



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# **DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO DE UNA OBRA COSTERA**

**Javiera Paz Mora González**

Marzo 2018



# **APROBACIÓN**

## **DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO DE UNA OBRA COSTERA**

**Javiera Paz Mora González**

### **COMISIÓN REVISORA**

### **NOTA**

### **FIRMA**

PATRICIO WINCKLER GREZ  
Profesor guía

---

---

CLAUDIO HERNÁNDEZ TORO  
Docente

---

---

MAURICIO MOLINA PEREIRA  
Docente

---

---



## **DECLARACIÓN**

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

---

Javiera Mora González

Alumna

---

Patricio Winckler Grez

Profesor guía



*Dedicado a:  
Mis padres, hermanas y nina.*

*Agradecimientos a:*

*Mis amados padres, por su apoyo y amor incondicional.*

*Magaly, mi madre, por enseñarme a ser una mujer fuerte y luchadora.  
Roberto, mi padre, por ser el roble en quien siempre me podré apoyar.*

*Muri y pollo por siempre estar ahí, “porque si faltara uno el otro  
pierde su belleza”.*

*A mis abuelos y nina, que siempre están y estarán  
en mis recuerdos.*

*A Rick Rick por los cafés compartidos, su paciencia y su ayuda.*

*Gussy, enano y Naldito por siempre confiar en mí y  
darme su apoyo.*

*A mis cotitas, vice y seba, por hacer estos años de  
Universidad inolvidables.*

*A cone, gorsda, uli, xino y flako, por los momentos de desestrés.*

*A Pintish y Naty por llegar a mi vida.*

*A mi profesor guía, Patricio Winckler, quien durante todo el proceso de desarrollo de  
esta memoria de título me motivo a seguir avanzando.*

*Y, por último, pero no menos importante a todos quienes contribuyeron con la realización  
de este proyecto de título: Carlos Cofré (Universidad Técnica Federico Santa María),  
Felipe Maldonado, Pablo Abarca y Rodrigo Campos (Universidad de Valparaíso).*





# **CONTENIDO**

RESUMEN .....	XVIII
<b>1 INTRODUCCIÓN: PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS Y ALCANCES.....</b>	<b>3</b>
2.1 OBJETIVOS.....	3
2.2 ALCANCES .....	3
<b>3 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
3.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	4
3.2 PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO .....	5
3.3 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS .....	6
3.4 ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN.....	7
3.5 EL OLEAJE .....	9
3.5.1 DEFINICIÓN DEL OLEAJE .....	9
3.5.2 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN .....	10
3.5.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE .....	12
3.5.4 ESTADO DE MAR.....	14
3.5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE .....	15
3.6 MAREAS .....	17
3.6.1 MAREA ASTRONÓMICA .....	18
3.6.2 MAREA METEOROLÓGICA .....	19
3.7 OBRAS COSTERAS.....	20
3.7.1 ROMPEOLAS VERTICALES .....	20
3.7.2 ROMPEOLAS EN TALUD .....	21
3.7.3 ROMPEOLAS MIXTOS.....	22
<b>4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>24</b>
4.1 RECOLECCIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES .....	25
4.1.1 PROYECCIONES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE.....	25
4.1.2 BATIMETRÍA.....	33
4.1.3 PROPAGACIÓN DE OLEAJE.....	36
4.1.4 CLIMA EXTREMO.....	41
4.1.5 CLIMA MEDIO .....	45
4.1.6 WAVE SETUP DEL OLEAJE .....	47
4.1.7 MAREA ASTRONÓMICA .....	48
4.1.8 MAREA METEOROLÓGICA .....	50
4.1.9 NIVEL MEDIO DEL MAR.....	52
4.2 DISEÑO DE ROMPEOLAS EN TALUD: CORRELACIÓN DE VARIABLES .....	54
4.2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	54
4.2.2 CRITERIOS DE DISEÑO.....	55
4.2.3 NIVEL DE DISEÑO .....	57
4.2.4 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD .....	59
<b>5 RESULTADOS: CARÁCTER PREDICTIVO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>65</b>
5.1.1 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD RCP 4.5 Y RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO .....	65
5.1.2 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD RCP 4.5 Y RCP 8.5 FINALES DE SIGLO .....	67
5.1.3 COSTOS DE LOS ROMPEOLAS EN TALUD .....	71
5.1.4 PLANOS DE LOS ROMPEOLAS EN TALUD .....	72

