjas rojas que marcan la ocurrencia de un evento Niño y los descensos mensuales junto a las franjas azules que delimitan los meses dónde hubo evento Niña.

En la parte superior de la figura 3-2 puede notarse que las sobrelevaciones mensuales tienen valores máximos que coinciden, en su mayoría, con los meses dónde ocurrió un fenómeno Niño (mes Niño). Se resaltan las sobrelevaciones de hasta 35 cm durante El Niño de 1982-1983 y las sobrelevaciones de 30 cm durante el Niño 1997-1998. Ambos eventos fueron clasificados bajo el criterio del índice ONI en la categoría *muy fuerte CITAR*. De forma análoga a las sobrelevaciones, los descensos mensuales más acentuados se vieron en los meses Niña, resaltando los que se presentaron en 1955-1956 durante un evento Niña de categoría *moderada* y en 2007-2008 durante un evento de categoría *fuerte*, fueron de -35 cm y -40 cm respectivamente.

No en todos los meses Niño o Niña se presentaron sobrelevaciones o descensos mensuales máximos, dado que es posible que la intensidad de un evento varíe según el estado del océano previo a su inicio **CITAR**

Adicionalmente, en la figura 3-4 se observa que diferentes aumentos en la serie mensual del nivel mar coinciden temporalmente con aumentos persistentes del índice ONI, es decir, coinciden con la ocurrencia de eventos Niño. De forma paralela, diferentes descensos en la serie mensual coinciden con la ocurrencia de eventos Niña, aunque en menor medida con respecto a los aumentos. Es importante recordar que para que se determine un evento Niño/Niña deben existir valores del índice ONI de +0.5/-0.5 durante tres meses consecutivos **CITAR**

A partir de las figuras 3-3 y 3-4, se concluye que, en gran medida, existe una relación directa del ENSO con el nivel del mar en la bahía de Buenaventura, aunque sigue siendo necesario caracterizar los eventos Niño y Niña en términos de su duración, sobrelevaciones y descensos máximos así como su comportamiento desde la variable de nivel del mar.



**Figura 3-3.:** Sobrelevaciones y descensos mensuales del nivel del mar en la bahía de Buenaventura durante diferentes eventos ENSO. Las franjas rojas y azules representan fenómenos Niño y Niña respectivamente.

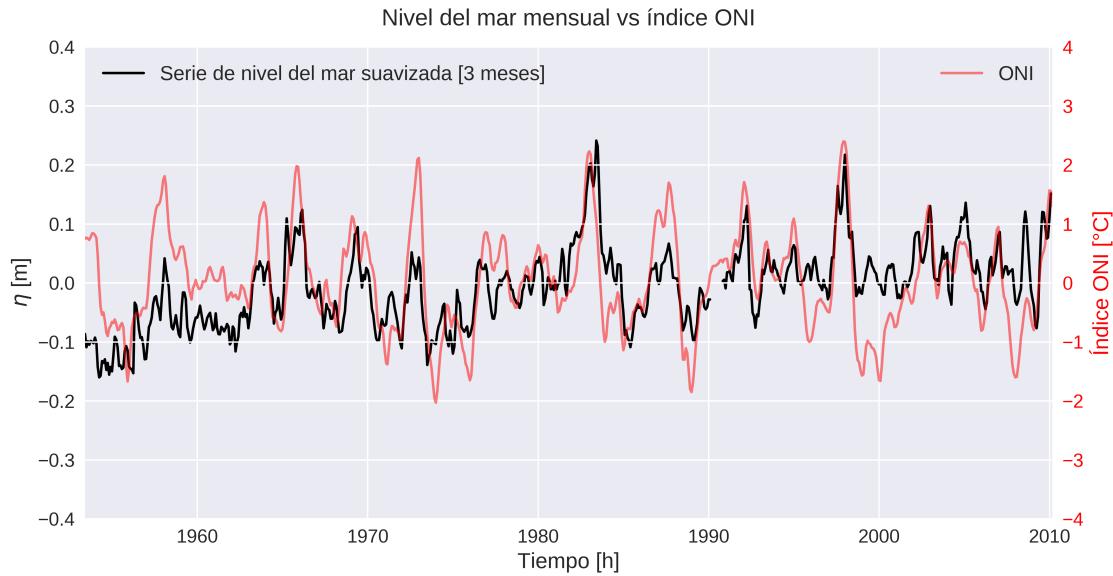
### 3.0.1. Caracterización de los eventos Niño y Niña

Desde 1953 hasta 2010 ocurrieron 32 fases cálidas y frías del ENSO, distribuïdas en 19 eventos Niño y 13 eventos Niña. De acuerdo a su duración, se clasifican en la siguiente tabla:

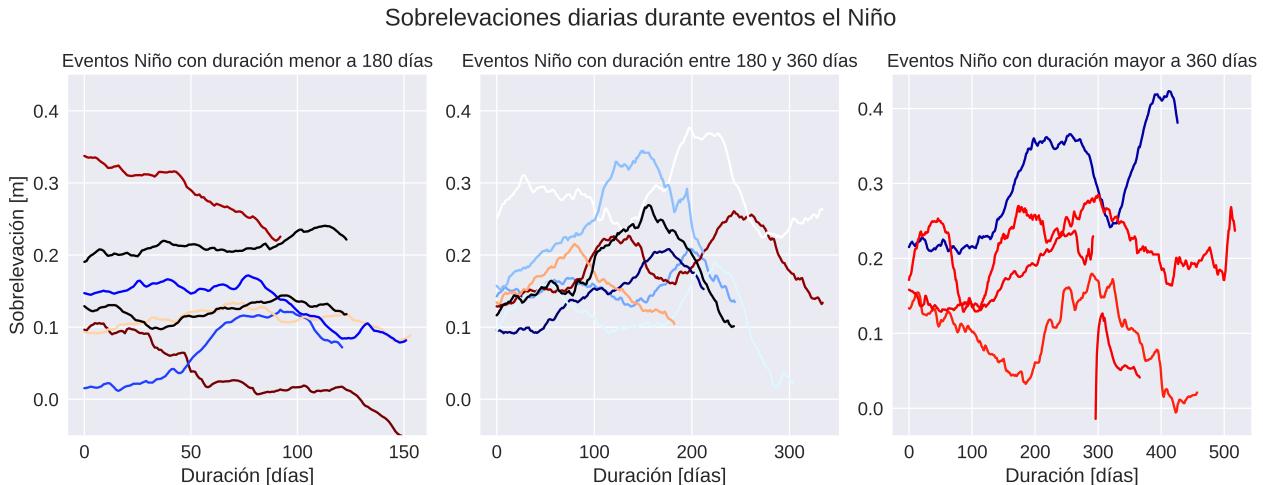
Duración	Cantidad de Eventos Niño	Eventos Niña
90 días - 180 días	7	3
180 días - 360 días	8	4
> 360 días	4	6

**Tabla 3-2.:** Cantidad de eventos Niño y Niña para cada rango de duración

El comportamiento del nivel del mar se ve influenciado durante cada uno de las fases positivas o negativas del ENSO. En la siguiente figura, se presenta cada una de las series de sobrelevación diaria del nivel asociada a cada una de las fases cálidas del ENSO desde 1953 hasta 2010, también se clasifican según su duración, con la finalidad de captar mejor sus variaciones temporales. La serie de sobrelevaciones diarias se promedia en ventanas móviles de 2 meses con el fin de obtener sólo variaciones temporales desde la escala trimestral.



