



# **Efecto del ENSO en la variabilidad interanual del nivel del mar en la zona costera de Buenaventura, Colombia**

**Franklin Farid Ayala Cruz**

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

# **Efecto del ENSO en la variabilidad interanual del nivel del mar en la zona costera de Buenaventura, Colombia**

**Franklin Farid Ayala Cruz**

Trabajo de grado presentado 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

A Dios por ayudarme a cumplir cada uno de mis sueños

A mis Padres, por ser ejemplo para mí de disciplina y responsabilidad, por apoyarme en este largo camino. A mis hermanos, por siempre valorar mi esfuerzo

A mi futura esposa, Alejandra, por enseñarme a ser una persona equilibrada, te amo.

A mis mentores, Johann y Andrés, por enamorarme del océano.

A mis amigos, Mario, Camilo, Pauli, por ser absolutamente incondicionales en mi vida y haberme enseñado tanto.

”Y todo lo que hagáis, hacedlo de corazón, como para el Señor y no para los hombres”  
Colosenses 3:23

# Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>4</b>
2.1	Objetivos específicos . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>5</b>
3.1	Marea astronómica . . . . .	5
3.2	Marea meteorológica . . . . .	8
3.3	Análisis descriptivo de la variación del nivel del mar . . . . .	8
3.4	Análisis espectral . . . . .	10
3.5	Análisis de componentes principales . . . . .	11
3.6	Medidas de correlación lineal . . . . .	13
3.7	Red Neuronal Artificial (RNA) . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Metodología</b>	<b>15</b>
4.1	Datos empleados . . . . .	15
4.2	Ánalsis exploratorio de los datos . . . . .	16
4.3	Caracterización del nivel del mar durante eventos ENSO . . . . .	16
4.4	Efecto del ENSO en la variabilidad del nivel del mar . . . . .	17
4.5	Predicción del nivel del mar en una zona costera de interés . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>19</b>
5.1	Caracterización de los eventos Niño y Niña . . . . .	20
5.2	Análisis espectral . . . . .	24
5.3	Variabilidad espacial del nivel del mar en el Pacífico Tropical . . . . .	26
5.4	Caracterización del nivel del mar durante un Evento Niño y Niña . . . . .	28
5.5	Predicción del nivel del mar debido a ENSO en una zona costera . . . . .	30
5.5.1	Región costera de interés . . . . .	30
5.5.2	Selección de las regiones mar afuera . . . . .	31
5.6	Pronóstico del nivel del mar . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>35</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	35

6.2 Recomendaciones . . . . . 36

**Bibliografía** 37

# **Lista de Figuras**

3.1	Series de marea y sus componentes para un período de ejemplo. . . . .	6
3.2	Series de sobrelevaciones y descensos máximos diarios del nivel del mar . . . . .	9
3.3	Serie en el dominio temporal y en el dominio espectral . . . . .	10
3.4	Ejemplo de estructura de red neuronal (Tomado de Google Images) . . . . .	14
4.1	Serie de nivel del mar capturada por el mareógrafo de Buenaventura . . . . .	15
5.1	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. . . . .	19
5.2	Sobrelevaciones del nivel del mar en la bahía de Buenaventura vs índice oceánico del niño (ONI) . . . . .	20
5.3	Sobrelevaciones del nivel del mar Bajo diferentes duraciones de eventos ENSO . .	21
5.4	Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niño desde 1953 hasta 2010 . . . . .	22
5.5	Descensos del nivel del mar bajo diferentes duraciones de eventos Niña . . . . .	23
5.6	Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niña desde 1953 hasta 2010 . . . . .	24
5.7	El espectro de potencias de Fourier en el lado izquierdo de la figura y la banda espectral de interés en el lado derecho . . . . .	25
5.8	Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años . . . . .	25
5.9	Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años . . . . .	26
5.10	Mapa de porcentaje de varianza . . . . .	27
5.11	Modo de oscilación espacial asociado a la primer componente principal . . . . .	27
5.12	Comparación de la primer componente principal y el índice ONI . . . . .	28
5.13	Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante el Niño (1997-1998) . . . . .	29
5.14	Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante la Niña (1998-2001) . . . . .	30
5.15	Selección de la zona costera de interés (panel superior) y su serie representativa del nivel del mar original y filtrada entre 2 y 6 años. . . . .	31
5.16	Mapas de correlación de Spearman para todas las variables predictoras . . . . .	32

---

5.17 Estructura de la red neuronal artificial . . . . .	33
5.18 Comportamiento de la red en el entrenamiento y en la validación . . . . .	34

# **Lista de Tablas**

<b>3-1</b>	Principales 5 componentes de la marea astronómica . . . . .	7
<b>5-1</b>	Cantidad de eventos Niño y Niña para cada rango de duración . . . . .	21
<b>5-2</b>	Regiones elegidas para determinar las series de las variables predictoras del nivel del mar en la costa . . . . .	33

# 1 Introducción

En el Pacífico Colombiano se han registrado aumentos súbitos del nivel del mar que han provocado la pérdida de los territorios costeros dónde diversas comunidades estaban asentadas, estos ascensos locales pueden deberse a la acción conjunta de procesos geológicos, depositación de sedimentos, patrones locales de vientos y fenómenos macroclimáticos (Church and Gregory, 2019). Algunos autores asociaron sobrelevaciones del nivel de hasta 30 cm con la ocurrencia de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Correa and Gonzalez, 2000). Sin embargo, aún no se caracterizan los aportes de este fenómeno dentro de la variabilidad del nivel del mar.

La tasa de aumento del nivel del mar debida a cambios eustáticos o globales, ha oscilado entre 2 mm/año y 3 mm/año desde el siglo pasado (Cazenave et al., 2014), estos cambios son ocasionados por fenómenos como expansión térmica (Lombard et al., 2005), oscilaciones climáticas, derretimiento de masas de hielo y aporte de aguas contenidas en reservorios terrestres (Cazenave et al., 2008). Adicionalmente, estudios previos demostraron correlaciones entre el nivel medio del mar global en la escala interanual y el almacenamiento global de agua terrestre durante el ENSO para la región norte del Pacífico tropical (Cazenave et al., 2012). Los niveles del mar en las latitudes bajas tienen una mayor respuesta al ENSO que las latitudes medias y altas (Soumya et al., 2015), a pesar de esos impactos en las regiones de baja latitud, no ha aumentado la tendencia del nivel (Chang et al., 2013)

Han existido grandes esfuerzos por entender los efectos del ENSO en la variabilidad espaciotemporal del nivel del mar en el Pacífico Tropical (Zhang and Church, 2012) y su respectiva relación el viento, presión a nivel del mar y corrientes superficiales (Delcroix et al., 1994), (Gill, 1983). Adicionalmente, han resaltado las sobrelevaciones del nivel que genera una fase cálida del ENSO en el Pacífico Este. Por ejemplo, en el Este de California y en el Pacífico Noroeste, se han presentado aumentos de hasta 11 cm debidos a fases cálidas del ENSO junto a porcentajes mayores de erosión costera (Cayan et al., 2008), (Barnard et al., 2015), también se han registrados aumentos súbitos del nivel del mar en la bahía de Buenaventura del Pacífico colombiano, las cuales han alertado las comunidades de la zona y han generado la necesidad de investigar su duración, amplitud y frecuencia así como las posibilidades de predecirlas antes de que arriben a la costa (Valle-Levinson et al., 2017)

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 su relación con aguas del océano Pacífico tropical, caracterizar su comportamiento en eventos Niño y Niña (Wang et al., 2018) 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.

Para este estudio, se ha encontrado que en la Bahía de Buenaventura el promedio de las sobrelevaciones ocurridas durante los meses niño es de 43.3 cm y que durante los meses niña el promedio de los descensos es 45.2 cm. Los aportes sólamente por fenómeno ENSO pueden ser de hasta 10 cm (Niño 1982-1983), los cuales pueden predecirse a partir del nivel del mar y las corrientes zonales en otras regiones del Pacífico a partir del uso de una red neuronal artifical (RNA) con un RMSE de 0.01 m y un coeficiente de correlación de Spearman de 0.83.

En el capítulo 1 se desarrolló el fundamento teórico de las técnicas de análisis de datos y herramientas de predicción empleadas en el presente estudio: la descomposición armónica, el análisis espectral, las funciones ortogonales empíricas y las redes neuronales artificiales (RNA's)

En el capítulo 2 se expone la metodología que se usará para la aplicación coherente de las diferentes técnicas nombradas en el capítulo 1 para la caracterización de la variabilidad del nivel del mar desde la bahía de Buenaventura hasta el Pacífico Tropical, adicionalmente se describen la fuentes de información empleados en esta investigación.

El capítulo 3 presenta los resultados después de la aplicacion 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 Objetivos**

Conocer el efecto del ENSO en la variabilidad interanual del nivel del mar en la zona costera de Buenaventura.

### **2.1. Objetivos específicos**

- Identificar la relación del nivel del mar en Buenaventura con las fases cálidas y frías del ENSO a través del índice ONI.
- Caracterizar los eventos Niño y Niña en términos de su duración y amplitud así como desde el comportamiento del nivel del mar en Buenaventura.
- Analizar espectralmente la serie mensual de nivel del mar para la información del mareógrafo y filtrarla en la banda de interés (2-6 años)
- Conocer la variabilidad espacial del nivel del mar en el Pacífico Tropical a través de mapas de varianza y funciones ortogonales empíricas.
- Caracterizar espacialmente el nivel del mar durante la ocurrencia de eventos Niño y Niña.
- Determinar una región costera frente a la bahía de Buenaventura a partir de la información espacial y su respectiva serie de nivel del mar promediada espacialmente
- Elegir zonas de mayor correlación rezagada entre el nivel del mar, temperatura, corrientes zonales, corrientes meridionales y el nivel del mar en la costa.
- Predecir la variación interanual del nivel del mar en la costa a partir del uso de una red neuronal artificial

# 3 Marco Teórico

La marea se divide en dos componentes principales: marea astronómica y marea meteorológica (Fig 3.1).