<b>6</b>	<b>DISCUSIONES</b> .....	<b>76</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>82</b>
<b>9</b>	<b>GLOSARIO</b> .....	<b>86</b>
<b>10</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>92</b>
<b>11</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>98</b>
11.1	PROYECCIONES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE.....	98
11.2	CLIMA EXTREMO .....	103
11.3	CLIMA MEDIO.....	113
11.4	MAREA ASTRONÓMICA.....	118
11.5	IMPULSORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....	119
11.5.1	FORZAMIENTO RADIATIVO DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	120
11.5.2	FORZAMIENTO RADIATIVO DERIVADO DE LOS AEROSOLES ANTROPÓGENOS.....	121
11.5.3	FORZAMIENTO RADIATIVO DEBIDO LOS CAMBIOS EN LA SUPERFICIE TERRESTRE .....	122
11.5.4	FORZAMIENTO RADIATIVO DERIVADO DE LOS IMPULSORES NATURALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....	122
11.6	CICLO DEL DIÓXIDO DE CARBONO.....	123
11.7	RETROALIMENTACIONES DEL CLIMA .....	124
11.8	CRONOGRAMA DE LAS NEGOCIACIONES E HITOS IMPORTANTES REFERENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO .....	125
11.9	VARIACIONES OBSERVADAS A NIVEL MUNDIAL DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	127
11.9.1	CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR .....	127
11.9.2	CAMBIOS EN LOS VALORES EXTREMOS DE LOS OCÉANOS .....	130
11.10	VARIACIONES OBSERVADAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO	130
11.10.1	NIVEL MEDIO DEL MAR .....	130
11.10.2	OLEAJE.....	131
11.10.3	MAREA ASTRONÓMICA.....	135
11.10.4	MAREA METEOROLÓGICA.....	137
11.11	PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL MUNDIAL .....	138
11.11.1	PROYECCIONES EN LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR .....	138
11.11.2	PROYECCIONES DE LA VARIACIÓN DE LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL DEL MAR Y DE LAS OLAS	142
11.12	PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE .....	142
11.12.1	NIVEL DEL MAR .....	142
11.12.2	OLEAJE.....	146
11.12.3	EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE.....	152
11.13	COMPARACIÓN DE LAS PROYECCIONES DEL IPCC ANTERIORES AL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN CON LAS OBSERVACIONES.....	155
11.14	ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO .....	157
11.14.1	ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNDO .....	157
11.14.2	ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE .....	158

## **LISTA DE TABLAS**

TABLA 1: PRINCIPALES COMPONENTES DE LA MAREA ASTRONÓMICA.....	19
TABLA 2: MODELOS DE INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA. ....	24
TABLA 3: MODELOS CMIP UTILIZADOS EN LAS PROYECCIONES DE OLEAJE.....	25
TABLA 4: CLASIFICACIÓN DE LOS MCGS. ....	27
TABLA 5: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE DATOS HISTÓRICOS Y PROYECCIONES DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLEAJE. ....	42
TABLA 6: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS HISTÓRICOS Y PROYECCIONES DEL PERIODO <i>PEAK</i> DEL OLEAJE.....	42
TABLA 7: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS HISTÓRICOS Y PROYECCIONES DE LA DIRECCIÓN <i>PEAK</i> DEL OLEAJE.....	42
TABLA 8: ALTURA SIGNIFICATIVA DE EVENTOS EXTREMOS. ....	43
TABLA 9: PERIODO DE OLAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	43
TABLA 10: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	48
TABLA 11: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	48
TABLA 12: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 4.5 FINALES DE SIGLO. ....	48
TABLA 13: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 8.5 FINALES DE SIGLO. ....	48
TABLA 14: ANÁLISIS DE VALORES NO ARMÓNICOS DE LA MAREA .....	50
TABLA 15: EVENTOS EXTREMOS DE MAREA METEOROLÓGICA [M] CON DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	51
TABLA 16: NIVEL DEL MAR Y NIVEL DEL MAR RELATIVO PARA EL AÑO 2040 .....	52
TABLA 17: VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS E INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO. ....	56
TABLA 18: RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES. ....	57
TABLA 19: INTERPOLACIÓN MAREA METEOROLÓGICA. ....	58
TABLA 20: INTERPOLACIÓN <i>WAVE SETUP</i> .....	59
TABLA 21: RESUMEN PARÁMETROS DEL NIVEL DE DISEÑO. ....	59
TABLA 22: VALORES SUGERIDOS PARA EL COEFICIENTE DE ESTABILIDAD. ....	62
TABLA 23: VALORES PARA EL ÁREA RELATIVA EROSIONADA.....	63
TABLA 24: PARÁMETROS Y RESULTADOS DISEÑO ROMPEOLAS RCP 4.5 Y 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	66
TABLA 25: PARÁMETROS Y RESULTADOS DISEÑO ROMPEOLAS RCP 4.5 Y 8.5 FINALES DE SIGLO. ....	68
TABLA 26: DISEÑO DE LOS ROMPEOLAS CON TALUD 1:2 DE LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE FINALES Y MEDIADOS. ....	70
TABLA 27: PESOS ACTUALES [TN] DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN ROMPEOLAS DE AVENIDA PERÚ. ...	71
TABLA 28: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DATOS HISTÓRICOS.....	98
TABLA 29: PERIODOS Y DIRECCIONES DATOS HISTÓRICOS. ....	98
TABLA 30: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ..	99
TABLA 31: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	99
TABLA 32: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ..	99
TABLA 33: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	100
TABLA 34: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	100
TABLA 35: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO. ....	100
TABLA 36: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	101
TABLA 37: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO. ....	101
TABLA 38: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE DATOS HISTÓRICOS. ....	103
TABLA 39: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	107
TABLA 40: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	108
TABLA 41: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	109
TABLA 42: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	110
TABLA 43: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES SET DE DATOS HISTÓRICOS. ....	113
TABLA 44: PERIODOS Y DIRECCIONES SET DE DATOS HISTÓRICOS. ....	113
TABLA 45: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	113
TABLA 46: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	114
TABLA 47: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	114