**Figura 3-4.:** Sobrelevaciones del nivel del mar en la bahía de Buenaventura vs índice oceánico del niñ (ONI)



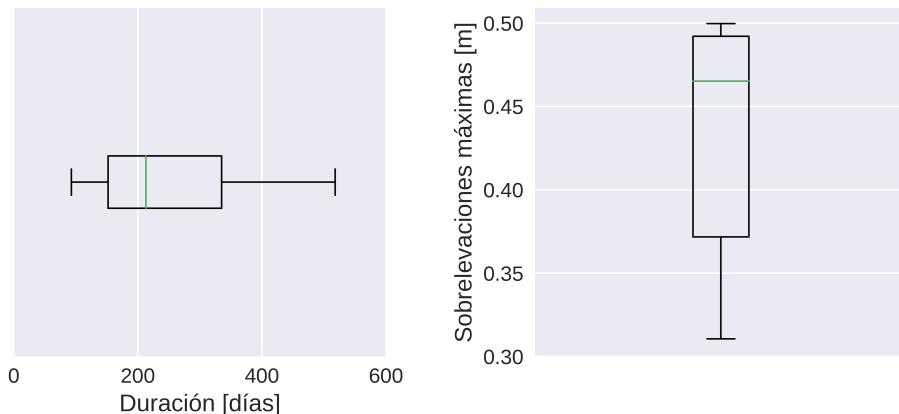
**Figura 3-5.:** Sobrelevaciones del nivel del mar Bajo diferentes duraciones de eventos ENSO

- Eventos con duración entre 90 días-180 días: En este rango de duración es el único dónde el nivel del mar se mantuvo constante para algunos eventos Niño, esto puede asociarse a que estos eventos fueron menos intensos y menos estables que otros de mayor duración. Además, tendencias negativas durante ciertas fases cálidas sugieren la coexistencia de otros fenómenos que no favorecen el descenso del nivel.
- Eventos con duración entre 180 días-360 días: Durante estos eventos, el comportamiento de nivel del mar se parece más al esperado, puesto mientras se desarrolla el evento se

presentan momentos de crecimiento y decrecimiento del nivel, inclusive empiezan a aparecer ciertos períodos de 3 meses, que podrían asociarse con las ondas Kelvin que traviesan el pacífico ecuatorial desde oeste a este y logran arribar a las costas suramericanas debido al debilitamiento de los vientos alisios del este (**CITAR**). La mayoría de los eventos Niño se concentraron entre estas duraciones.

- Eventos con duración mayor a 360 días: El nivel del mar durante los eventos que duraron más de un año tiene características similares a los anteriores, con períodos de 3 meses marcados y con períodos más largos cercanos a los 6 meses.

Un resumen general tanto de la duración como de las sobrelevaciones máximas que generaron estos eventos se observa a continuación:

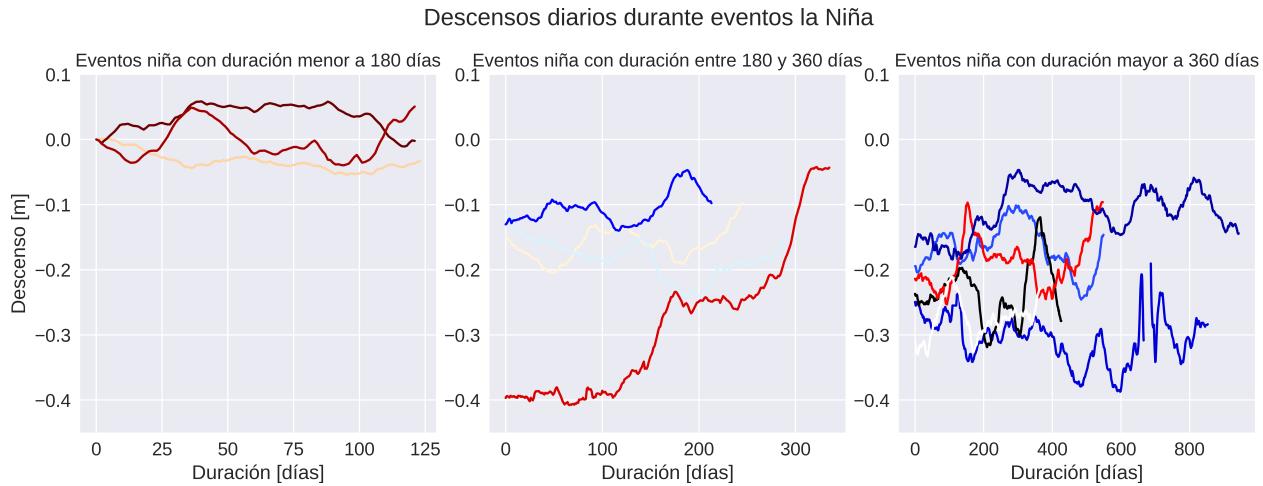


**Figura 3-6.: Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niño desde 1993 hasta 2015**

La duración promedio de los eventos Niño que ocurrieron entre 1953 y 2010 fue de 260 días, aunque se resalta que el 75 % de estos eventos duraron menos de 335 días. El evento que más duró fue el Niño 1986-1987 (518 días). La menor sobrelevación que se generó durante estos eventos fue de 31.0 cm, y se generaron sobrelevaciones promedio de 43.3 cm y la mayor se originó mientras transcurría el evento Niño 1982-1983, se recuerda especialmente la sobrelevación durante 1997-1998, justo en el período donde una comunidad costera de la bahía de Buenaventura llamada Punta Soldado se vio obligada a reubicarse por el aumento súbito del nivel del mar. **CITAR**

Para el estudio de los eventos Niña también se grafican las series de descensos diarios promediadas en ventanas móviles de 2 meses y se clasifican según su duración (Fig. 3-7).

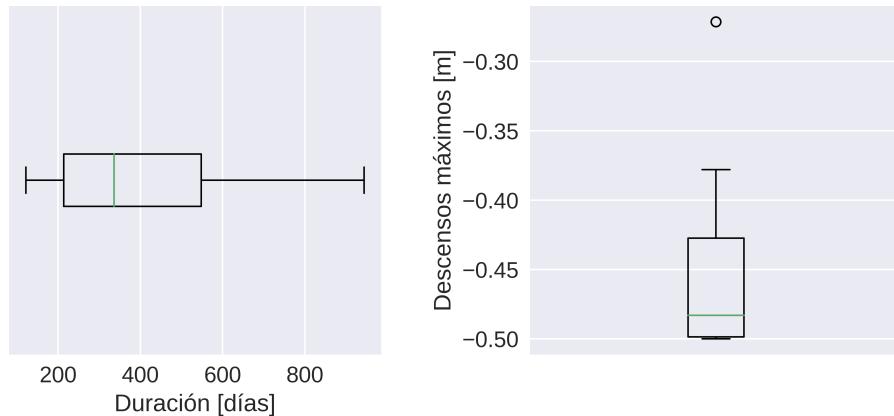
- Eventos con duración entre 90 días-180 días: Sólo 3 eventos Niña están enmarcados entre estas duraciones, e incluso durante algunos se presentaron sobrelevaciones del nivel. Esto parece indicar que deben existir ciertas condiciones adicionales para que se genere un descenso del nivel del mar mientras ocurre un evento Niña.



**Figura 3-7.:** Descensos del nivel del mar bajo diferentes duraciones de eventos Niña

- Eventos con duración entre 180 días-360 días: El comportamiento del nivel durante estos eventos es más similar entre sí, con descensos más pronunciados (-5 cm a -20 cm) y con variaciones periódicas cercanas a los 3 meses y que podrían deberse a las respuestas oceánicas de las ondas Kelvin, llamadas ondas Rossby. Se resalta un evento durante el cuál, el nivel descendió hasta -40 cm al inicio y empezó a aumentar hasta llegar al nivel medio aproximadamente, es decir, no tuvo variaciones periódicas.
- Eventos con duración mayor a 360 días: La mayoría de los eventos se concentran en estas duraciones (6 de los 13 ocurridos). Durante ciertos fenómenos de mayor duración, el nivel del mar, aunque desciende, se mantiene dentro de ciertos valores; para otros fenómenos el nivel del mar desciende periódicamente. Los eventos Niña más largos en esta categoría superan en duración a los eventos Niño más largos presentados desde 1953 a 2010.