## 3.1. Marea astronómica

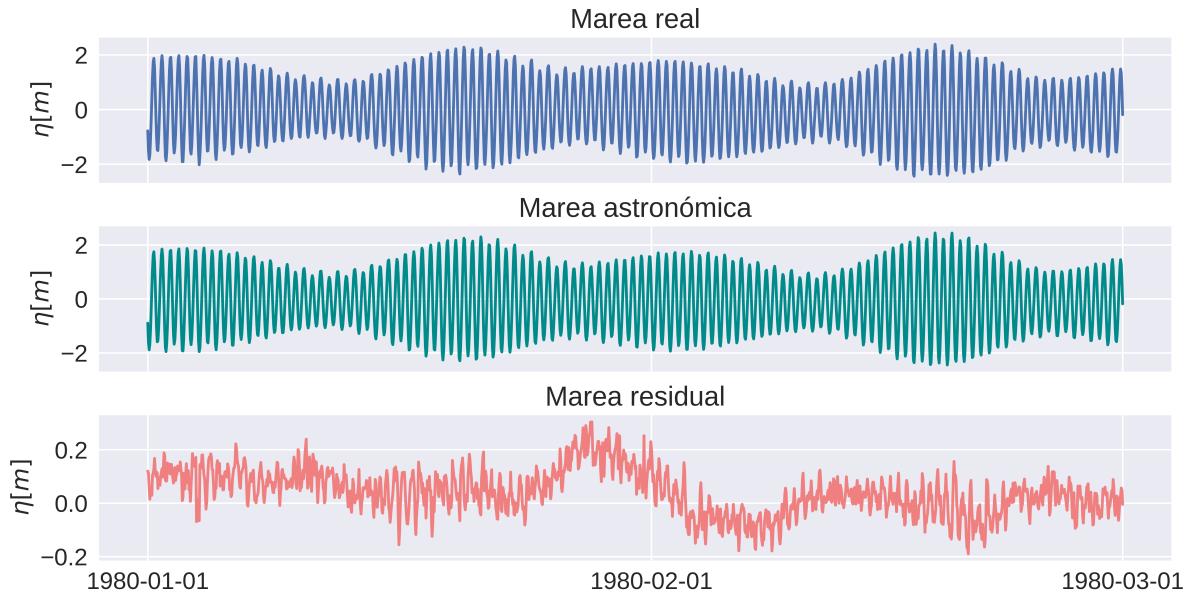
La marea astronómica se define como el desbalance entre la atracción gravitatoria y la fuerza centrífuga en el sistema Tierra-Sol-Luna. La resultante entre estas dos fuerzas se llama fuerza generadora de marea y su componente en x se define como la fuerza tractora que origina la marea (su componente en y es despreciable respecto a la gravedad). A continuación se presenta la fórmula que describe esta fuerza contemplando sólo el sistema tierra-luna:

$$F_t = \frac{3}{2}GM_L \frac{R_t}{R^3} \sin 2\theta \quad (3-1)$$

Donde la G representa la constante de atracción gravitatoria entre la tierra y la luna,  $M_L$  es la masa de la luna,  $R_t$  es el radio de la tierra y R es la distancia entre los centros de gravedad de la tierra y la luna.

El estudio de la marea astronómica se puede realizar a través de diferentes técnicas: a) teoría general de equilibrio propuesta por Isaac Newton, b) teoría dinámica basada en la resolución de las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica (Jesús and Díaz, 2005) y c) análisis armónico fundamentada en la descomposición armónica (Dronkers, 1975), (Schuremann, 1958).

La teoría general de equilibrio es útil para el entendimiento cualitativo de la marea astronómica, más que para la determinación precisa de sus características determinantes, específicamente su amplitud y su fase, dado que asume ciertas hipótesis como que los océanos cubren la superficie terrestre completamente, de tal forma que las partículas de agua se moverán hasta alcanzar una superficie de equilibrio y que la respuesta de la capa de agua es instantánea (se desprecia la inercia). Sin embargo, los efectos de contorno y las fuerzas iniciales sí tienen una gran importancia en la determinación de la marea.



**Figura 3.1:** Series de marea y sus componentes para un período de ejemplo.

La teoría dinámica emplea las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas para la determinación de las variaciones en la superficie libre del flujo y la propagación de la onda de marea. Dichas ecuaciones toman en cuenta la interacción de dichas ondas con fondos someros o con contornos geográficos y estiman bien las magnitudes de la amplitud, la fase y los períodos, sin embargo requieren de mucha información para la calibración de los modelos que las solucionan.

El análisis armónico descompone la señal de marea en un número finito de señales (componentes armónicas) que tienen una amplitud, período y fase correspondiente y que están previamente definidos por su relación directa con los movimientos astronómicos relativos entre la tierra, la luna y el sol.

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(\varpi t + \varphi_i) \quad (3-2)$$

donde,

$a_0$  es la amplitud del nivel medio de referencia

$a_i$  es la amplitud de la onda i

$\omega_i$  es la frecuencia de la onda componente i

$\phi_i$  es el desfase de la onda componente i

t es el instante en que se calcula la marea

n es el número de componentes consideradas

Existen herramientas computacionales que realizan la descomposición armónica de la marea, algunas de estas están estructuradas en MATLAB o Python (Pawlowicz et al., 2002) y para su implementación correcta no pueden existir muchos vacíos en los registros de marea, puesto que se distorsionan los cálculos de las amplitudes. La descomposición armónica bajo el uso de la herramienta PyTides es más eficaz puesto que usa las fechas de los registros existentes para la interpolación de los datos faltantes. Los cinco armónicos que más aportan a la componente astronómica de la marea en Buenaventura, en términos de la amplitud, se presentan a continuación.

**Tabla 3-1:** Principales 5 componentes de la marea astronómica

Componente	Amplitud [m]
M2	1.496
S2	0.421
N2	0.314
K1	0.115
K2	0.104

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 (Málikov, 2010). La marea es de tipo **semidiurna** (Molares Babra, 2004), según el coeficiente de Coutier (eq. 3-3) usado para la clasificación de la marea.

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

La marea astronómica es afectada por diferentes fenómenos, la traslación de la luna alrededor de la tierra que genera la duración de un día lunar mayor al día solar, la declinación de la luna respecto a la tierra, debido a que la luna no está en el plano del ecuador, sino que se encuentra declinada entre  $18.5^{\circ}$ - $28.5^{\circ}$ , dicha variación marca el ciclo nodal de la luna y se repite cada 18.61 años, el efecto de las órbitas elípticas amplifica los valores de marea durante el perigeo y el perihelio y la acción conjunta del sistema Tierra-Sol-Luna que genera los períodos de marea viva o de sicigia, cuando la alineación del sol, la tierra y la luna genera la mayor fuerza de atracción y por ende, hay pleamaras mayores al promedio y bajamaras menores al promedio, de igual forma se perciben los períodos de marea muerta o de cuadratura donde sucede lo contrario; pueden notarse en la marea astronómica de la figura 3.1 donde se presenta una intensificación de los aumentos y descensos del nivel en períodos de aproximadamente 15 días, adicionalmente aparece la diferencia entre la pleamar y la bajamar llamada carrera de marea, y su valor es aproximadamente 4 metros.

## 3.2. Marea meteorológica

Por otro lado, la marea meteorológica se debe a la acción de fenómenos que inducen, tensiones tangenciales en el nivel del mar que pueden converger y por lo tanto, generar un ascenso del nivel del mar como de variaciones en la fuerza vertical que la presión atmosférica ejerce sobre la superficie del mar. Esta marea se puede representar como los residuos meteorológicos en la serie después de eliminar los componentes armónicos de la marea. Los residuos son de carácter, por lo que es difícil su predicción.

La serie residual de la marea (panel superior en la fig 3.2) es la serie de interés en este estudio, puesto que es la componente que está condicionada por fenómenos meteorológicos. Se llamará de aquí en adelante **serie de nivel del mar** y dada su resolución, es posible determinar tres series a partir de ella con una resolución menor que permitan entender análisis posteriores.

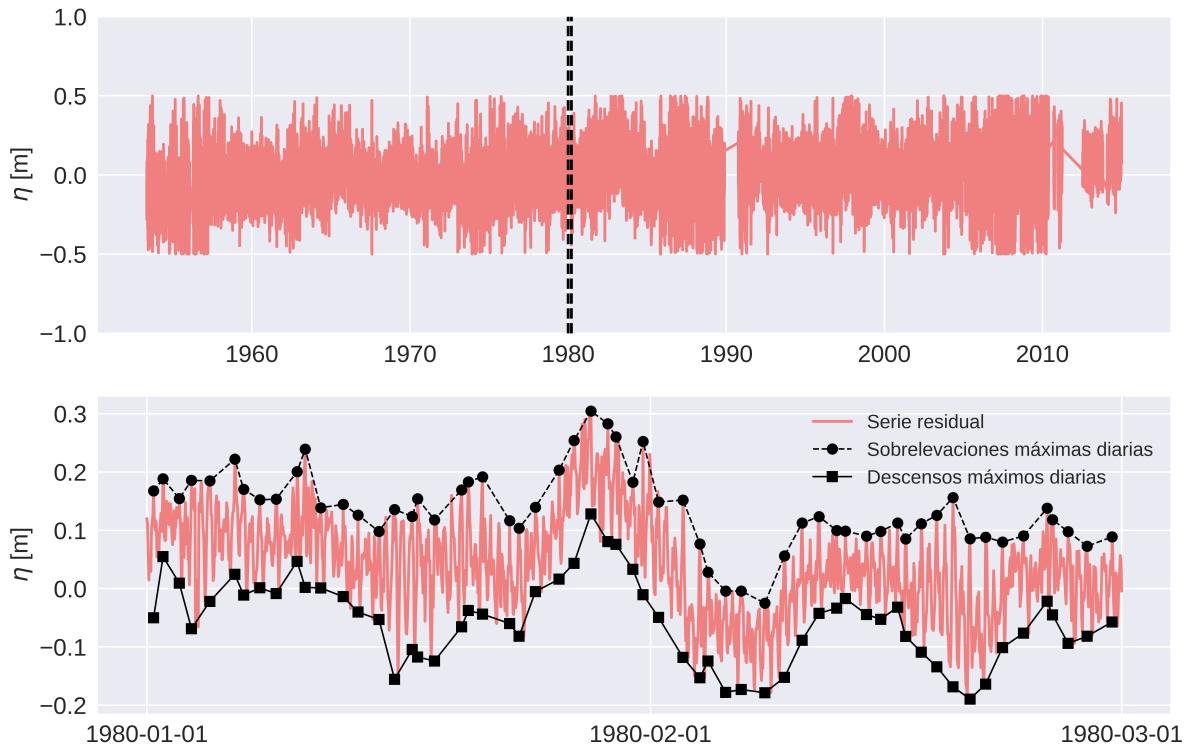
1. Serie mensual de nivel del mar: Obtenida a partir del promedio mes a mes de la serie de nivel del mar en resolución horaria.
2. Series de sobrelevaciones y descensos diarios de nivel del mar: Obtenidas a partir de los máximas sobrelevaciones y descensos del nivel que ocurren en un día (panel inferior en la 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 serie brinda información más fidedigna que lo que registró el mareografo.