TABLA 48: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	114
TABLA 49: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	114
TABLA 50: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO. ....	115
TABLA 51: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	115
TABLA 52: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO. ....	115
TABLA 53: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS DATOS HISTÓRICOS. ....	116
TABLA 54: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	116
TABLA 55: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	117
TABLA 56: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 4.5 FINALES DE SIGLO. ....	117
TABLA 57: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 8.5 FINALES DE SIGLO. ....	118
TABLA 58: VARIACIÓN ANUAL DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN CHILE. ....	131
TABLA 59: PROYECCIÓN DE LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA MEDIA GLOBAL DEL AIRE EN SUPERFICIE Y DE LA ELEVACIÓN MEDIA MUNDIAL DEL NIVEL DEL MAR PARA EL PERÍODO 2081-2100. ....	141
TABLA 60: VARIACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE SUPERAR EN 0.5 METROS EL CAMBIO DE Hs12 RESPECTO AL VALOR DE 2010. ....	148
TABLA 61: EVOLUCIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE 50 AÑOS DE ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA PARA LOS AÑOS 2040 Y 2070. ....	154

# **LISTA DE ILUSTRACIONES**

ILUSTRACIÓN 1: PROYECCIONES Y DATOS HISTÓRICOS DEL FORZAMIENTO RADIATIVO ANTROPOGÉNICO TOTAL MEDIDO EN $[W/M^2]$ RELATIVO A LA ERA PRE-INDUSTRIAL (APROXIMADAMENTE 1765).....	7
ILUSTRACIÓN 2: OPCIÓN DE ADAPTACIÓN: DISMINUCIÓN DE LA PENDIENTE DEL MANTO EXTERIOR.....	8
ILUSTRACIÓN 3: OPCIÓN DE ADAPTACIÓN: RECRECIMIENTO DEL PARAPETO.....	8
ILUSTRACIÓN 4: OPCIÓN DE ADAPTACIÓN: NUEVA BERMA.....	8
ILUSTRACIÓN 5: PARÁMETROS DEL OLEAJE.....	9
ILUSTRACIÓN 6: CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE SEGÚN LA FRECUENCIA Y LA FUERZA GENERADORA.....	10
ILUSTRACIÓN 7: GENERACIÓN DEL OLEAJE.....	11
ILUSTRACIÓN 8: PROFUNDIDAD RELATIVA.....	11
ILUSTRACIÓN 9: <i>SHOALING</i> O ASOMERAMIENTO.....	12
ILUSTRACIÓN 10: DIFRACCIÓN Y REFLEXIÓN.....	12
ILUSTRACIÓN 11: RANGO DE PROFUNDIDADES VÁLIDAS PARA DIFERENTES MODELOS HIDRODINÁMICOS....	14
ILUSTRACIÓN 12: REGISTRO DE UN ESTADO DE MAR.....	15
ILUSTRACIÓN 13: SELECCIÓN DE DATOS EXTREMOS.....	16