Los siguientes diagramas explican la distribución de las duraciones y de los descensos máximos ocurridos durante eventos Niña:



**Figura 3-8.: Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niña desde 1993 hasta 2015**

La duración promedio de los eventos Niña que ocurrieron entre 1953 y 2010 fue de 397 días, aunque se resalta que el 75 % de estos eventos duraron menos de 335 días. El evento que más duro fue la Niña 1998-2001 (944 días). El mayor descenso que se generó durante estos eventos fue de 49.9 m, y el descenso promedio es cercano a los 45.2 m.

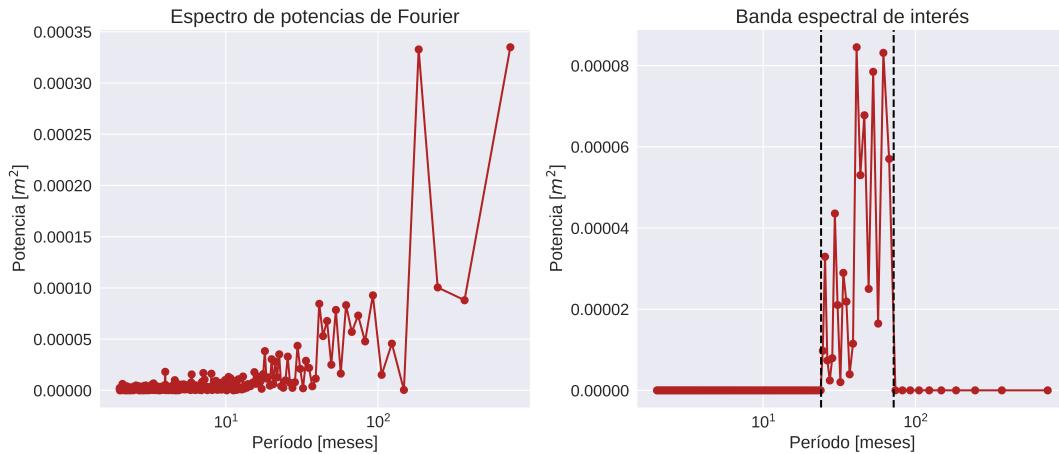
Se resalta que las máximas sobrelevaciones o descensos del nivel del mar no siempre se generaron en la mitad de la duración de cada evento, inclusive en algunos eventos no se generaron sino hasta el final. Esto genera una pregunta acerca de cómo otras condiciones locales presentes, tales como los vientos, el efecto de la bahía, la época del año, entre otros, pueden modular el nivel del mar durante estos eventos Niño o Niña

De las figuras 3-5 y 3-5 se puede notar que durante muchos de los fenómenos del Niño y de la Niña, el nivel del mar alcanza aumentos y descensos máximos prolongados que amenazan las condiciones en las comunidades costeras. Ahora bien, es importante resaltar que el hecho de que haya sobrelevaciones máximas y descensos máximos durante eventos Niño y Niña, no implica que toda la amplitud de la sobrelevación o descenso se deba al ENSO. Surge entonces la necesidad de caracterizar los aportes al nivel del mar por parte de este fenómeno y para ello debe realizarse un análisis espectral.

### 3.0.2. Análisis espectral

El nivel del mar varía en diferentes escalas temporales y por lo tanto, tiene diversas componentes en el dominio frecuencial, se empleó una de las herramientas más empleadas para el análisis espectral, la transformada rápida de Fourier

En el lado izquierdo de la figura 3-9 se muestra el espectro de potencias de Fourier, en el se puede



**Figura 3-9.:** El espectro de potencias de Fourier en el lado izquierdo de la figura y la banda espectral de interés en el lado derecho

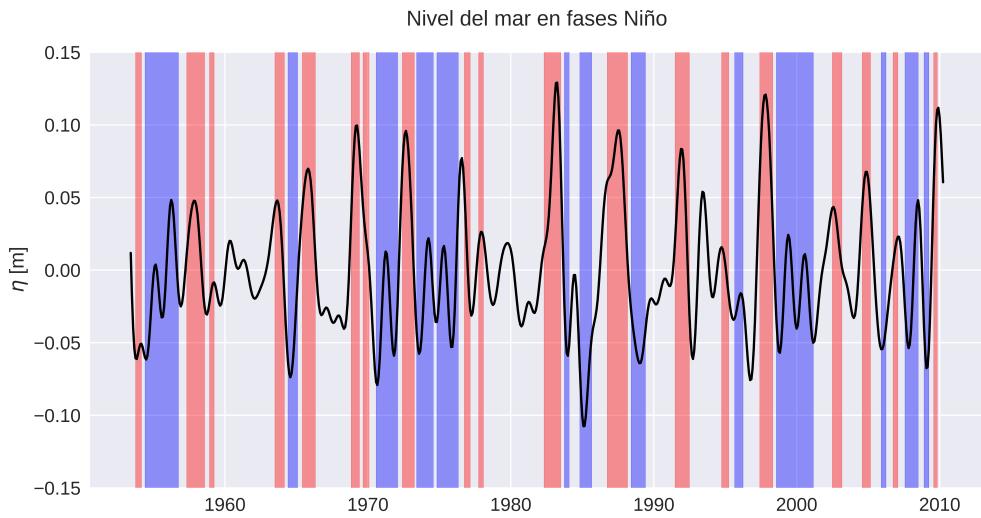
notar que hay períodos donde hay mayor concentración de la energía, uno de estos es alrededor de 6 meses asociado al ciclo semianual, otros valores donde hay concentración de la energía están en períodos superiores a los 12 meses. El ENSO, al ser un fenómeno que sucede en la escala interanual, es suficiente que se estudie entre períodos de 2 y 6 años (**CITAR**), por lo tanto, las demás potencias asociadas a otras escalas temporales no se tomaron en cuenta, como lo indica el lado derecho de la figura 3-9. La varianza en esta banda de interés explica el 23.3 % de la varianza total de la serie de nivel del mar.

Se filtra la serie de nivel del mar en la banda espectral de interés con ayuda de la transformada de Fourier inversa.

En la figura 3-10 se evidencia que el nivel del mar enmarcado en la variabilidad interanual, incrementó durante las fases cálidas del ENSO y disminuyó durante las fases frías, lo anterior se comprendió mejor cuando esta serie se comparó con la serie del índice ONI (??) y se observaron sobrelevaciones de hasta 10 cm que coinciden con fases cálidas.

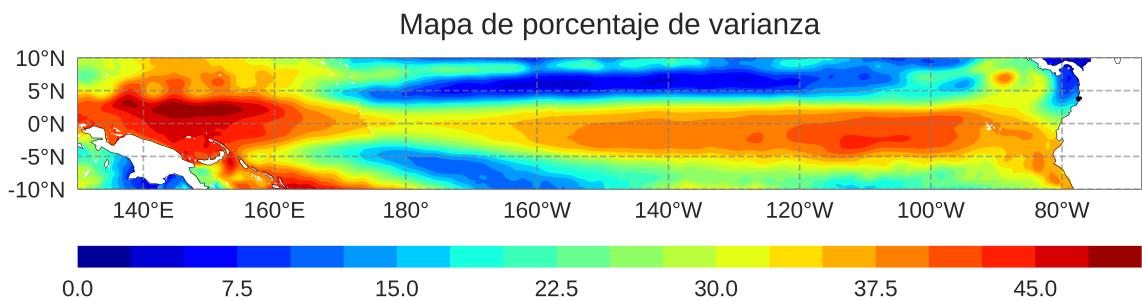
### 3.0.3. Variabilidad espacial del nivel del mar en el Pacífico Tropical

Conocidas las sobrelevaciones y descensos del nivel del mar que se pueden generar en una región como la bahía de Buenaventura, es fundamental investigar si dichas perturbaciones del nivel ocurrieron previamente en otras regiones del Pacífico tropical o si hay variables que se correlacionan con él en determinadas regiones. Esto implica estudiar la variabilidad espacial del nivel del mar y el efecto del ENSO sobre ella.