## 3.3. Análisis descriptivo de la variación del nivel del mar

Una serie temporal de alguna variable se puede descomponer en una parte estacional ( $E_t$ ), una parte de tendencia  $T_t$  y una parte asociada a ruido  $R_t$  (eq 3-4). La componente de ruido se debe a la aleatoriedad de la variable y su carácter no es determinista, sin embargo, las otras dos componentes si lo son.

$$X_t = E_t + I_t + R_t \quad (3-4)$$



**Figura 3.2:** Series de sobrelevaciones y descensos máximos diarios del nivel del mar

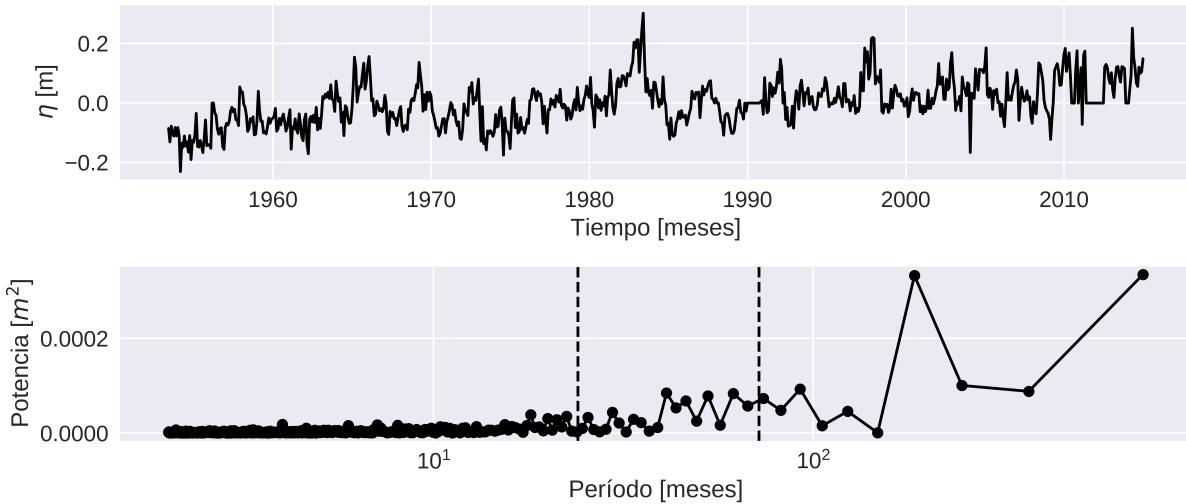
Ciertas técnicas de análisis de datos requieren que la información sea estacionaria, por lo tanto, se debe suprimir la tendencia que pueda tener el registro. La estimación de la tendencia se puede realizar desde un enfoque determinista o evolutivo, según la naturaleza de la serie.

## Nivel medio del mar

Todos los estudios del nivel del mar en una región local no utilizan la información de altura de nivel sobre un datum de referencia global, sino que determinan un nivel medio del mar relativo a la zona y es calculado como el valor medio del registro, así, todos los valores que estén por encima del nivel medio del mar local se llaman **sobrelevaciones** y por debajo del nivel del mar **descensos**.

La información del nivel del mar se suaviza realizando medias en ventanas móviles de tamaños específicos, para comparaciones se realizan con un tamaño de 3 meses y así, la variación trimestral queda suprimida de la serie. El suavizado de un registro es similar en ciertas características al filtrado en alguna bandapectral de interés.

La caracterización de las distribuciones de sobrelevaciones máximas y descensos máximos durante los eventos Niño y Niña se determina con un diagrama de caja y bigotes que muestre los rango intercuartílico y los percentiles 25, 50 y 75. En términos espaciales, un tipo de gráfica útil es



**Figura 3.3:** Serie en el dominio temporal y en el dominio espectral

el diagrama de Hövmoller, en él, se determinan los cambios de alguna variable respecto a una longitud o una latitud.

### 3.4. Análisis espectral

Un proceso físico puede ser descrito en el dominio del tiempo con una función  $f(t)$  dónde la variable toma un valor específico en un momento diferente. Expresar una función en estos términos no puede dar mucho información de los fenómenos que la afectan cuando el registro de la variable es muy largo y su variabilidad es alta, por lo tanto, es posible utilizar el dominio de la frecuencia, en donde el fenómeno de interés puede ser descrito por su amplitud y fase en función de la frecuencia (Fig. 3.3)

Dada la aleatoriedad de la serie meteorológica del nivel del mar, es más efectivo descomponer esta señal en frecuencias diferentes y comprender los fenómenos climáticos que pueden asociarse a cada una de ellas. Un método ampliamente usado para esta descomposición en el dominio frecuencial es la transformada de Fourier. Esta transformación matemática es el mapeo del conjunto de series sumables que componen una serie (Lund et al., 2000), si  $s$  es una serie sumable de este conjunto con una frecuencia  $\omega$ , su transformada  $\mathcal{F}\{s\}$  se define como:

$$\mathcal{F}\{s\}(\omega) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} s_j e^{-i2\pi\omega j} \quad (3-5)$$

El término  $e^{-i2\pi\omega j}$  puede escribirse como un conjunto de ondas sinusoidales de la forma,  $\cos(2\pi\omega j) - i \cdot \operatorname{sen}(2\pi\omega j)$ . Es entonces evidente, que el método hace corresponder una serie con una sumatoria de ondas.

Esta transformada a partir de una secuencia y con una duración finita se conoce mejor como Transformada Discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés), pero su rendimiento puede verse potenciado cuando se reduce el tiempo de cálculo de  $n^2$  pasos a  $n \cdot \log_2(n)$  pasos al aplicarse en subsucesiones más cortas. Este mejoramiento se convierte en la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés)

Una de las propiedades más importantes de la transformada de Fourier es la posibilidad de invertirse para cambiarse del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, esta aplicación es muy útil cuando desea conocerse el comportamiento de la variable bajo ciertas frecuencias de interés. Esta función es la transformada de Fourier inversa 3-6 y su uso es amplio de el estudio de variables oceánicas en escalas mayores al año.

$$s_j = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \mathcal{F}\{s\}(\omega) e^{i2\pi\omega j} d\omega \quad (3-6)$$

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 ( $\omega$ )

Otra propiedad útil de la transformada de Fourier es que la sumatoria total de las potencias del espectro representan la varianza total de la serie, esto es sumamente útil para la realización de los mapas de varianza de las variables espaciales que se vayan a analizar.

Con las variables espaciales se pueden construir funciones ortogonales empíricas que permitan explorar la estructura de su variabilidad de forma objetiva y analizar relaciones con otras variables.

## 3.5. Análisis de componentes principales

El objetivo de un análisis de componentes principales (ACP) es la determinación de un conjunto de funciones ortogonales empíricas que permitan la representación de un conjunto de datos  $X(x,y,t)$  en:

$$X(x,y,t) = \sum_{i=1}^M PC_i(t) \cdot EOF_i(x,y) \quad (3-7)$$

Donde:

- $PC_i$  es la componente principal i-ésima que determinan la variación de la estructura espacial en el tiempo y es ortogonal a otras PC's en el tiempo.
- $EOF_i$  es una estructura espacial obtenida a partir de los vectores propios de la matriz de covarianza y en este caso, es ortogonal en el espacio a otras EOF's.

Cada una de las PC's pueden obtenerse a partir de la proyección de la información espacial sobre cada una de las EOF's. Los conceptos de proyección y correlación están íntimamente ligados, puesto que representan el grado de similitud que tiene una información con respecto a otra, así que entre mayor sea la proyección para una PC, mayor va a ser la varianza explicada por ese componente principal. Dado que cada PC y EOF es calculada para maximizar varianza manteniendo ortogonalidad entre ellos y no para tener sentido físico, es de estricto cuidado las conclusiones que se generen a partir de ellas.

La determinación de las EOF se realiza con las matrices de covarianza o correlación. El uso de una o la otra dependerá de las condiciones que se deseen evaluar y de las variables empleadas, a continuación se explican sus diferencias:

- Matriz de correlación: Todas las variables tienen igual peso, por lo tanto, sólo importa la estructura espacial (EOF). Su uso se recomienda cuando las variables a emplear tienen diferentes unidades y cuando las varianzas de cada una de las variables difieren mucho entre sí y pueden distorsionar los resultados.
- Matriz de covarianza: En las EOF's calculadas con esta matriz se da más peso a aquellas variables que tienen mayor varianza. Su uso se recomienda cuando se quiere generar una mayor importancia sobre ciertas variables.

El cálculo computacional de la EOF, se da desde la matriz tridimensional  $M$  ( $x,y,t$ ) donde para cada tiempo  $t$  se tiene un patrón espacial. Posteriormente, se debe realizar una redistribución de los datos de la matriz  $M$  a una matriz  $A$  con dimensiones  $(t,x*y)$  donde en una dimensión está la variación temporal de un píxel y en otra todos la variación píxel a píxel.

Finalmente, el cálculo de la EOF termina con la factorización de la matriz  $A$ :

$$A = U \cdot S \cdot V^H \quad (3-8)$$

Donde  $U$  y  $V$  corresponden a los patrones espaciales y temporales obtenidos y  $S$  la varianza que aporta cada PC

## 3.6. Medidas de correlación lineal

Para determinar si la relación lineal existente entre dos variables continua es fuerte o no, se debe disponer de ciertos parámetros que cuantifiquen esta relación. Uno de estos parámetros es la covarianza, que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias.

$$\text{Covarianza muestral} = \text{Cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N - 1} \quad (3-9)$$

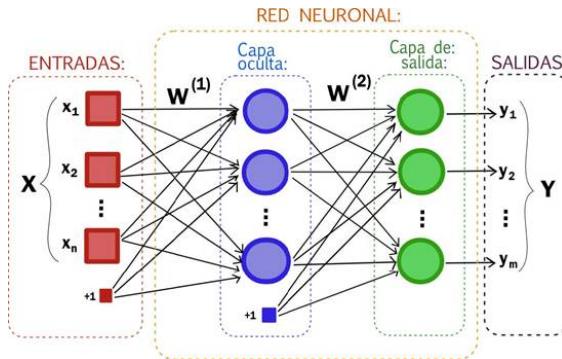
donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  representan las medias muestrales de cada variable y  $x_i$  e  $y_i$  los valores para cada una de las observaciones.

Dado que las escalas de las variables que se correlacionen pueden diferir mucho una de la otra, deben escalarse y generar lo que se conoce como coeficiente de correlación. Los valores de estos coeficientes oscilan entre -1 y +1 y entre mayor sea, mayor es la fuerza de la relación lineal proporcional o inversa entre las variables. Un coeficiente de correlación importante es el de Spearman y al ser no paramétrico, no es susceptible a la aparición de outliers.