ILUSTRACIÓN 14: PRINCIPALES PLANOS DE REFERENCIA DE LA MAREA.....	18
ILUSTRACIÓN 15: FENÓMENO DE LA MAREA ASTRONÓMICA.....	18
ILUSTRACIÓN 16: PARTES DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	20
ILUSTRACIÓN 17: ROMPEOLAS VERTICAL.....	21
ILUSTRACIÓN 18: MODOS DE FALLO DE UN ROMPEOLAS VERTICAL.....	21
ILUSTRACIÓN 19: ROMPEOLAS EN TALUD.....	22
ILUSTRACIÓN 20: ROMPEOLAS MIXTO.....	23
ILUSTRACIÓN 21: SUBREGIONES DEL OCÉANO GLOBAL: TROPICAL NORTH INDIAN (TNIO), TROPICAL WESTERN NORTH PACIFIC (TWNP), TROPICAL EASTERN NORTH PACIFIC (TENP), TROPICAL NORTH ATLANTIC (TNAO), TROPICAL SOUTH INDIAN (TSIO), TROPICAL WESTERN SOUTH PACIFIC (TWSP), TROPICAL EASTERN SOUTH PACIFIC (TESP), TROPICAL SOUTH ATLANTIC (TSAO), EXTRATROPICAL NORTH PACIFIC (ETNP), EXTRATROPICAL NORTH ATLANTIC (ETNA), EXTRATROPICAL SOUTH INDIAN (ETSI), EXTRATROPICAL SOUTH PACIFIC (ETSP) Y EXTRATROPICAL SOUTH ATLANTIC (ETSA).....	26
ILUSTRACIÓN 22: NODOS DE EXTRACCIÓN DE SETS DE PROYECCIONES Y SET DE DATOS HISTÓRICOS.....	27
ILUSTRACIÓN 23: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA HISTÓRICOS.....	28
ILUSTRACIÓN 24: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	29
ILUSTRACIÓN 25: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	30
ILUSTRACIÓN 26: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	31
ILUSTRACIÓN 27: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	32
ILUSTRACIÓN 28: CARTAS NÁUTICAS ELECTRÓNICAS.....	34
ILUSTRACIÓN 29: A) SONDAJES GRILLA MENOR RESOLUCIÓN Y B) MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	35
ILUSTRACIÓN 30: GRILLAS DE CÁLCULO.....	36
ILUSTRACIÓN 31: POSICIÓN DE LOS NODOS DE CONTROL.....	37
ILUSTRACIÓN 32: PROPAGACIÓN ALTURA UNITARIA, PERIODO 13 [s] Y DIRECCIÓN W.....	38
ILUSTRACIÓN 33: PROPAGACIÓN ALTURA UNITARIA, PERIODO 16 [s] Y DIRECCIÓN NW.....	39
ILUSTRACIÓN 34: DIRECCIÓN DEL OLEAJE, PROFUNDIDAD 10 [M].....	40
ILUSTRACIÓN 35: DIRECCIÓN DEL OLEAJE, PROFUNDIDAD 20 [M].....	40
ILUSTRACIÓN 36: COEFICIENTES DE AGITACIÓN, PROFUNDIDAD 10 [M].....	40
ILUSTRACIÓN 37: COEFICIENTES DE AGITACIÓN, PROFUNDIDAD 20 [M].....	41
ILUSTRACIÓN 38: ALTURA SIGNIFICATIVA DE EVENTOS EXTREMOS.....	43
ILUSTRACIÓN 39: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	44
ILUSTRACIÓN 40: DIRECCIÓN DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	44
ILUSTRACIÓN 41: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE SET DE DATOS HISTÓRICOS.....	45