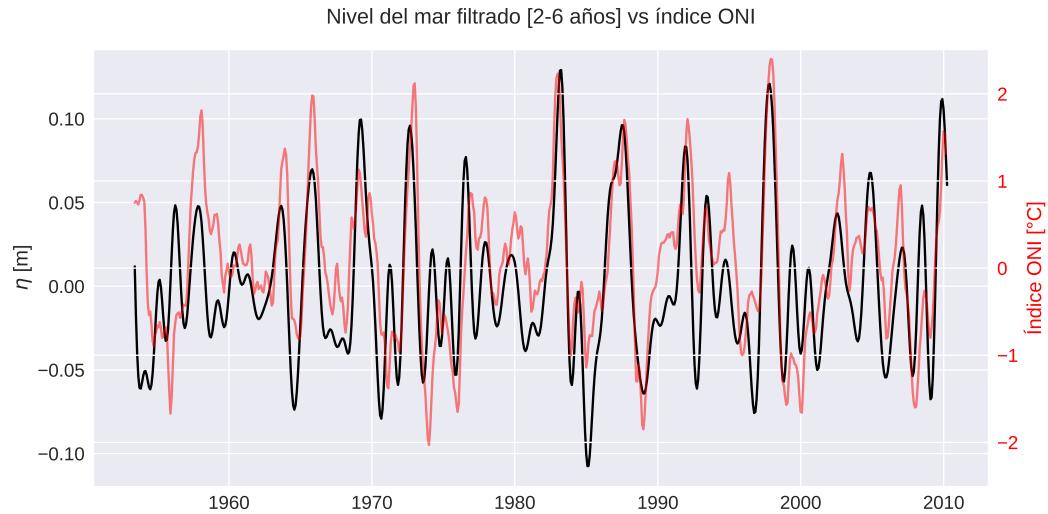
**Figura 3-10.**: Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años

El primer resultado en este enfoque es el porcentaje de varianza que representa la bandapectral en la que se estudia el ENSO (Fig. 3-9) en relación a la varianza total del nivel del mar. Lo anterior ayuda estimar cuánto podría influir el ENSO en la variabilidad temporal de esta variable en toda la región del Pacífico tropical.



**Figura 3-12.**: Mapa de porcentaje de varianza

En diferentes zonas como las piscina caliente y la región que abarca la lengua fría del Pacífico, la bandapectral elegida explica entre el 35 % y 50 % de la varianza total (Figura 3-12), por lo tanto, fenómenos climáticos de la escala interanual son energéticamente importantes, incluso se considera al ENSO como el de mayor relevancia CITAR . En regiones más cercanas a la costa, los aportes la bandapectral puede no explicar porcentajes altos de la densidad spectral del nivel del mar, esto puede deberse a los problemas que tienen los modelos de reanálisis y los satélites altimétricos de realizar mediciones correctas en la zona costera, o también por las condiciones que

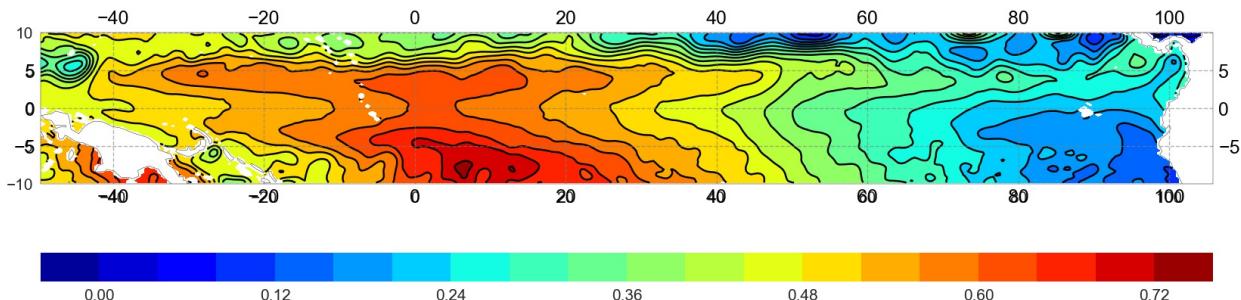


**Figura 3-11.:** Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años

se presentan en la costa que hace que otros fenómenos en otras escalas temporales tengan mayor aporte a la variabilidad.

Para conocer específicamente, la importancia del ENSO dentro de la banda espectral de interés, se construyen funciones ortogonales empíricas (EOF por sus siglas en inglés) que permitan identificar los patrones espacio-temporales más dominantes en dicha escala a partir de los modos de oscilación espaciales y las componentes principales. Para construir estas funciones, primero se filtró las series de nivel del mar en la banda seleccionada (esto se realizó para todos los píxeles de la región). Es importante resaltar que se seleccionó una región espacial amplia, dado que es posible que se presenten valores máximos de la EOF en los bordes que dejen inconclusa información espacial.

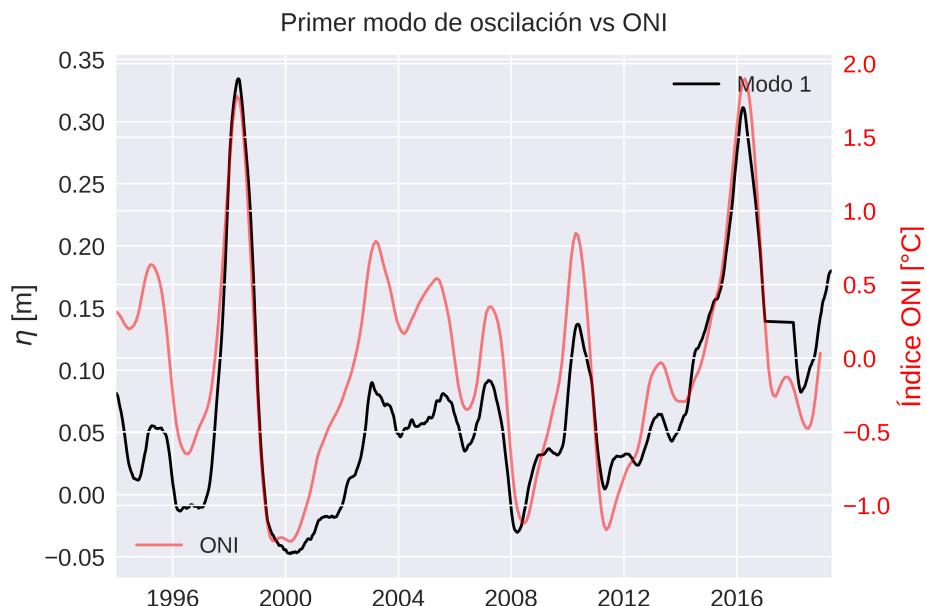
Las cuatro primeras componentes principales explican cerca del 65 % de la varianza, pero es de especial interés conocer la que más aporta junto a su respectivo modo de oscilación espacial.



**Figura 3-13.:** Modo de oscilación espacial asociado a la primer componente principal

En la estructura espacial de la EOF (Fig. 3-13), puede notarse que la mayoría de las regiones en el Pacífico este tienen un comportamiento similar, es decir, cuando una zona aumenta, la otra también lo hace (puede notarse el ascenso de la corrientes de Perú hacia el trópico). De igual forma sucede para el Pacífico este, dónde alrededor de la piscina caliente, el nivel del mar tiene un comportamiento similar.