## 3.7. Red Neuronal Artificial (RNA)

Una red neuronal artificial (RNA) se puede definir como un grafo dirigido con las siguientes restricciones (Hecht-Nielsen, 1992):

1. Los nodos se llaman elementos de proceso (EP).
2. Los enlaces se llaman conexiones y funcionan como caminos unidireccionales instantáneos
3. Cada EP puede tener cualquier número de conexiones.
4. Todas las conexiones que salgan de un EP deben tener la misma señal.
5. Los EP pueden tener memoria local.
6. Cada EP posee una función de transferencia que, en función de las entradas y la memoria local produce una señal de salida y / o altera la memoria local.
7. Las entradas a la RNA llegan del mundo exterior, mientras que sus salidas son conexiones que abandonan la RNA



**Figura 3.4:** Ejemplo de estructura de red neuronal (Tomado de Google Images)

Son ampliamente utilizadas para reconocer patrones de comportamiento y realizar modelos de predicción y están conformadas por los siguientes elementos:

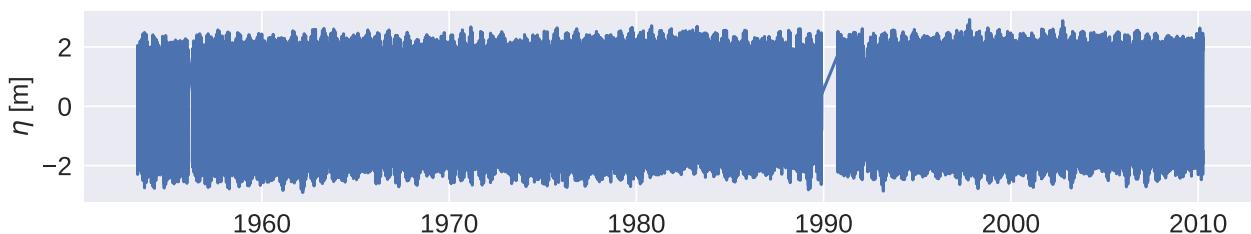
- Conjunto de vectores de entrada,  $x$  o capa de entrada: En esta capa aparece un nodo por cada variable predictora dentro del modelo de la red neuronal. Estas variables predictoras deben ser, en la mayoría de los casos, pre-procesadas para que su peso inicial sobre la red sea igual al de otras variables, esto mejorará el rendimiento. Típicamente se estandarizan y se escalan según la función de activación a emplear.
- Conjunto de capas intermedias: también son llamadas capas ocultas y se caracterizan porque no reciben ni suministran información al entorno (procesamiento interno de la red).
- Conjunto de pesos sinápticos  $w_{ij}$ : representan la interacción entre los nodos de las capas de la red neuronal, estos pesos se optimizan continuamente hasta disminuir al máximo el error de la red.
- Regla de propagación  $f(w_{ij}, x_j(t))$ : es la regla que sigue la red para la conjugación de los pesos de la red y los valores de las variables de entrada, una regla ampliamente utilizada es
- Función de activación,  $k(f(w_{ij}, x_j(t)))$ : proporciona el estado de activación de un nodo de la red neuronal, existen funciones como tangente hiperbólica, sigmoide y lineal. El uso de cada una dependerá de las variables predictoras y a predecir en la red.
- Función de salida  $F_i(t)$ : proporciona la salida  $y_i(t)$ , en función del estado de activación.

# 4 Metodología

## 4.1. Datos empleados

Los datos empleados en este estudio representan la información local del nivel del mar en la zona costera de Buenaventura y la información espacial en el Pacífico tropical, se describen a continuación:

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. El principio físico que usa un mareógrafo es la transmisión de un haz electromagnético hacia la superficie libre con una frecuencia modulada y el retorno de dicha señal bajo el efecto doppler que permite determinar 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 (of UNESCO, 2016). 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 (fig 4.1). La información está disponible en la página web [www.ioc-sealevelmonitoring.org](http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).



**Figura 4.1:** Serie de nivel del mar capturada por el mareógrafo de Buenaventura

b) Datos de reanálisis: Diferentes centros de análisis de información meteorológica y oceánica como el Centro Europeo para pronósticos meteorológicos de medio alcance y el Servicio de Monitoreo del Medio Marino de Copérnico (ECFMW y CMEMS por sus siglas en inglés

respectivamente), desarrollan y ejecutan diferentes modelos para describir la evolución espacio-temporal de variables termodinámicas como temperatura, salinidad, concentración de hielo, nivel del mar, etc. CMEAMS 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 (Fernandez and Lellouche, 2018). La resolución espacial es de  $1/12^{\circ}\text{X} 1/12^{\circ}\text{Y}$  y la resolución temporal es mensual. La región de descarga está comprendida entre  $-10^{\circ}\text{N}$  y  $10^{\circ}\text{N}$  y entre  $130^{\circ}\text{E}$  y  $-74^{\circ}\text{W}$ . La información está disponible en la página web [marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu).

## 4.2. Análisis exploratorio de los datos

Con la serie del mareógrafo, se realiza la descomposición armónica de la marea, sin embargo, al tener años con hasta 80 % de datos faltantes la herramienta T\_TIDE no estima bien la amplitud de los armónicos más importantes, así que se emplearon dos alternativas: a) el uso de los 18.6 años más completos dentro de la serie, debido al ciclo nodal lunar y b) el uso del mayor período de registro continuo (6 años). En esta última se debía extraer la información de las componentes de corto plazo para todo el registro y asumir la pérdida de información de las componentes que sólo ocurren en el largo plazo. Finalmente, ninguna de las dos generó buenas descomposiciones armónicas, y se decidió usar una herramienta más reciente, PyTides (Schuremann, 1958).

Restando la marea astronómica de la serie medida por el mareógrafo se obtiene la serie de marea residual, se calculó su valor medio para restarla a toda la serie para determinar finalmente la **serie de nivel medio del mar**

Paralelo al tratamiento de la información del mareógrafo, se determinan las series de nivel medio del mar para cada uno de los píxeles de la región donde se descargó la información espacial del nivel. El proceso empleado es similar al descrito en el párrafo anterior, la resta del valor medio a toda la serie.

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

Se grafican las sobrelevaciones y descensos del nivel del mar suavizadas en ventanas de 3 meses junto a los períodos de tiempo donde se presentaron fases cálidas y frías del ENSO según el índice ONI, esto con el objetivo de conocer su comportamiento durante esos meses. También se comparó la serie mensual del nivel del mar suavizada en ventanas de 3 meses con el valor directo del índice

Con las series de sobrelevaciones y descensos diarios del nivel se caracterizan los eventos Niño y Niña ocurridos desde 1953 hasta 2010 en términos de su duración y sobrelevación/descenso ocurrido. Dado que se presume que los aumentos/descensos del nivel del mar se pueden ver agravados por la duración de los eventos ENSO y que ondas ocánicas Kelvin con períodos de 3 meses pueden modular dichos cambios (Fedorov and Brown, 2019), los eventos Niño y Niña se clasificaron en períodos de 90-180 días, 180-360 días y mayores a 360 días.

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.

## 4.4. 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. Posteriormente se emplean análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) (Lund et al., 2000) y se selecciona 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 ONI.

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.

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

Se determina una región costera frente a la bahía de Buenaventura para predecir su serie de nivel del mar (Montagut, 2012). Su ubicación está entre  $-3.65^{\circ}\text{N}$  y  $3.85^{\circ}\text{N}$  y entre  $-77.6^{\circ}\text{W}$  y  $-77.2^{\circ}\text{W}$ , después se promedia espacialmente el nivel medio del mar para obtener una serie representativa, usada posteriormente en correlaciones con otras regiones del océano.

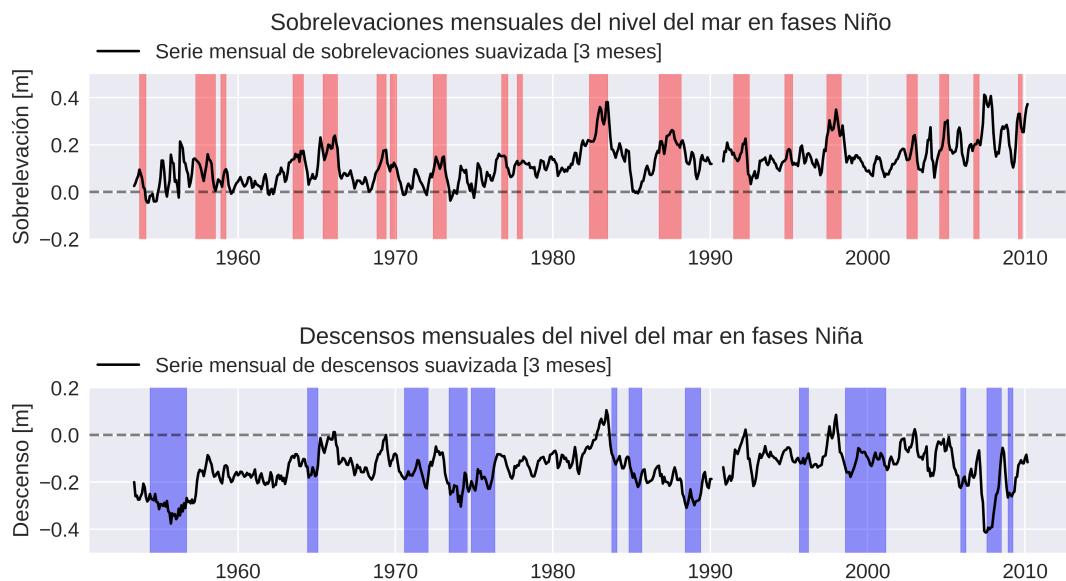
A fin de encontrar una región que permita pronosticar el comportamiento del nivel del mar en la zona costera elegida en el literal anterior, se realizan mapas para toda la región donde en cada píxel

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 dónde 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.

## 5 Resultados

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 (Fig. 5.1). En la parte superior 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*<sup>1</sup>. 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.

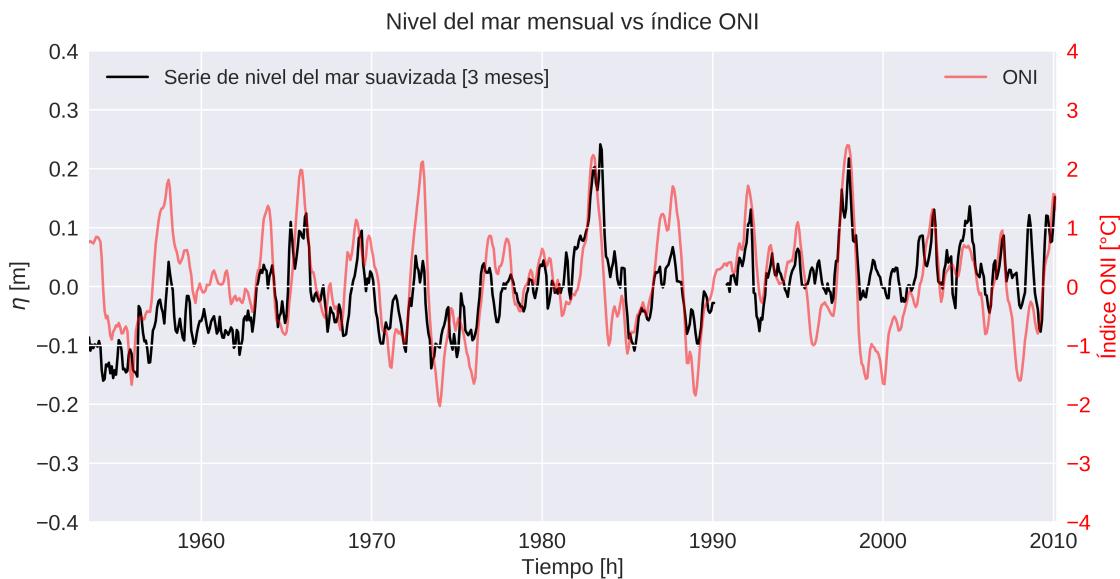


**Figura 5.1:** Sobrelevaciones y descensos mensuales del nivel del mar en la bahía de Buenaventura durante diferentes eventos ENSO. Las franjas rojas y azules representan fenómenos Niño y Niña respectivamente.

<sup>1</sup>Esto se puede consultar en la página web <https://ggweather.com/enso/onih.htm>

No en todos los meses El Niño/La 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.

Adicionalmente, en la figura 5.2 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.



**Figura 5.2:** Sobrelevaciones del nivel del mar en la bahía de Buenaventura vs índice oceánico del niño (ONI)

Las figuras 5.1 y 5.2 sugieren 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.