ILUSTRACIÓN 42: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	45
ILUSTRACIÓN 43: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ....	46
ILUSTRACIÓN 44: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	46
ILUSTRACIÓN 45: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	46
ILUSTRACIÓN 46: ESTUDIO DE MAREA ASTRONÓMICA.....	49
ILUSTRACIÓN 47: FRECUENCIA ACUMULADA [%] DE RANGOS DE LA MAREA.....	50
ILUSTRACIÓN 48: TENDENCIA MEDIA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN EL PERIODO 2040-2070. ....	52
ILUSTRACIÓN 49: TENDENCIA MEDIA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO EN EL PERIODO 2040- 2070. ...	53
ILUSTRACIÓN 50: VALOR MEDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN EL AÑO 2070. ....	53
ILUSTRACIÓN 51: VALOR MEDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO EN EL AÑO 2070.....	54
ILUSTRACIÓN 52: UBICACIÓN ÁREA DE ESTUDIO. ....	55
ILUSTRACIÓN 53: COEFICIENTE DE <i>SHOALING</i> .....	60
ILUSTRACIÓN 54: COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD TEÓRICA.....	62
ILUSTRACIÓN 55: PESO DE LOS ELEMENTOS DEL NÚCLEO, FILTRO Y CORAZA DE UN ROMPEOLAS EN TALUD. .....	63
ILUSTRACIÓN 56: VALORES DEL CAUDAL MÁXIMO ADMISIBLE. ....	64
ILUSTRACIÓN 57: DEFINICIONES GEOMÉTRICAS ROMPEOLAS EN TALUD.....	65
ILUSTRACIÓN 58: COMPARACIÓN DE DISEÑOS ROMPEOLAS CON DISTINTOS TALUDES PARA LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE MEDIADOS DE SIGLO. ....	67
ILUSTRACIÓN 59: COMPARACIÓN DE DISEÑOS ROMPEOLAS CON DISTINTOS TALUDES PARA LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE FINALES DE SIGLO. ....	69
ILUSTRACIÓN 60: COMPARACIÓN DE LOS PESOS DE LOS ELEMENTOS DE CORAZA DE LOS ROMPEOLAS CON TALUD 1:2 DISEÑADOS BAJO LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE FINAL Y MEDIADOS DE SIGLO. ....	70
ILUSTRACIÓN 61: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 4.5 DE MEDIADOS DE SIGLO. ....	72
ILUSTRACIÓN 62: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 8.5 DE MEDIADOS DE SIGLO. ....	73
ILUSTRACIÓN 63: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 4.5 DE FINALES DE SIGLO. ....	74
ILUSTRACIÓN 64: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 8.5 DE FINALES DE SIGLO. ....	75
ILUSTRACIÓN 65: COMPARACIÓN DE Hs [M] HISTÓRICAS DE DISTINTOS AUTORES. ....	77
ILUSTRACIÓN 66: COMPARACIÓN DE Hs [M] PROYECTADAS DE DISTINTOS AUTORES.....	78
ILUSTRACIÓN 67: COMPARACIÓN VALORES EXTREMOS. ....	79
ILUSTRACIÓN 68: COMPARACIÓN VALORES EXTREMOS CON INTERVALOS DE CONFIANZA.....	79
ILUSTRACIÓN 69: SERIE DE TIEMPO DE EXTREMOS.....	81
ILUSTRACIÓN 70: REPRESENTACIÓN DEL NIVEL DE ACUERDO, EVIDENCIA Y CONFIANZA. ....	88
ILUSTRACIÓN 71: ESTRUCTURA DE UNA RED NEURONAL COMPETITIVA. ....	90
ILUSTRACIÓN 72: TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY SOBRE UN CONJUNTO DE 10 PUNTOS.....	90
ILUSTRACIÓN 73: SETS DE PROYECCIONES. ....	102
ILUSTRACIÓN 74: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. .....	111
ILUSTRACIÓN 75: DIRECCIONES DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	111
ILUSTRACIÓN 76: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. .....	111
ILUSTRACIÓN 77: DIRECCIONES DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	112
ILUSTRACIÓN 78: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 8.5 FINALES DE SIGLO. 112	112
ILUSTRACIÓN 79: DIRECCIONES DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE CLIMA EXTREMOS RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	112
ILUSTRACIÓN 80: NIVEL DE MAREA OBSERVADA.....	118
ILUSTRACIÓN 81: NIVEL DE MAREA PRONOSTICADA. ....	119
ILUSTRACIÓN 82: MAREA METEOROLÓGICA. ....	119
ILUSTRACIÓN 83: ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL CICLO DEL CARBONO GLOBAL.....	123
ILUSTRACIÓN 84: CONTRIBUCIONES OBSERVADAS EN EL NIVEL DEL MAR.....	129
ILUSTRACIÓN 85: MAPA DE LAS TASAS DE CAMBIO DEL NIVEL DEL MAR GEOCÉNTRICO DURANTE EL PERÍODO 1993-2012. ....	130