La primer componente principal explica el % de la varianza asociada a la banda espectral de interés, al representar la variación temporal de la estructura espacial más dominante se compara con un índice que represente la variación temporal del ENSO, en este caso, el índice ONI. Puede observarse que existe una correlación positiva, puesto que cuando hay aumentos/descensos sostenidos en el índice ONI, la componente principal también genera sobrelevaciones/descensos en la estructura espacial, esto es similar a lo reportado previamente con la serie del mareógrafo (Fig. 3-3)

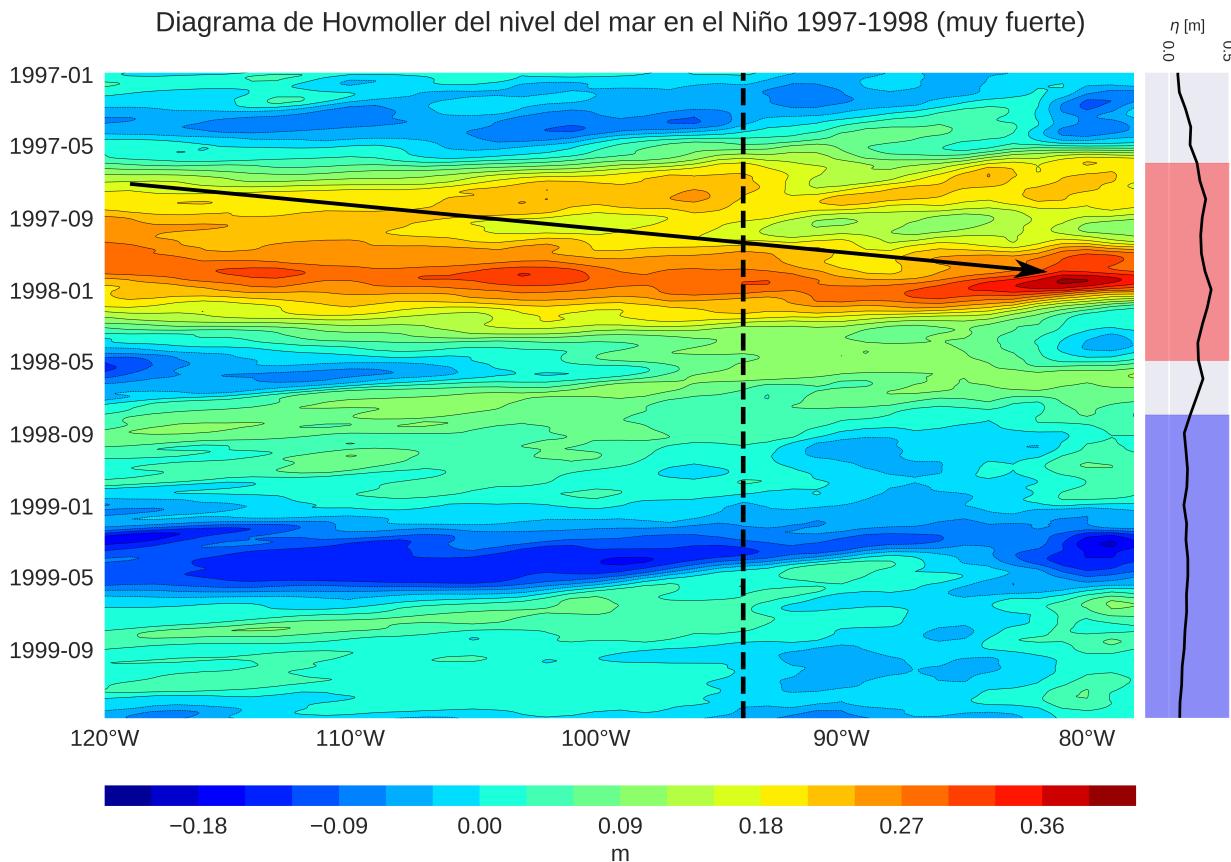


**Figura 3-14.:** Comparación de la primer componente principal y el índice ONI

La figura anterior sugiere que el ENSO es el patrón espacio-temporal más dominante en la variabilidad interanual del nivel del mar en el Pacífico y por lo tanto, ayuda a modular las ascensos y descensos del nivel del mar en el largo plazo.

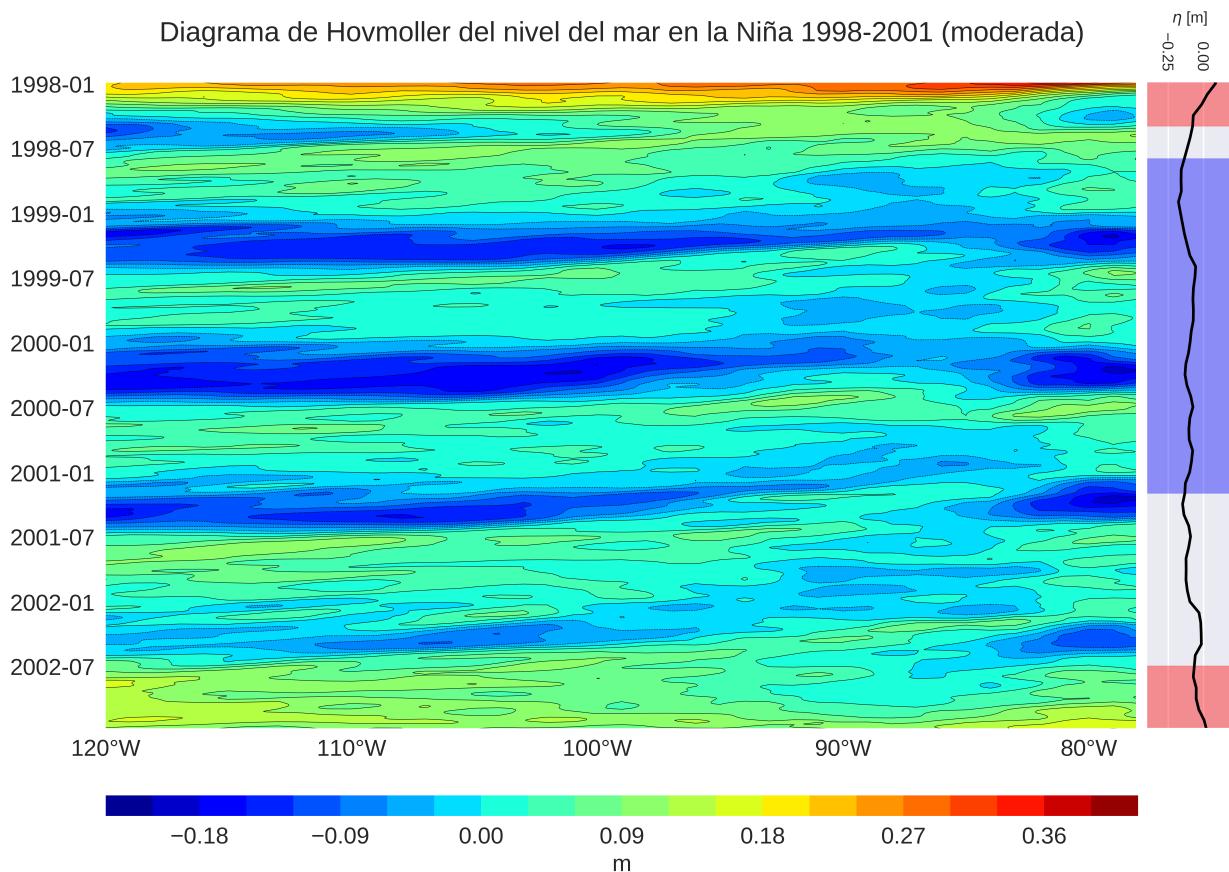
### 3.0.4. Caracterización del nivel del mar durante un Evento Niño y Niña