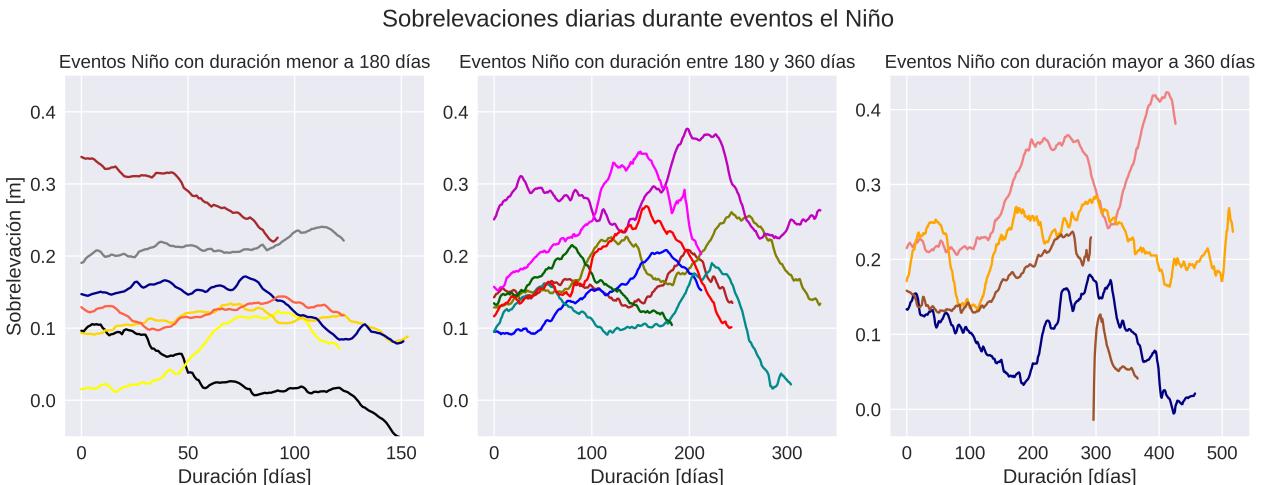
## 5.1. Caracterización de los eventos Niño y Niña

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

**Tabla 5-1:** Cantidad de eventos Niño y Niña para cada rango de duración

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

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.

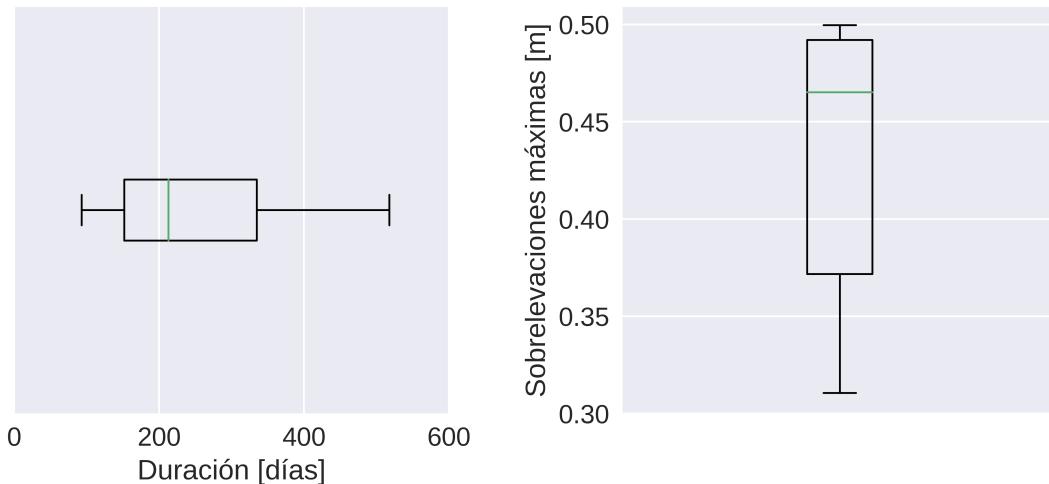
**Figura 5.3:** Sobrelevaciones del nivel del mar Bajo diferentes duraciones de eventos ENSO

- Eventos con duración entre 90 días-180 días: En este rango de duración es en 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. 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.

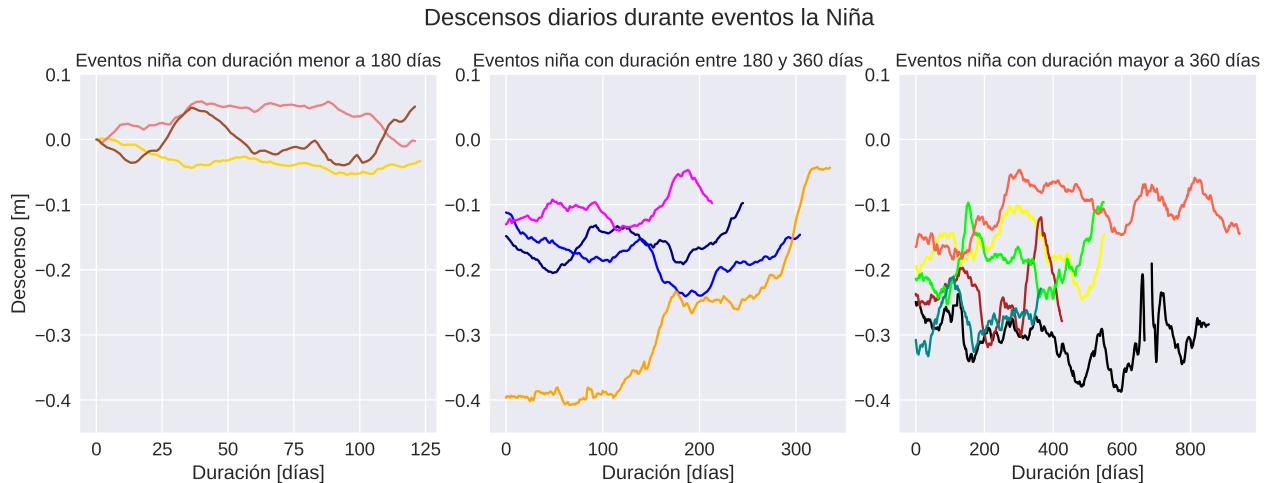
Un resumen general tanto de la duración como de las sobrelevaciones máximas que generaron estos eventos se observa a continuación:



**Figura 5.4:** Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niño desde 1953 hasta 2010

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<sup>2</sup>. 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. 5.5).

<sup>2</sup>En el archivo digital de noticias el tiempo aparece el reporte <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-273680>



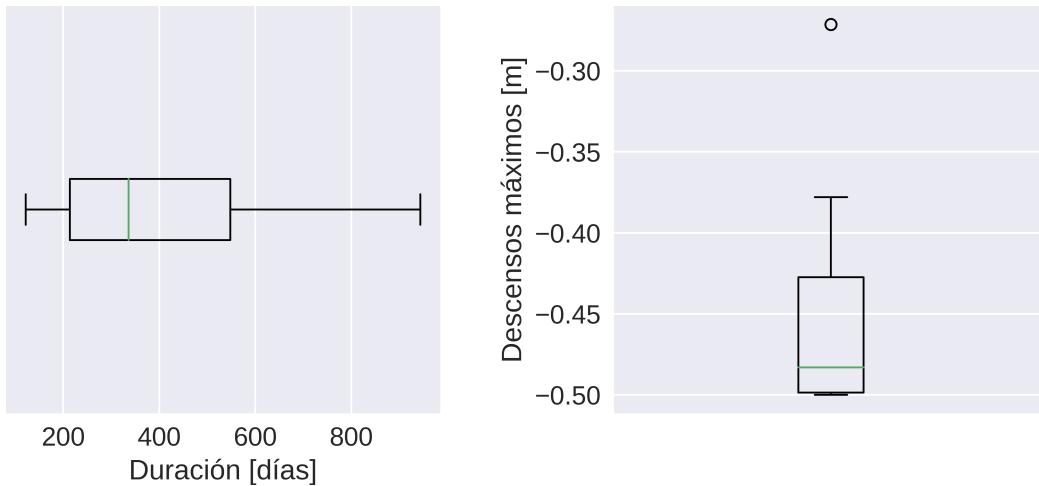
**Figura 5.5:** Descensos del nivel del mar bajo diferentes duraciones de eventos Niña

- 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.
- 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 diagramas de la figura 5.6 explican la distribución de las duraciones y de los descensos máximos ocurridos durante eventos Niña:

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 la máximas sobrelevaciones o descensos del nivel del mar no siempre se generaron



**Figura 5.6:** Diagramas de caja y bigotes para las duraciones y sobrelevaciones máximas durante los eventos Niña desde 1953 hasta 2010

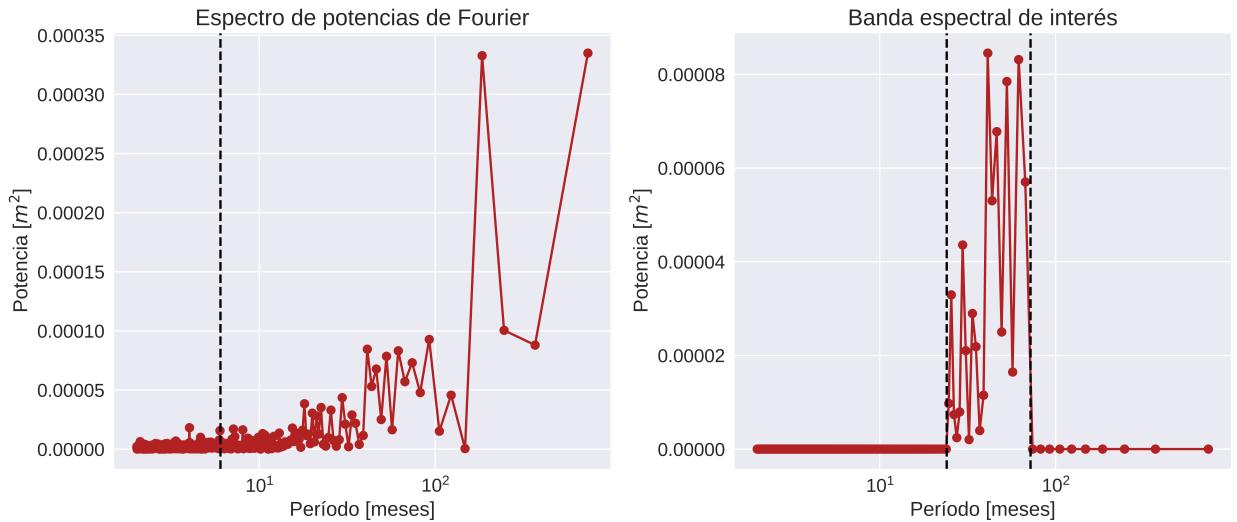
en la mitad de la duración de cada evento, inclusive en algunos eventos no se generaron sino hasta el final. Esto genera una pregunta acerca de cómo otras condiciones locales presentes, tales como los vientos, el efecto de la bahía, la época del año, entre otros, pueden modular el nivel del mar durante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

De las figuras 5.3 y 5.5 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.

