



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO Y LA ENERGÍA DE OLEAJE
DISPONIBLE EN LAS COSTAS MEXICANAS

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

ABRIL ICHEL PÉREZ PEÑA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D. F.

DE 2012



ÍNDICE

CIUDAD UNIVERSITARIA	1
Capítulo I	10
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 Motivacion y objetivos	11
1.2 GENERALIDADES SOBRE LAS FUENTES ENERGETICAS.....	11
1.2.1 El contexto petrolero a nivel internacional.....	11
1.2.2 Contexto petrolero a nivel nacional.....	12
1.2.3 Las fuentes tradicionales de energía en México	12
1.2.4 Las fuentes renovables y la eficiencia energética	13
1.2.5 Energías renovables procedentes del mar.....	13
1.2.6 Dispositivos convertidores de energía undimotriz.....	14
1.2.7 Análisis del potencial energético del oleaje.....	15
1.2.8 Potencia del oleaje real	17
1.2.9 Análisis del potencial energético del viento.....	17
1.3 Antecedentes de atlas de energía unidimotriz	18
Capítulo II	22
2 REPRESENTACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE	22
2.1 INTRODUCCIÓN	22
2.2 PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS	22
• Oleaje	22
• Marea	22
• Corrientes oceánicas	23
2.3 GENERALIDADES DEL OLEAJE	23
2.3.1 Factores que modifican los parámetros del oleaje	23
2.3.2 Descripción espectral del estado de mar	23
2.3.3 Parámetros espectrales.....	25
2.3.4 Transformación y deformación del espectro a causa de los procesos de propagación 25	
2.3.5 Modelos aplicados a propagación.....	25

2.4	TEORÍA LINEAL.....	27
2.5	ECUACION DE LA PENDIENTE SUAVE (MILD SLOPE ECUATION)	28
2.5.1	Modelo de propagación REF/DIF	29
2.5.2	Ecuaciones Base del REF/DIF.....	30
2.5.3	OLUCA-UNAM y MWAPO3.....	31
2.6	DESCRIPCIÓN DEL MODELO WAM.....	32
2.6.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO HURAC.....	32
Capítulo III.....		36
3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CLIMA MARÍTIMO.....	36
3.1	INTRODUCCIÓN.....	36
3.2	GENERALIDADES ESTADÍSTICAS	36
3.2.1	Altura de ola significante de Hs.....	37
3.2.2	Régimen medio	37
3.2.1	Funciones de distribución de los parámetros del oleaje.....	38
3.2.2	Régimen extremal	39
3.3	Representación gráfica de los resultados	40
3.3.1	Probabilidad Anual de Excedencia	40
3.3.2	Probabilidad Conjunta.....	40
3.3.3	Rosas direccionales	41
3.3.4	Histograma	41
3.4	Atlas del Clima Marítimo de las Costas Mexicanas	41
Capítulo IV.....		50
4	POTENCIAL ENERGÉTICO EN LA COSTA.....	50
4.1	ANÁLISIS EN AGUAS PROFUNDAS	50
4.1.1	Resultados el potencial energético en aguas profundas en el litoral del país	51
4.1.2	Análisis del viento.....	57
4.1.3	Sitio de aplicación 1.....	60
4.1.4	Sitio de aplicación 2.....	64
4.1.5	Sitio de aplicación 3.....	67
4.2	ANÁLISIS EN AGUAS SOMERAS	69
4.2.1	Fuente de información	69