Es necesario un enfoque en variación espacial del nivel del mar durante eventos Niño o Niña para identificar el transporte de las sobrelevaciones y descensos que provienen desde el oeste del Pacífico. Un diagrama de hovmoller en la latitud  $3.5^{\circ}\text{N}$  muestra como las anomalías del nivel del mar atraviesan el océano hasta llegar a la costa Pacífica Colombiana (flecha negra). Para un evento Niño se muestra que el nivel empezó aumentando hasta ciertas longitudes (cerca a los  $94^{\circ}\text{W}$ ) donde parecieron disiparse las anomalías, pero posteriormente, aumentos aún mayores y persistentes lograron viajar mayores distancias. Lo anterior sugiere que la **persistencia** y la **intensidad** de dichas perturbaciones son factores clave para su llegada a la costa. Los valores de las anomalías son similares en magnitud a los registrados en el mareógrafo de Buenaventura (ver panel derecho en la Fig. 3-15), adicionalmente, se vieron después de los ascensos en la costa, lo que parece ser una respuesta en forma de descensos del nivel. Esta caracterización longitudinal se hizo para todos los eventos ENSO ocurridos desde 1953 hasta 2010 (Anexo A)



**Figura 3-15.**: Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante el Niño (1997-1998)

Durante las fases de enfriamiento del ENSO, los vientos alisios del este se intensifican y mantienen el centro de centro de baja presión en la piscina caliente (circulación de Walker), lo anterior, genera que el nivel del mar en el Pacífico Este disminuya. Un diagrama de Hovmoller en la latitud 3.5°N muestra como las anomalías del nivel se mantienen durante un período muy largo (evento Niña de mayor duración entre 1953 y 2010) (Fig. 3-16)



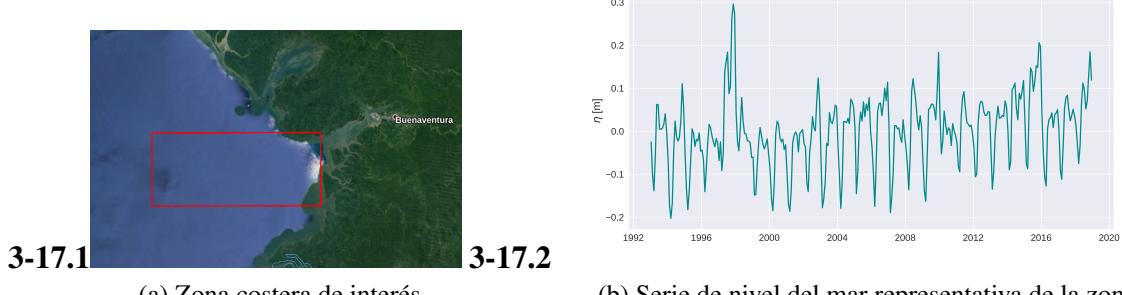
**Figura 3-16.**: Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante el Niño (1997-1998)

El transporte de las sobrelevaciones del nivel puede indicar que hay regiones mar afuera que permiten la predicción de los aportes del nivel del mar debidos al ENSO, lo cuál sirve para generar alertas a las comunidades costeras de la bahía de Buenaventura.

### 3.0.5. Predicción del nivel del mar debido a ENSO en una zona costera

#### Región costera de interés

La región costera de interés seleccionada en la sección 2.2.2, se muestra a continuación junto a su respectiva serie de nivel del mar promediada espacialmente.



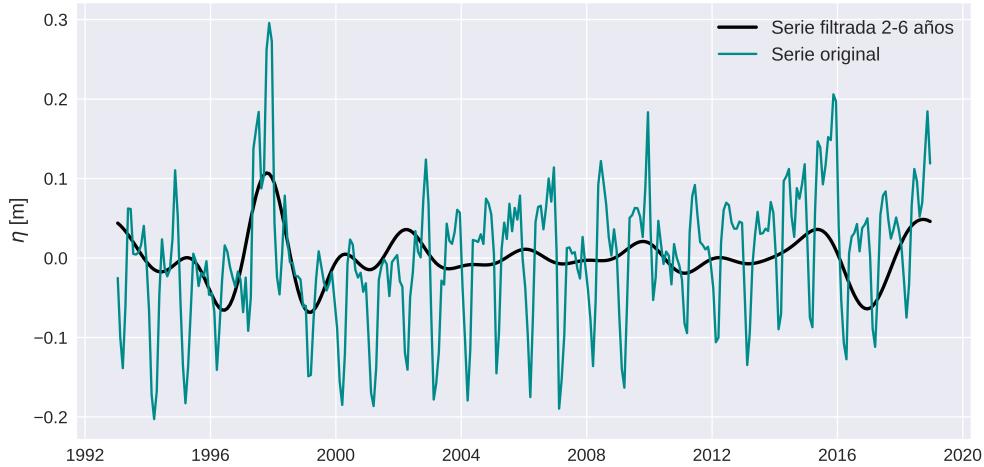
**Figura 3-17.:** Selección de la zona costera de interés y su serie representativa del nivel del mar

La serie de nivel del mar se filtró en la banda de interés (Fig 3-18), para eliminar la influencia de otros fenómenos que ocurren en escalas temporales menores (ej: ciclo anual) y mayores (ej: descongelamiento de los polos). Como se había visto previamente, en este rango de períodos existen sobrelevaciones y descensos del nivel del mar que coinciden con las franjas que marcan la ocurrencia de eventos Niño y Niña.

#### Selección de las regiones mar afuera

Para predecir los aumentos y descensos del nivel del mar debidos al ENSO en la zona de interés, se determinaron regiones donde las variables de nivel del mar, temperatura y velocidad de las corrientes longitudinales y latitudinales, se correlacionan en un rezago positivo con el nivel en la costa, es decir, que mientras una variable incrementó en dicha región, el nivel del mar en la zona de interés también lo hizo un período de tiempo después. Si existe un rezago largo, el tiempo de respuesta por parte de las comunidades costeras es mayor, sin embargo, las correlaciones disminuyen espacialmente. De todos los mapas de correlación de Spearman rezagada (Anexo B), se presentan los de mayor correlación en conjunto con las regiones seleccionadas para cada variable.

Las regiones seleccionadas para determinar las series de las variables que servirán como variables



**Figura 3-18.:** Filtrado de la serie de nivel del mar entre 2 y 6 años

predictoras se presentan a continuación:

**Tabla 3-3.:** Regiones elegidas para determinar las series de las variables predictoras del nivel del mar en la costa

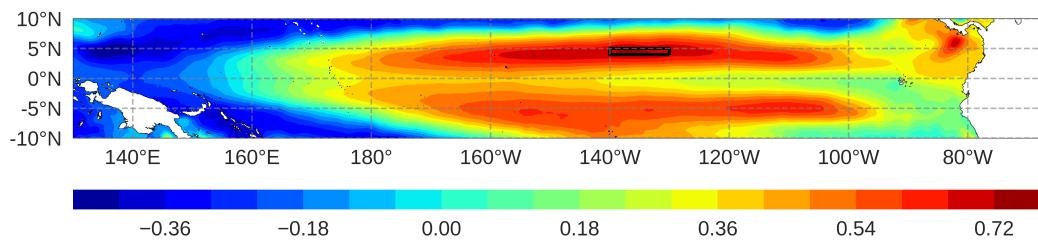
Variable	Región
Nivel del mar	1
Temperatura	1
Velocidad de las corrientes en longitud, U	1
Velocidad de las corrientes en longitud, U	1

Antes de construir la red neuronal para la predicción del nivel del mar debido al fenómeno ENSO, estas series usadas de las variables *predictoras* también se filtraron en la escala de interés.

### 3.1. Pronóstico del nivel del mar

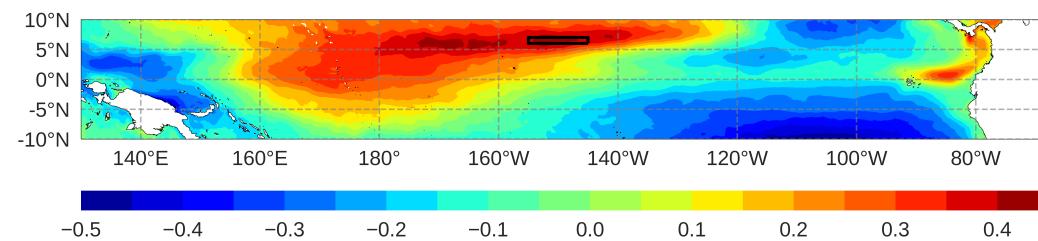
Las variables predictoras fueron pre-procesadas para optimizar las técnicas que asignan los pesos a cada unión entre nodos, este pre-procesamiento incluye el escalamiento según la función de activación.