## 5.2. Análisis espectral

Dado que el nivel del mar varía en diferentes escalas de tiempo y se deben identificar las componentes más importantes en el dominio de las frecuencias, se realizó el análisis espectral a la serie mensual de nivel del mar del mareógrafo

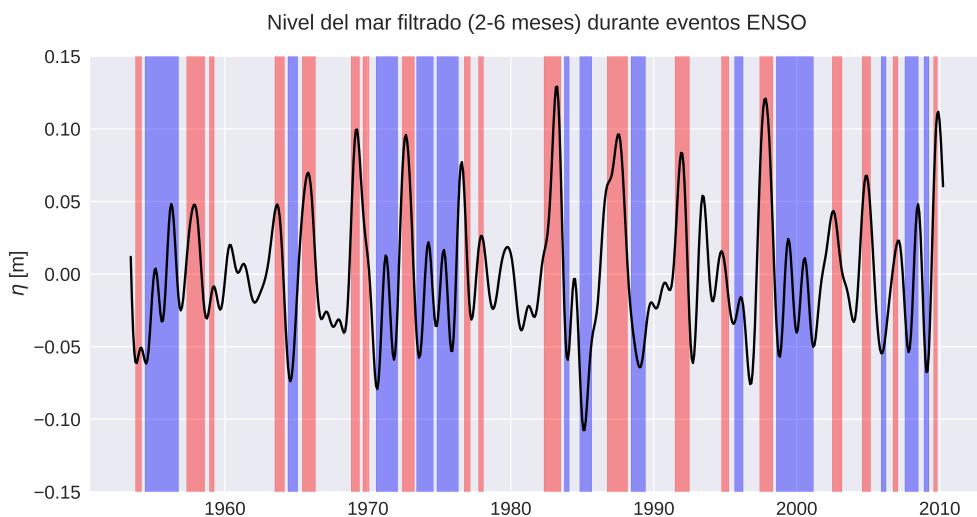
En el lado izquierdo de la figura 5.7 se muestra el espectro de potencias de Fourier, en el se puede notar que hay períodos donde hay mayor concentración de la energía, uno de estos es alrededor de 6 meses asociado al ciclo semianual, otros valores donde hay concentración de la energía están en períodos superiores a los 12 meses. El ENSO, al ser un fenómeno que sucede en la escala



**Figura 5.7:** El espectro de potencias de Fourier en el lado izquierdo de la figura y la banda espectral de interés en el lado derecho

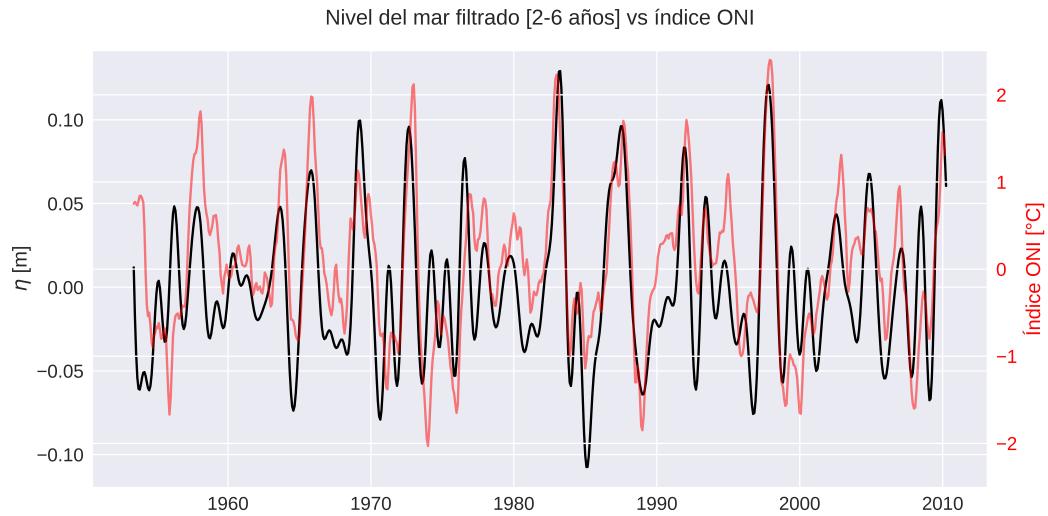
interanual, es suficiente que se estudie entre períodos de 2 y 6 años, por lo tanto, las demás potencias asociadas a otras escalas temporales no se tomaron en cuenta, como lo indica el lado derecho de la figura 5.7. La varianza en esta banda de interés explica el 23.3 % de la varianza total de la serie 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.



**Figura 5.8:** Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años

En la figura 5.8 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 (5.9) y se observaron sobrelevaciones de hasta 10 cm que coinciden con fases cálidas.



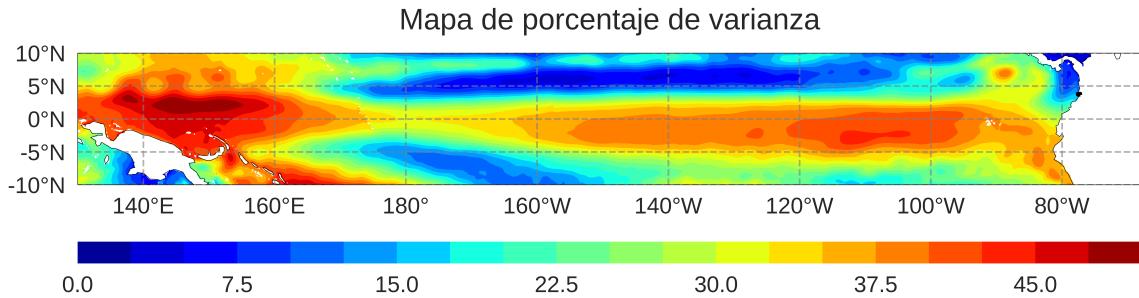
**Figura 5.9:** Serie de nivel del mar sólo con la variabilidad comprendida entre 2-6 años

### 5.3. 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.

El primer resultado en este enfoque es el porcentaje de varianza que representa la banda espectral en la que se estudia el ENSO (Fig. 5.7) 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.

En diferentes zonas como las piscina caliente y la región que abarca la lengua fría del Pacífico, la banda espectral elegida explica entre el 35 % y 50 % de la varianza total (Figura 5.10), por lo tanto, fenómenos climáticos de la escala interanual son energéticamente importantes, incluso se

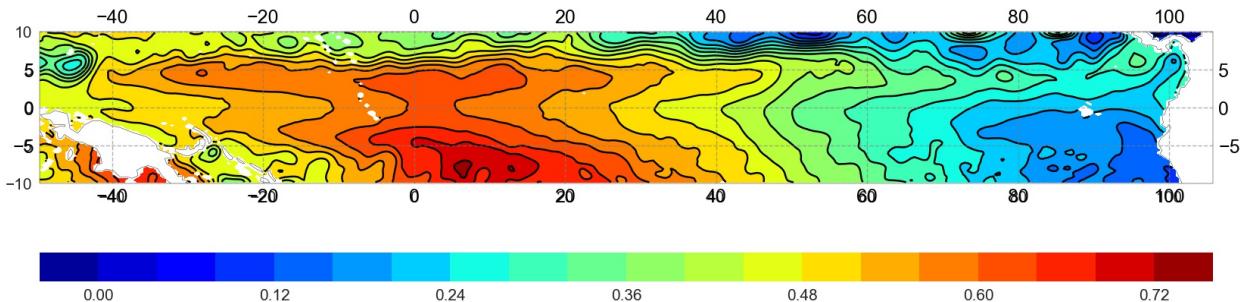


**Figura 5.10:** Mapa de porcentaje de varianza

considera al ENSO como el de mayor relevancia. En regiones más cercanas a la costa, los aportes la banda espectral puede no explicar porcentajes altos de la densidad espectral 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 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 construye una EOF que permita identificar los patrones espacio-temporales más dominantes en dicha escala. 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).

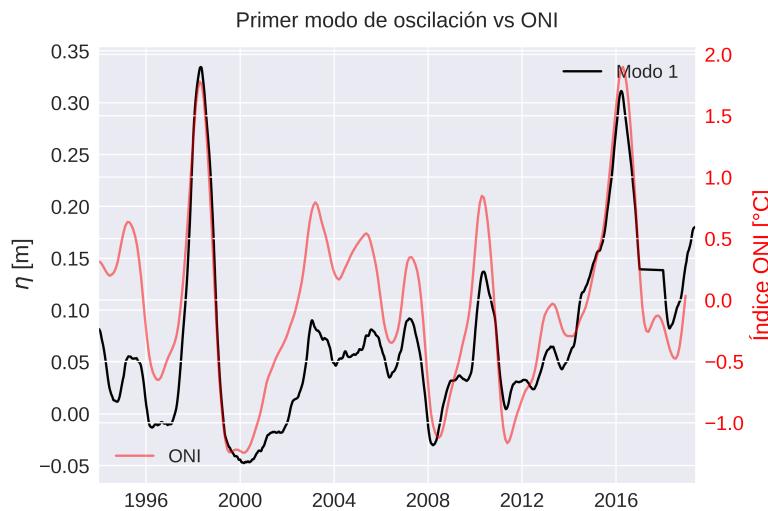
Las cuatro primeras componentes principales explican cerca del 65 % de la varianza, pero es de especial interés conocer la que más aporta junto a su respectivo modo de oscilación espacial.



**Figura 5.11:** Modo de oscilación espacial asociado a la primer componente principal

En la estructura espacial de la EOF (Fig. 5.11), 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. De igual forma sucede para el Pacífico Este, donde alrededor de la piscina caliente, el nivel del mar tiene un comportamiento similar.

La primer componente principal explica el 35 % 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. 5.1)