4.2.2	Potencial energético en aguas someras.....	71
4.3	CASO DE APLICACIÓN ENSENADA BAJA CALIFORNIA	72
4.3.1	Características oceanográficas, geológicas, geomorfológicas	72
4.3.2	Características sociales y económicas.....	72
4.3.3	Resultados	73
4.4	CASO DE APLICACION MAZATLAN SINALOA	78
4.4.1	Características oceanográficas, geológicas, geomorfológicas	78
4.4.2	Características sociales y económicas.....	79
4.4.3	Resultados	79
4.5	CASO DE APLICACION MANZANILLO COLIMA.....	85
4.5.1	Características oceanográficas, geológicas, geomorfológicas	85
4.5.2	Características sociales y económicas.....	85
4.5.3	Resultados	85
4.6	CASO DE APLICACION ALTAMIRA TAMAULIPAS.....	90
4.6.1	Características oceanográficas, geológicas, geomorfológicas	90
4.6.2	Resultados	91
5	CONCLUSIONES	96
6	Bibliografía	99
7	ANEXOS	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Distribución mundial media anual del potencial energético del oleaje en mar abierto, en kW/m por frente de ola.....	19
Figura. 3 Representación gráfica de los análisis del atlas.....	42
Figura. 2 Mallas de trabajo del Atlas del clima marítimo de las costas mexicanas.....	42
Figura. 4 Probabilidad de excedencia de alturas de ola significativa	43
Figura. 5 Probabilidad de excedencia de períodos medio de ola	43
Figura. 6 Probabilidad conjunta altura de ola significativa y período medio de ola	44
Figura. 7 Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación	44
Figura. 8 Rosa de oleaje	45
Figura. 9 Régimen extremal de alturas de ola significativa	45
Figura. 10 Rosa de altura de ola significativa.....	46
Figura. 11 Rosa de energía normalizada	46
Figura. 12 Rosas de períodos de ola de pico	47
Figura. 13 Duración media de tormentas	47
Figura. 14 Presentación de alturas de ola significativa por mes.....	47
Figura. 15 Presentación de alturas de ola significantes por año.....	48
Figura. 16 Presentación de tormentas normalizadas por año.....	48
Figura. 17 Potencia promedio del máximo anual del oleaje en las costas mexicanas.....	52
Figura. 18 Potencia media del oleaje en las costas Mexicanas	52
Figura. 19 Potencia filtrada de tormentas del oleaje en las costas Mexicanas	53
Figura. 20 Potencia media del oleaje en la estación de primavera.....	54
Figura. 21 Potencia media del oleaje en la estación de invierno.....	54
Figura. 22 Potencia media del oleaje en la estación de otoño.....	55
Figura. 23 Potencia media del oleaje en la estación de verano	55
Figura. 24 Dirección de los vientos en las costas centro Este del Pacífico (A) Invierno (B) Verano.....	56
Figura. 25 Potencia media del viento de las costas Mexicanas	57
Figura. 26 Potencia filtrada de tormentas del viento en las costas Mexicanas	57
Figura. 27 Potencia media del viento en la estación de invierno.....	58
Figura. 28 Potencia media del viento en la estación de primavera.....	58
Figura. 29 Potencia media del viento en la estación de otoño	59
Figura. 30 Potencia media del viento en la estación de verano	59
Figura. 31 Probabilidad conjunta de altura de ola y período para la zona 1.....	60
Figura. 32 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en la estación de invierno.....	61
Figura. 33 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en la estación de primavera.....	61
Figura. 34 Variabilidad anual de la potencia del oleaje otoño en la zona 1.	62
Figura. 35 Variabilidad anual de la potencia del oleaje verano en la zona 1	62
Figura. 36 Variabilidad anual de la potencia del viento en primavera e invierno en la zona 1	63
Figura. 37 Variabilidad anual de la potencia del viento en otoño y verano en la zona 1.	63
Figura. 38 Probabilidad conjunta de altura de ola y período para la zona 2	64