Después de un análisis de sensibilidad de los pesos que la red asignó a cada variable, se determinó suprimir las variables de temperatura y velocidad de las corrientes en la latitud, así se construyó la



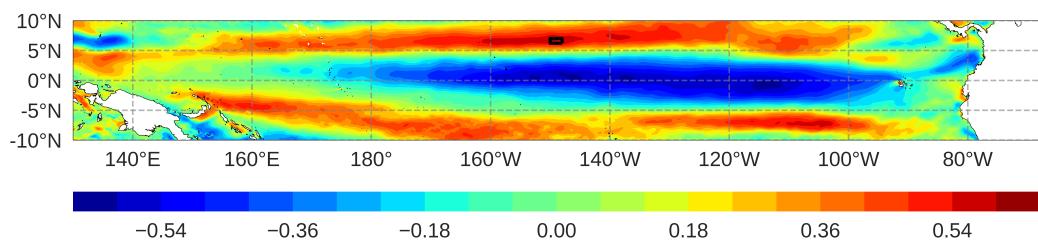
3-19.1

(a) Mapa de correlación de Spearman de nivel del mar con rezago +1



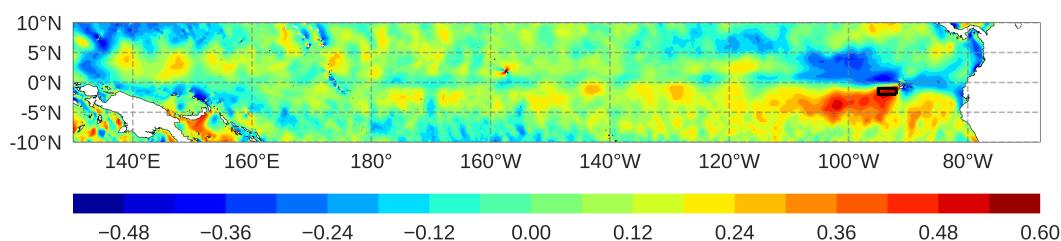
3-19.2

(b) Mapa de correlación de Spearman con rezago +1, entre el nivel del mar en la costa y la temperatura



3-19.3

(c) Mapa de correlación de Spearman con rezago +1, entre el nivel del mar en la costa y la velocidad longitudinal de las corrientes superficiales

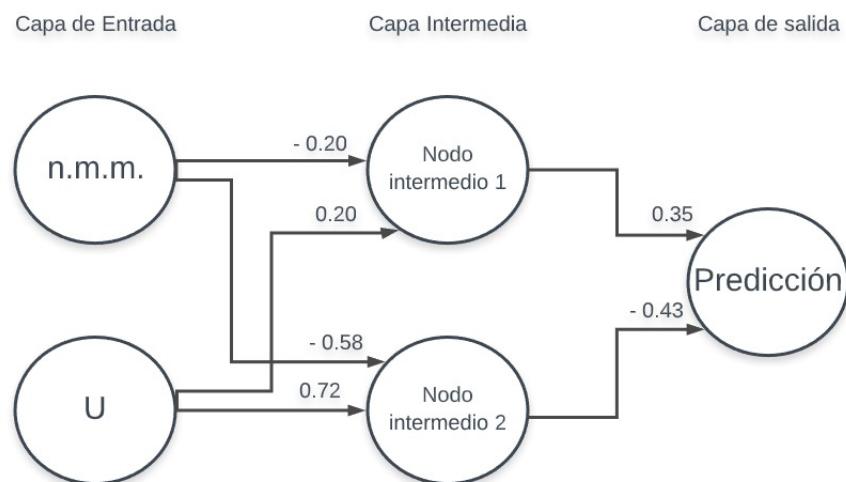


3-19.4

(d) Mapa de correlación de Spearman con rezago +1, entre el nivel del mar en la costa y la velocidad latitudinal de las corrientes superficiales

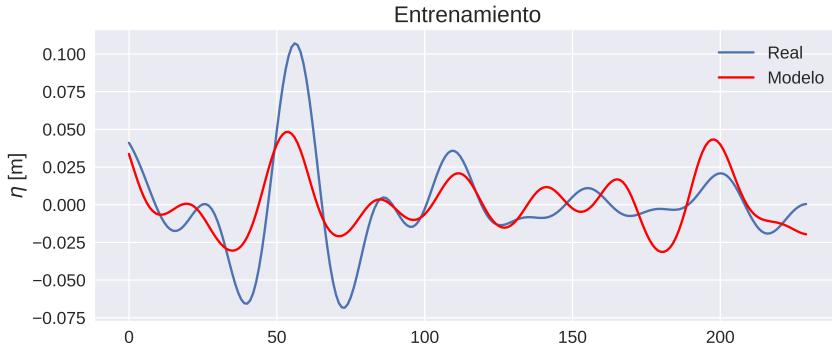
**Figura 3-19.: Mapas de correlación de Spearman para todas las variables predictoras**

red con 2 variables de entrada, una capa oculta intermedia con dos nodos y una capa de salida con un nodo. Los pesos entre cada conexión se presentan a continuación.



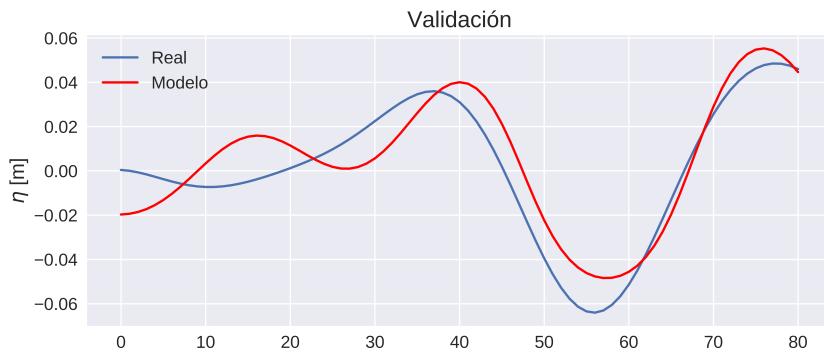
**Figura 3-20.:** Estructura de la red neuronal artificial

Después del entrenamiento de la red con el 70 % de los datos (Panel superior de la fig. 3-21), la red predijo los datos de validación con un RMSE de 0.01 m y un coeficiente de correlación de Spearman igual a 0.83.



**3-21.1**

(a) Comportamiento de la red neuronal artifical durante el entrenamiento



**3-21.2**

(b) Predicción de los datos de validación con la red neuronal artifical

**Figura 3-21.: Mapas de correlación de Spearman para todas las variables predictoras**

# **4. Conclusiones y recomendaciones**

## **4.1. Conclusiones**

El ENSO es el fenómeno más importante en la variabilidad interanual del nivel del mar en la bahía de Buenaventura y durante sus fases cálidas se presentan sobrelevaciones de hasta 35 cm sobre el nivel medio del mar y descensos de hasta 40 cm. El comportamiento del nivel del mar puede variar entre eventos niño y niña y es función de la duración de la fase cálida o fría, la intensidad del evento. El promedio de las sobrelevaciones ocurridas en los meses niño es de 43.3 cm y el promedio de los descensos durante los meses niña es de 45.2 cm. El promedio de las duraciones de los eventos ENSO es menor al promedio de las duraciones de los eventos Niña, esto puede verse explicado porque las fases frías del ENSO son más estables que las cálidas [12].