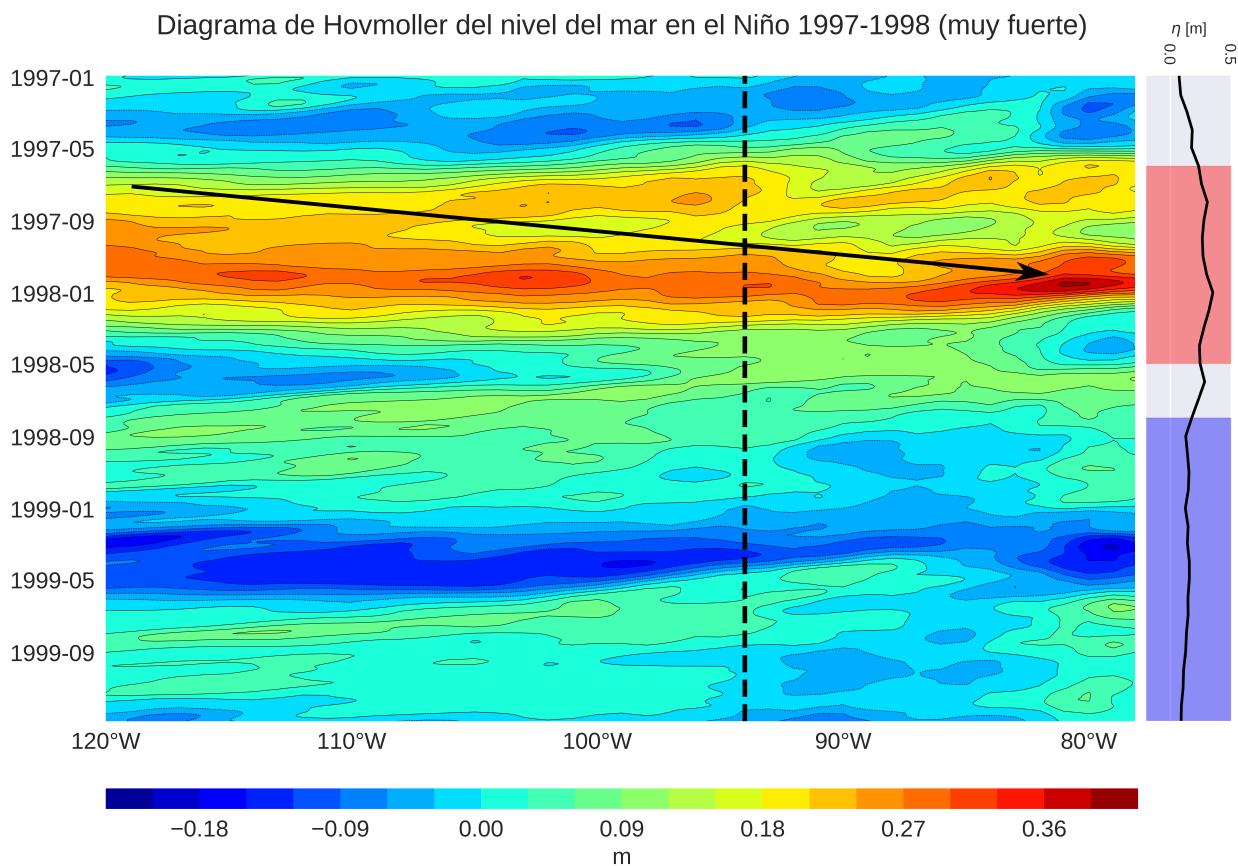
**Figura 5.12:** Comparación de la primer componente principal y el índice ONI

La figura anterior sugiere que el ENSO es el patrón espacio-temporal más dominante del nivel del mar en el Pacífico Tropical para la banda frecuencial comprendida entre los 2 y 6 años, y por lo tanto, ayuda a modular las ascensos y descensos del nivel del mar en el largo plazo.

## 5.4. 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 Hovmöller en la latitud 3.5°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°W) donde parecieron disiparse las anomalías, pero posteriormente, aumentos aún mayores

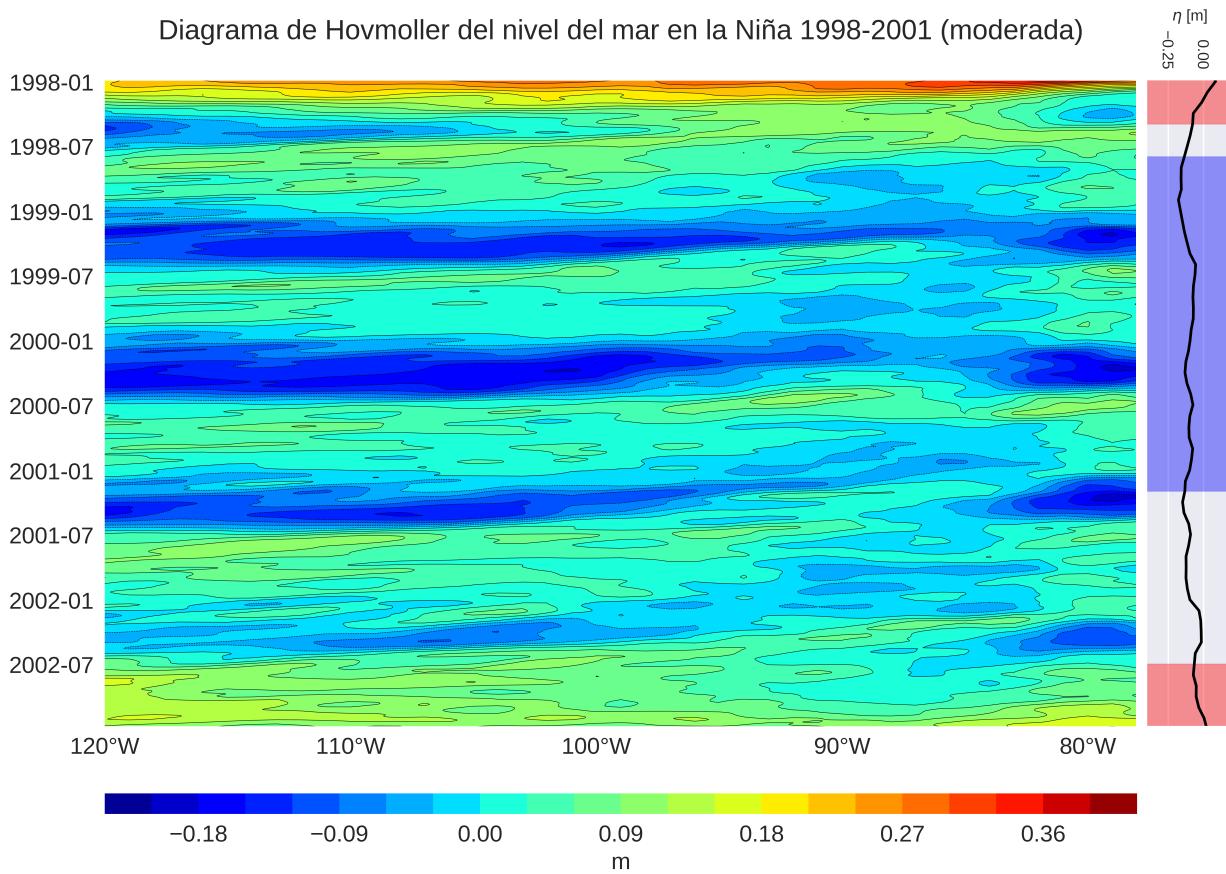
y persistentes lograron viajar mayores distancias. Lo anterior sugiere que la **persistencia** y la **intensidad** de dichas perturbaciones son factores clave para su llegada a la costa. Los valores de las anomalías son similares en magnitud a los registrados en el mareógrafo de Buenaventura (ver panel derecho en la Fig. 5.13), adicionalmente, se vieron después de los ascensos en la costa, lo que parece ser una respuesta en forma de descensos del nivel.



**Figura 5.13:** 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  $3.5^{\circ}\text{N}$  muestra como las anomalías del nivel se mantienen durante un período muy largo (evento Niña de mayor duración entre 1953 y 2010) (Fig. 5.14)

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.



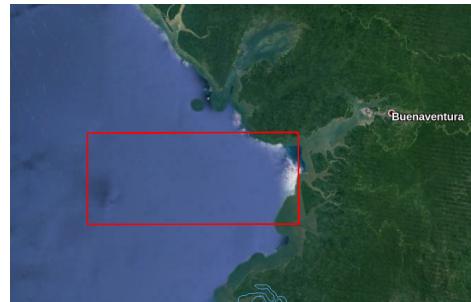
**Figura 5.14:** Diagrama de hovmoller en las longitudes para el nivel medio del mar durante la Niña (1998-2001)

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

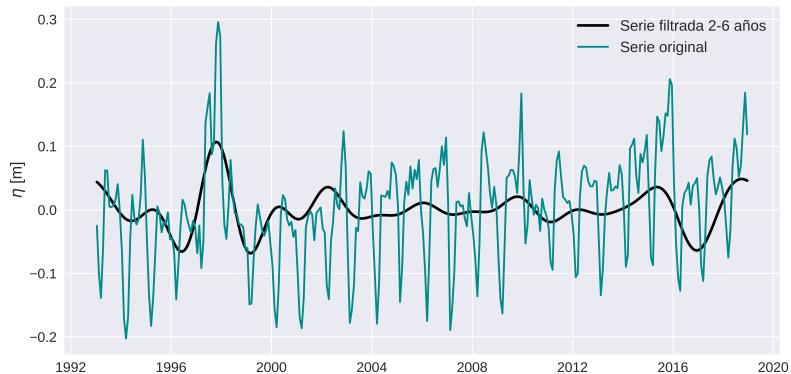
### 5.5.1. Región costera de interés

La región costera de interés seleccionada en la sección 4.5, se muestra a junto a su respectiva serie de nivel del mar promediada espacialmente

La serie de nivel del mar se filtró en la banda de interés (Fig 5.15), 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.



(a) Zona costera de interés

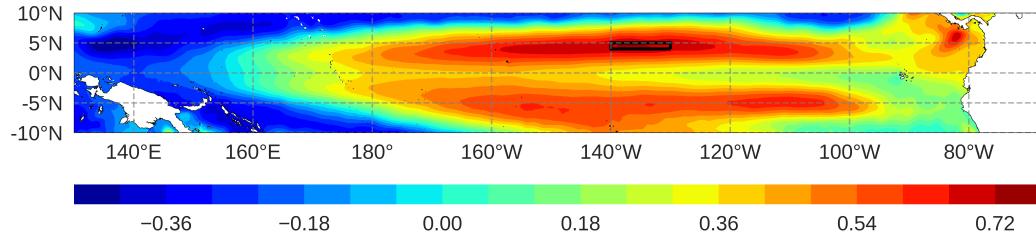


(b) Serie de nivel del mar representativa de la zona

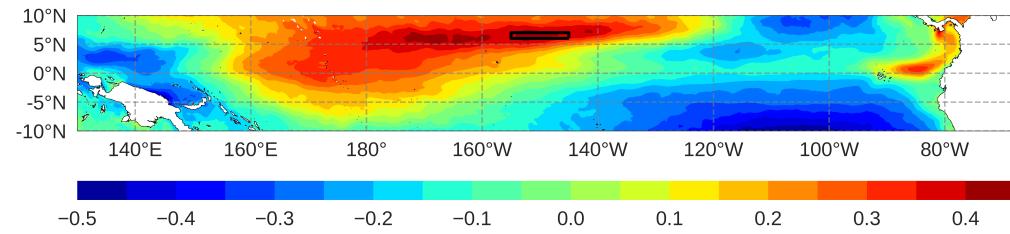
**Figura 5.15:** Selección de la zona costera de interés (panel superior) y su serie representativa del nivel del mar original y filtrada entre 2 y 6 años.

### 5.5.2. Selección de las regiones mar afuera

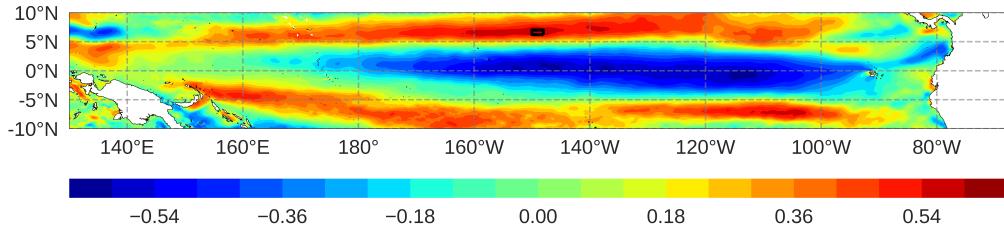
Para predecir los aumentos y descensos del nivel del mar debidos al ENSO en la zona de interés, se determinaron regiones donde las variables de nivel del mar, temperatura y velocidad de las corrientes longitudinales y latitudinales, se correlacionan en un rezago positivo con el nivel en la costa, es 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. Sí 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, se presentan los de mayor correlación en conjunto con las regiones seleccionadas para cada variable.