Figura. 39 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en invierno en la zona 2.....	64
Figura. 40 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en primavera en la zona 2	65
Figura. 41 Variabilidad anual de la potencia del oleaje otoño en la zona 2.	65
Figura. 42 Variabilidad anual de la potencia del oleaje verano en la zona 2	66
Figura. 43 Variabilidad anual de la potencia del viento en primavera e invierno en la zona 2.	66
Figura. 44 Variabilidad anual de la potencia del viento en verano e otoño en la zona 2.	67
Figura. 45 Probabilidad conjunta de altura de ola y período para la zona 3.....	68
Figura. 46 Variabilidad anual de la potencia del oleaje de las cuatro estaciones del año en la zona 3.....	68
Figura. 47 Ejemplo de batimetría girada utilizada para propagar el oleaje (Caso Ensenada B.C.)	69
Figura. 48 Espectros JONSWAP propagados en REF/DIF	71
Figura. 49 Batimetría de la Bahía de Todos Santos	73
Figura. 50 Rosa de la dirección de propagación del oleaje	74
Figura. 51 Rosas de dirección de propagación y de probabilidad conjunta de altura significativa y período medio de ola	74
Figura. 52 Mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los periodos pico 6.4, 8s, 9.6s, 11.2s en la línea batimétrica de 20m dirección 292.2°	75
Figura. 53 mapas de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 292°	76
Figura. 54 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Ensenada B.C	77
Figura. 55 probabilidad acumulada Zona A.....	77
Figura. 56 probabilidad acumulada Zona B.....	78
Figura. 57 Batimetría del puerto de Mazatlán Sinaloa	79
Figura. 58 Rosas de dirección de propagación y de probabilidad conjunta de altura significativa y período medio de ola	80
Figura. 59 mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los periodos pico 6.4, 8s, 9.6s, 11.2s en la línea batimétrica de 20m dirección 270°	80
Figura. 60 Rosa de Oleaje de la estación de verano.....	81
Figura. 61 mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los periodos pico 6.4s , 8s en la línea batimétrica de 20m dirección 247.5°	81
Figura. 62 mapas de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 270°	82
Figura. 63 mapas de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 292°	83
Figura. 64 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Mazatlán Sin	83
Figura. 65 probabilidad acumulada Zona A dirección 270°	84
Figura. 66 probabilidad acumulada Zona A dirección 270.....	84
Figura. 67 Batimetría del puerto de Mazatlán Sinaloa	86
Figura. 68 Características del estado de mar en la celda con coordenadas 104.5Wy 18.5N.	86
Figura. 69 Mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los periodos pico 8s, 6.4s en la línea batimétrica de 20m dirección 292.5.....	87
Figura. 70 mapas de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 292.2°.	88
Figura. 71 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Mazatlán Sin	89
Figura. 72 probabilidad acumulada Zona A dirección 292.5.....	89
Figura. 73 probabilidad acumulada Zona B dirección 292.5°	90

Figura. 74 Batimetría del Puerto de Altamira Tamaulipas 91

Figura. 75 Características del estado de mar en la celda con coordenadas 97.5W y 22.5N 92

Figura. 76 Mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los períodos pico 8s, 6.4 y 9.6 s en la línea batimétrica de 20m dirección 90° 92

Figura. 77 Rosa de propagación de oleaje de las cuatro estaciones..... 93

Figura. 78 mapas de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 112.5°. 93

Figura. 79 Mapa de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 112.5°... 94

Figura. 80 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Altamira Tamps..... 95

Figura. 81 probabilidad acumulada Zona A dirección 90° 95

Capítulo I

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial, así como la rápida evolución de la tecnología, han dado origen a un aumento considerable de la demanda energética a nivel global.

La sociedad debe concientizar un cambio inherente del origen de las fuentes energéticas actuales y mentalizar un sistema sostenible y renovable para el futuro próximo. La población ha llegado al punto crítico donde el enfoque hacia a las energías renovables se convierte en prioridad para atenuar el efecto del inevitable agotamiento de las fuentes de orígenes fósiles, además de activar la recuperación económica, consecuencia más preocupante de este descenso energético.

Entre las diferentes opciones del aprovechamiento de las energías renovables, la hidráulica convencional, la eólica y solar tienen una importante presencia dentro del plan alternativo, pero las provenientes del mar poseen un futuro prometedor, sabiendo que el mar ocupa más del 70 % de la superficie terrestre y tiene múltiples opciones de aprovechamiento (oleaje, mareas, corrientes y gradientes térmicos).

Hasta ahora todos los desarrollos referidos a la conversión de energía del oleaje se han centrado en regiones con alto potencial energético, por lo general en latitudes nórdicas. Sin embargo, en algunas regiones del planeta se pueden encontrar grandes recursos con potencial medio, pero con condiciones climáticas regulares que hacen de la explotación energética una opción viable. Las regiones donde se encuentran condiciones medias de explotación del oleaje, según Bernhoff *et. al.* (2006), son: el mar Báltico; el Mediterráneo; el mar del Norte en Europa y algunas regiones cercanas al ecuador.

Con base en investigaciones, se ha estimado un potencial teórico de energía oceánica superior a 100000 TWh/año (el consumo de electricidad en el mundo ronda a los 16000 TWh/año). Con la tecnología actual se estiman 45000 TWh/año para las provenientes del gradiente salino y 33000 TWh/año para la térmica oceánica (EREC, 2010)

La economía mexicana, tiene una gran dependencia de los combustibles fósiles, tanto para el uso dentro del territorio nacional como para su exportación y comercialización, tal grado de importancia tiene, que la venta de hidrocarburos representa el ingreso más alto del país en materia de exportaciones.