El ENSO puede aportar hasta 10 cm a la sobre elevación del nivel del mar, como aparece en ciertos registros en el evento Niño de 1982-1983, e incluso, es posible que ciertas condiciones amplifiquen o no estas sobrelevaciones, convirtiéndose en una amenaza para las comunidades costeras. Las sobrelevaciones y descensos del nivel del mar debidos solamente a fenómeno ENSO actúan en conjunto con la climatología anual del nivel y otras condiciones específicas que pueden intensificar y/o sostener dichos aumentos/descensos.

El patrón espacio-temporal más importante del nivel del mar en la escala interanual en el Pacífico Tropical es el ENSO y la varianza asociada a la banda espectral en la que se estudia puede representar hasta el 50 % de la varianza total del nivel del mar en regiones cercanas al trópico

Las aumentos persistentes e intensos del nivel del mar durante los eventos Niño logran atravesar el Pacífico de Oeste a Este y modificar las condiciones de nivel del mar en las costas de Suramérica y en determinadas ocasiones, generar posteriores descensos del nivel del mar.

Es posible la implementación de herramientas de pronóstico de los aportes del ENSO al nivel del mar en la bahía de Buenaventura con una red neuronal artificial construida y entrenada que predice el 30 % de los datos (conjunto de datos de validación) con un RMSE de 0.01 m y una correlación de Spearman igual a 0.83. Su estructura se resume en: 2 variables de entrada, nivel del mar y velocidad longitudinal de las corrientes, 2 nodos en una capa intermedia oculta y una capa de salida, las características de su configuración son una función de activación tangente hiperbólica

y el uso de corrección del sesgo.

## 4.2. Recomendaciones

Es posible usar el viento (principal forzador)

Es posible ampliarlo para otras regiones del país

Es posible tener registros mayores para entrenar la red

Es posible tomar en cuenta los fenómenos que amplifican o no el nivel

## **A. Anexo: Diagramas de Hovmöller**

**B. Anexo: Mapas de correlación de Spearman entre cada variable y el nivel del mar en la zona costera de interés**

# Bibliografía

- [1] BARNARD, Patrick L. ; SHORT, Andrew D. ; HARLEY, Mitchell D. ; SPLINTER, Kristen D. ; VITOUSEK, Sean ; TURNER, Ian L. ; ALLAN, Jonathan ; BANNO, Masayuki ; BRYAN, Karin R. ; DORIA, André ; HANSEN, Jeff E. ; KATO, Shigeru ; KURIYAMA, Yoshiaki ; RANDALL-GOODWIN, Evan ; RUGGIERO, Peter ; WALKER, Ian J. ; HEATHFIELD, Derek K.: Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. En: *Nature Geoscience* 8 (2015), Nr. 10, p. 801–807. – ISSN 17520908
- [2] CAYAN, Daniel R. ; BROMIRSKI, Peter D. ; HAYHOE, Katharine ; TYREE, Mary: Climate change projections of sea level extremes along the California coast. 87 (2008), p. 57–73
- [3] CAZENAVE, A. ; HENRY, O. ; MUNIER, S. ; DELCROIX, T. ; GORDON, A. L. ; MEYSSIGNAC, B. ; LLOVEL, W. ; PALANISAMY, H. ; BECKER, M.: Estimating ENSO Influence on the Global Mean Sea Level, 1993-2010. En: *Marine Geodesy* 35 (2012), Nr. SUPPL. 1, p. 82–97. – ISSN 01490419
- [4] CAZENAVE, Anny ; DIENG, Habib-boubacar ; MEYSSIGNAC, Benoit ; SCHUCKMANN, Karina V. ; DECHARME, Bertrand ; BERTHIER, Etienne: The rate of sea-level rise. 4 (2014), Nr. May, p. 358–361
- [5] CAZENAVE, Anny ; LOMBARD, Alix ; LLOVEL, William: Present-day sea level rise: A synthesis. En: *Comptes Rendus - Geoscience* 340 (2008), Nr. 11, p. 761–770. – ISSN 16310713
- [6] CHANG, Yi-ting ; DU, Ling ; ZHANG, Shou-wen ; HUANG, Peng-fei: Sea level variations in the tropical Pacific Ocean during two types of recent El Niño events. En: *Global and Planetary Change* 108 (2013), p. 119–127. – ISSN 0921–8181
- [7] CORREA, Ivan D. ; GONZALEZ, Juan L.: Coastal erosion and village relocation : a Colombian case study. 43 (2000), p. 51–64
- [8] DELCROIX, Thierry ; BOULANGER, Jean-philippe ; MASIA, Frangois ; MENKES, Christophe: Geosat-derived sea level and surface current anomalies in the equatorial Pacific during the 1986-1989 El Niño and La Niña. 99 (1994), Nr. 94

- [9] DRONKERS, J. J.: *Tidal Theory and Computations*. ACADEMIC PRESS, INC., 1975. – 145–230 p. ISSN 0065–2768
- [10] FERNANDEZ, E ; LELLOUCHE, J M.: Product User Manual for the Global Ocean Physical Reanalysis Product GLORYS12V1. En: *Copernicus Product User Manual* 4 (2018), Nr. April, p. 1–15
- [11] GILL, A. E. *An Estimation of Sea-Level and Surface-Current Anomalies during the 1972 El Niño and Consequent Thermal Effects*. 1983
- [12] GOUIRAND, I ; MORON, V: VARIABILITY OF THE IMPACT OF EL NIÑO – SOUTHERN OSCILLATION ON SEA-LEVEL PRESSURE ANOMALIES OVER THE NORTH ATLANTIC IN. 1566 (2003), p. 1549–1566
- [13] LOMBARD, Alix ; CAZENAVE, Anny ; LE TRAON, Pierre Y. ; ISHII, Masayoshi: Contribution of thermal expansion to present-day sea-level change revisited. En: *Global and Planetary Change* 47 (2005), Nr. 1, p. 1–16. – ISSN 09218181
- [14] LUND, Robert B. ; VON STORCH, Hans ; ZWIERS, Francis W.: Statistical Analysis in Climate Research. En: *Journal of the American Statistical Association* 95 (2000), Nr. 452, p. 1375. – ISSN 01621459
- [15] MÁLIKOV, Igor: Régimen De La Marea En Diferentes Puntos De Las Costas Colombianas. En: *Ideam* 64 (2010), Nr. 6, p. 21. – ISBN 9780874216561
- [16] MOLARES BABRA, Ricardo J.: Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. En: *Boletín Científico CIOH* (2004), Nr. 22, p. 105–114. – ISSN 01200542
- [17] MONTAGUT, Eduardo A.: Zona costera en Colombia, qué es? En: *Articulo Boletín Acipa “Avante”* (2012), p. 7
- [18] PAWLOWICZ, Rich ; BEARDSLEY, Bob ; LENTZ, Steve: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE \$. 28 (2002), p. 929–937
- [19] SCHUREMANN, Paul. *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. 1958
- [20] OF UNESCO, Intergovernmental Oceanographic C.: Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, Volume V: Radar Gauges. En: *IOC Manuals and Guides No.14, vol. V 5* (2016), Nr. 89, p. 104
- [21] VALLE-LEVINSON, Arnoldo ; DUTTON, Andrea ; MARTIN, Jonathan B.: Spatial and temporal variability of sea level rise hot spots over the eastern United States. En: *Geophysical*

*Research Letters* 44 (2017), Nr. 15, p. 7876–7882. – ISSN 19448007

- [22] WANG, Linlin ; LI, Qiang ; MAO, Xian-zhong ; BI, Hongsheng ; YIN, Peng: Interannual sea level variability in the Pearl River Estuary and its response to El Niño – Southern Oscillation. En: *Global and Planetary Change* 162 (2018), Nr. January, p. 163–174. – ISSN 0921–8181
- [23] ZHANG, Xuebin ; CHURCH, John A.: Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. En: *Geophysical Research Letters* 39 (2012), Nr. 21, p. 1–8. – ISSN 00948276