ILUSTRACIÓN 86: ESTACIONALIDAD DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA AMÉRICA LATINA CORRESPONDIENTE A DOS PERÍODOS DE TIEMPO, DESDE 1950 A 2001 Y DESDE 1993 A 2001. ....	131
ILUSTRACIÓN 87: ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA ESTACIONAL EN EL PERÍODO 1992-2009. ....	132
ILUSTRACIÓN 88: ALTURA SIGNIFICATIVA MÁXIMA ESTACIONAL CORRESPONDIENTE AL PERÍODO 1992-2009. ....	133
ILUSTRACIÓN 89: ALTURA SIGNIFICATIVA SUPERADA 12 HORAS AL AÑO EN EL PERÍODO 1948-2008. ....	134
ILUSTRACIÓN 90: DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA DEL OLEAJE EN EL PERÍODO 1992-2008. ...	134
ILUSTRACIÓN 91: DESCRIPCIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO EN CHILE EN EL PERÍODO 1948-2010. ....	135
ILUSTRACIÓN 92: NIVEL MÁXIMO DE MAREA ASTRONÓMICA EN EL PERÍODO 1948-2008. ....	136
ILUSTRACIÓN 93: CARRERA DE MAREA ASTRONÓMICA EN EL PERÍODO 1948-2008. ....	136
ILUSTRACIÓN 94: MAREA METEOROLÓGICA PERTENECIENTE AL CUANTIL MEDIO 0,99 EN EL PERÍODO 1948-2008. ....	137
ILUSTRACIÓN 95: RANGO DE VARIACIÓN MENSUAL DEL CUANTIL 0,99 DE MAREA METEOROLÓGICA DESDE 1948 A 2008. ....	137
ILUSTRACIÓN 96: PROYECCIONES DE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL MEDIO GLOBAL DEL MAR. ....	139
ILUSTRACIÓN 97: PROYECCIONES DEL NIVEL MEDIO RELATIVO NETO REGIONAL DEL MAR PARA EL PERÍODO 2081-2100. ....	140
ILUSTRACIÓN 98: PROYECCIÓN DEL PORCENTAJE DE DESVIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR REGIONAL PARA EL PERÍODO 2081-2100. ....	141
ILUSTRACIÓN 99: A) PROYECCIONES MEDIAS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA EL PERÍODO 2010-2040 Y B) PARA EL PERÍODO 2040-2070. ....	143
ILUSTRACIÓN 100: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA EL AÑO 2040. ....	143
ILUSTRACIÓN 101: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA EL AÑO 2070. ....	144
ILUSTRACIÓN 102: PROYECCIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO PARA EL PERÍODO 2010-2040. ...	144
ILUSTRACIÓN 103: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO PARA EL AÑO 2040. ....	145
ILUSTRACIÓN 104: PROYECCIONES DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO PARA EL PERÍODO 2040-2070. ....	145
ILUSTRACIÓN 105: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL NIVEL DEL MAR RELATIVO PARA EL AÑO 2070. ....	146
ILUSTRACIÓN 106: A) VARIACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA SUPERADA 12 HORAS AL AÑO (Hs12) Y B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA PARA EL AÑO 2040. ....	147
ILUSTRACIÓN 107: A) VARIACIÓN DE Hs12 Y B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA B) PARA EL AÑO 2070. ....	147
ILUSTRACIÓN 108: PROBABILIDAD DE SUPERAR UN AUMENTO DE 0.5 [M] LA ALTURA SIGNIFICATIVA SUPERADA 12 HORAS AL AÑO PARA DISTINTOS HORIZONTES DE TIEMPO. ....	148
ILUSTRACIÓN 109: A) VARIACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA MENSUAL E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2040. ....	149
ILUSTRACIÓN 110: A) VARIACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA MENSUAL E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2070. ....	150
ILUSTRACIÓN 111: PROBABILIDAD DE SUPERAR UN AUMENTO DE 0.2 METROS DE HS MEDIA MENSUAL PARA DIVERSOS HORIZONTES DE TIEMPO. ....	151
ILUSTRACIÓN 112: A) VARIACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2040. ....	151
ILUSTRACIÓN 113: A) VARIACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2070. ....	152
ILUSTRACIÓN 114: TENDENCIA ESTACIONAL DE LOS EXTREMOS DE OLEAJE A LARGO PLAZO. ....	153
ILUSTRACIÓN 115: A) VALOR MEDIO DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA CON PERÍODO DE RETORNO 50 AÑOS PARA LOS AÑOS 2040 Y B) 2070. ....	154
ILUSTRACIÓN 116: COMPARACIÓN DE LAS PROYECCIONES DEL IPCC CON LAS OBSERVACIONES DE: CONCENTRACIONES MEDIAS ANUALES DE CO <sub>2</sub> (ILUSTRACIONES SUPERIORES), TEMPERATURA MEDIA GLOBAL ANUAL EN SUPERFICIE (ILUSTRACIONES CENTRALES) Y NIVEL MEDIO GLOBAL DEL MAR (ILUSTRACIONES INFERIORES). ....	157