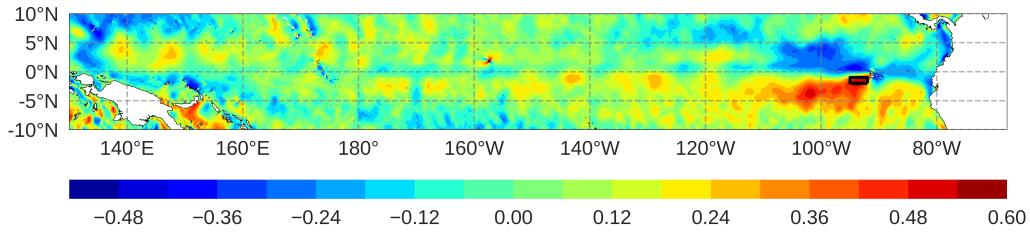
(a) Mapa de correlación de Spearman de nivel del mar con rezago +1



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



(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



(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 5.16:** Mapas de correlación de Spearman para todas las variables predictoras

Las regiones seleccionadas para determinar las series de las variables que servirán como variables predictoras se presentan a continuación:

**Tabla 5-2:** Regiones elegidas para determinar las series de las variables predictoras del nivel del mar en la costa

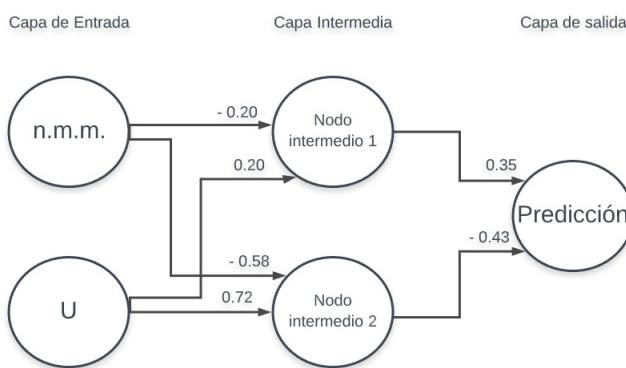
Variable	Región
Nivel del mar	4.0°N-5.0°N, 130°W - 140 °W
Temperatura	6.°N-7.0°N, 145°W - 155°W
Velocidad de las corrientes en longitud, U	6.7°N-4.0°N, 148°W - 150 °W
Velocidad de las corrientes en longitud, U	1.0°S-2.0°S, 92°W- 95 °W

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.

## 5.6. Pronóstico del nivel del mar

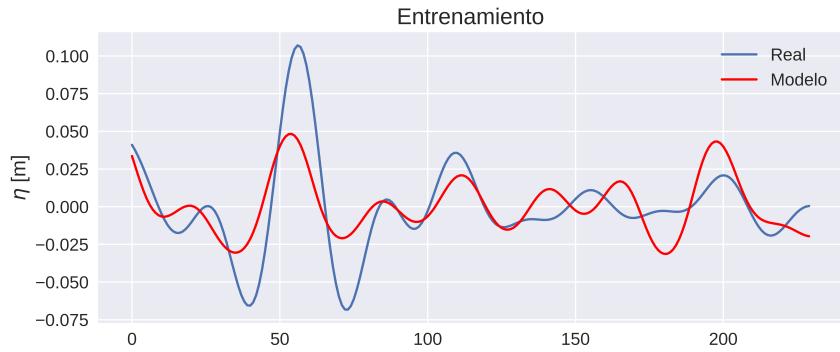
Las variables predictoras fueron pre-procesadas para optimizar las técnicas que asignan los pesos a cada unión entre nodos, este pre-procesamiento incluye el escalamiento según la función de activación.

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 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.

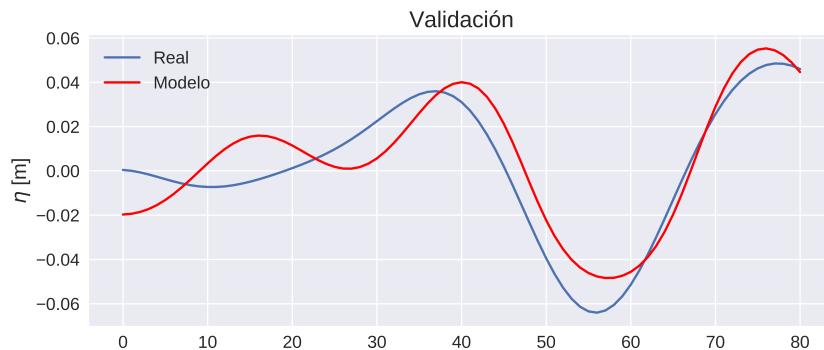


**Figura 5.17:** Estructura de la red neuronal artificial

Después del entrenamiento de la red con el 70 % de los datos (Panel superior de la fig. 5.18), 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.



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



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

**Figura 5.18:** Comportamiento de la red en el entrenamiento y en la validación

# **6 Conclusiones y recomendaciones**

## **6.1. 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 Gouirand and Moron (2003).

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.

## 6.2. Recomendaciones

Futuras investigaciones pueden involucrar el estudio y la correlación del nivel del mar con el principal forzador de la superficie libre del océano, el viento. Es posible que se determinen zonas con correlaciones rezagadas altas y suficientes para determinar una serie predictora determinante para el entrenamiento de la RNA, inclusive, puede buscarse información con registros temporales más extensos para calibrar mejor la red durante la etapa de entrenamiento y obtener mejores rendimientos durante la etapa de validación

Conocido el aporte del ENSO al nivel del mar en Buenaventura, quedan interrogantes acerca de las condiciones previas que deben existir tanto para que dichos aumentos y/o descensos se amplifiquen o sean más duraderos, como para que tengan efectos menores en la costa.

El estudio anterior puede ampliarse a otras regiones del Pacífico colombiano como el municipio de Tumaco, Nariño, donde también se han registrado aumentos súbitos del nivel mar. El modelo aplicado se debería mejorar para realizar una herramienta tecnológica que ayude a tomar decisiones rápidas para la gestión del riesgo en la costa.

# Bibliografía

- Barnard, P. L., Short, A. D., Harley, M. D., Splinter, K. D., Vitousek, S., Turner, I. L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K. R., Doria, A., Hansen, J. E., Kato, S., Kuriyama, Y., Randall-Goodwin, E., Ruggiero, P., Walker, I. J., and Heathfield, D. K. (2015). Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 8(10):801–807.
- Cayan, D. R., Bromirski, P. D., Hayhoe, K., and Tyree, M. (2008). Climate change projections of sea level extremes along the California coast. 87:57–73.
- Cazenave, A., Dieng, H.-b., Meyssignac, B., Schuckmann, K. V., Decharme, B., and Berthier, E. (2014). The rate of sea-level rise. 4(May):358–361.
- Cazenave, A., Henry, O., Munier, S., Delcroix, T., Gordon, A. L., Meyssignac, B., Llovel, W., Palanisamy, H., and Becker, M. (2012). Estimating ENSO Influence on the Global Mean Sea Level, 1993-2010. *Marine Geodesy*, 35(SUPPL. 1):82–97.
- Cazenave, A., Lombard, A., and Llovel, W. (2008). Present-day sea level rise: A synthesis. *Comptes Rendus - Geoscience*, 340(11):761–770.
- Chang, Y.-t., Du, L., Zhang, S.-w., and Huang, P.-f. (2013). Sea level variations in the tropical Pacific Ocean during two types of recent El Niño events. *Global and Planetary Change*, 108:119–127.
- Church, J. A. and Gregory, J. M. (2019). Sea level change. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, pages 493–499.
- Correa, I. D. and Gonzalez, J. L. (2000). Coastal erosion and village relocation : a Colombian case study. 43:51–64.
- Delcroix, T., Boulanger, J.-p., Masia, F., and Menkes, C. (1994). Geosat-derived sea level and surface current anomalies in the equatorial Pacific during the 1986-1989 El Niño and La Niña. 99(94).
- Dronkers, J. J. (1975). *Tidal Theory and Computations.*, volume 10. ACADEMIC PRESS, INC.
- Fedorov, A. V. and Brown, J. N. (2019). Equatorial waves. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, (2005):606–621.

- Fernandez, E. and Lellouche, J. M. (2018). Product User Manual for the Global Ocean Physical Reanalysis Product GLORYS12V1. *Copernicus Product User Manual*, 4(April):1–15.
- Gill, A. E. (1983). An Estimation of Sea-Level and Surface-Current Anomalies during the 1972 El Niño and Consequent Thermal Effects.
- Gouirand, I. and Moron, V. (2003). VARIABILITY OF THE IMPACT OF EL NIÑO – SOUTHERN OSCILLATION ON SEA-LEVEL PRESSURE ANOMALIES OVER THE NORTH ATLANTIC IN. 1566:1549–1566.
- Hecht-Nielsen, R. (1992). *Theory of the Backpropagation Neural Network\*\*Based on “nonindent” by Robert Hecht-Nielsen, which appeared in Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 1, 593–611, June 1989. © 1989 IEEE.* Number June 1989. Academic Press, Inc.
- Jesús, L. and Díaz, O. (2005). Aplicación de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional para Describir las Corrientes y la Propagación de la Onda de Marea en la Bahía de Buenaventura g. (12):9–21.
- Lombard, A., Cazenave, A., Le Traon, P. Y., and Ishii, M. (2005). Contribution of thermal expansion to present-day sea-level change revisited. *Global and Planetary Change*, 47(1):1–16.
- Lund, R. B., von Storch, H., and Zwiers, F. W. (2000). Statistical Analysis in Climate Research. *Journal of the American Statistical Association*, 95(452):1375.
- Málikov, I. (2010). Régimen De La Marea En Diferentes Puntos De Las Costas Colombianas. *Ideam*, 64(6):21.
- Molares Babra, R. J. (2004). Clasificación e identificación de las componentes de marea del Caribe colombiano. *Boletín Científico CIOH*, (22):105–114.
- Montagut, E. A. (2012). Zona costera en Colombia, qué es? *Articulo Boletín Acinpa “Avante”*, page 7.
- of UNESCO, I. O. C. (2016). Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, Volume V: Radar Gauges. *IOC Manuals and Guides No.14, vol. V*, 5(89):104.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., and Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE \$. 28:929–937.
- Schuremann, P. (1958). Manual of harmonic analysis and prediction of tides.
- Soumya, M., Vethamony, P., and Tkalich, P. (2015). Inter-annual sea level variability in the southern South China Sea. *Global and Planetary Change*, 133:17–26.

- Valle-Levinson, A., Dutton, A., and Martin, J. B. (2017). Spatial and temporal variability of sea level rise hot spots over the eastern United States. *Geophysical Research Letters*, 44(15):7876–7882.
- Wang, L., Li, Q., Mao, X.-z., Bi, H., and Yin, P. (2018). Interannual sea level variability in the Pearl River Estuary and its response to El Niño – Southern Oscillation. *Global and Planetary Change*, 162(January):163–174.
- Zhang, X. and Church, J. A. (2012). Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 39(21):1–8.