## **RESUMEN**

El presente proyecto de título aborda la determinación de la influencia del cambio climático en el diseño de una obra costera, basándose en la pregunta ¿Cómo afecta el cambio climático, y en concreto las variaciones de los parámetros de altura significativa de ola, marea meteorológica, nivel medio del mar y eventos meteorológicos extremos, al diseño de los elementos presentes en un rompeolas? A partir de ella surge la hipótesis que las modificaciones en las variables antes mencionadas, debidas al fenómeno de cambio climático, conllevan a aumentos en los pesos y longitudes equivalentes de los elementos presentes en una obra costera. El objetivo general es determinar la influencia del cambio climático en el diseño de una obra costera y los objetivos específicos son: identificar y describir las proyecciones de las variaciones, debidas al fenómeno de cambio climático, del nivel medio del mar, la altura significativa, periodo *peak* y dirección del oleaje, y la marea meteorológica. Junto con esto caracterizar la influencia de la marea astronómica en el nivel del mar y finalmente relacionar las variables antes mencionadas en función del diseño de una obra costera.

El paradigma de investigación es positivista con un enfoque de investigación cuantitativo, el diseño de investigación es no experimental correlacional predictivo y se materializa con una técnica de recolección de datos denominada análisis documental de fuentes secundarias (Hernández *et al.*, 2010). El proceso de trabajo contempla en primer lugar obtener los registros de desnivelaciones del nivel del mar, desde la página *web sea level station monitoring facility* para realizar un análisis de armónicos de la marea mediante la herramienta T-TIDE programada en MATLAB y de esta forma obtener el nivel medio del mar y el nivel de reducción de sonda. Con el mismo registro de desnivelaciones utilizado para la realización del análisis armónico se realiza un análisis no armónico de la marea con la finalidad de obtener los rangos de la marea. Por otra parte, las proyecciones de variación que presentará el nivel medio del mar y los valores extremos de marea meteorológica, debidas al fenómeno de cambio climático para diversos horizontes de tiempo en la costa de Valparaíso son obtenidas desde el documento elaborado por CEPAL (2015). Las tres variables: el nivel medio del mar sumado a las proyecciones de variación del mismo, los rangos de la marea y los valores de marea meteorológica son utilizados para el cálculo del nivel de diseño. Las proyecciones de los parámetros del oleaje para los cuatro escenarios RCP son obtenidas desde la página *web* CSIRO. Estos parámetros son procesados mediante un script en MATLAB para luego propagarlos y de esta forma obtener los coeficientes de agitación. Se realiza también un análisis de clima extremo con el propósito de obtener la altura significativa con periodo de retorno de 70 años, necesaria para realizar el cálculo de la altura significativa de diseño. Una vez conocido el nivel de diseño y la altura significativa de diseño se procede a realizar el cálculo del peso y de la longitud equivalente de los elementos presentes en cada uno de los rompeolas en talud diseñados bajo los cuatro escenarios RCP.

En la actualidad el peso de los elementos que componen la defensa costera de Avenida Perú varía entre las 0.4 y 7.9 [Tn]. Si se compara el peso promedio de los elementos que conforman la coraza del rompeolas actual, es decir 6.3 [Tn], existe un aumento en los pesos de los elementos en todos los escenarios RCP utilizados en esta memoria de proyecto de título.

Lo detallado en el párrafo anterior indica que la hipótesis del presente proyecto de título se verifica. Es decir, el cambio climático conlleva a un aumento en el peso de los elementos que componen un rompeolas en talud.