A pesar de la gran problemática que se pronostica por la escasez de estos combustibles fósiles, México cuenta con pocos estudios sobre esta línea de investigación, así, el propósito que tiene este trabajo, es encaminar y concientizar un futuro energético en tecnologías renovables, que no dependan de la volatilidad de los precios del petróleo.

A lo largo de todo el litoral mexicano, las olas representan la mayor fuente de energía, parte de dicha energía que llega a la costa es reflejada y devuelta hacia el mar abierto, el resto se transforma para generar corrientes costeras y transporte de sedimentos y es, en última instancia, la fuerza que dirige y domina los cambios morfológicos a lo largo de este espacio de transición entre el mar y la tierra.

1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Históricamente la aplicación de energías renovables en México ha tenido poco desarrollo, a pesar de esto, en los recientes años la situación en esta línea de investigación demuestra una tendencia positiva, debido al aumento de apoyos a investigaciones en este tipo de tecnologías. El marco institucional y regulador ha tenido un crecimiento con diferentes proyectos que se encuentran en diversas etapas de desarrollo.

Englobando las energías renovables, actualmente en México, representan alrededor del 10.1 % de la oferta interna bruta de energía en México (Secretaría de Energía, 2007). Cerca del 25 % de la potencia instalada en el sector eléctrico está cubierta por grandes centrales hidroeléctricas, plantas geotérmicas y una primera central eólica.

Dentro de la riqueza natural que México tiene a su alcance de manera inmediata, se cuenta con una gran línea costera (de más de 11000 km), que si bien ha sido explotada por la industria turística, ofrece una amplia plataforma para pensar en el aprovechamiento de la energía del mar. Tal como lo afirma Clément *et al.* (2002), la principal característica en cuanto al aprovechamiento del oleaje, es su alta densidad de energía, la cual es la más abundante entre las diferentes fuentes de energía renovable.

Tradicionalmente se ha considerado que, debido a la inclinación y tirante de agua sobre las plataformas continentales que lo conforman, México es un país con poco potencial energético de oleaje. Esta conclusión es cierta solo si el análisis de las condiciones de clima marítimo se realiza exclusivamente en régimen medio, definido éste como en la literatura oceanográfica convencional (ver por ejemplo Silva, 2005) y acotado a valores conservadores.

En este trabajo se presenta una caracterización del clima marítimo en las costas Mexicanas a fin de hacer una evaluación de la energía del oleaje que circunda en el país y se plantea la posibilidad de re-definir los umbrales de régimen para el aprovechamiento de energía a través de un análisis histórico (de 1948 a 2007) de las condiciones de oleaje y viento. Dicho análisis parte de la preparación e interpolación de una base de datos histórica de vientos y la predicción del oleaje generado por medio de un modelo híbrido de propagación de oleaje WAM-HURAC, además de un análisis más detallado con oleaje en aguas someras en 4 sitios de aplicación, propagando el oleaje con el modelo REFDFIF y obteniendo la altura de ola unitaria y el potencial energético en la línea batimetría de 20 metros, con base en estos mapas, se extrajeron puntos donde los potenciales resaltaron a lo largo de toda la línea costera.

1.2 GENERALIDADES SOBRE LAS FUENTES ENERGÉTICAS

1.2.1 EL CONTEXTO PETROLERO A NIVEL INTERNACIONAL

El escenario internacional ofrece evidencias claras de que la producción de petróleo ha iniciado su declive. La situación no debería de sorprender, pues desde que se utilizó como base energética a nivel mundial, se ha consumido solo 24 % del petróleo recuperable. Desde 1985, el petróleo descubierto es menor que el que se extrae cada año, esto significa que, desde entonces, se reducen los recursos, por lo que a las actuales tasas de consumo las reservas conocidas no podrán extenderse un horizonte mayor de cuarenta años. Los nuevos proyectos de infraestructura petrolera, mayores a 500 millones de barriles, son pocos. La exploración petrolera se realiza en regiones cada vez más remotas. Donde los costos de producción se encarecen.

Respecto de los encontrados en el pasado, los yacimientos son de menores dimensiones, además de la menor calidad del crudo que proviene, en un 60 %, de campos maduros. Estas cifras apuntan a un escenario de producción que tiende a deteriorarse a medida que la explotación se acerca a su punto máximo. Para luego empezar a declinar, situación que los geólogos calculan que ocurra entre los años 2007-2015.

La visión convencional, sostenida por agencias internacionales y departamentos de energía, la Agencia Internacional de Energía (AIE) y otras organizaciones, consideran que las reservas mundiales son vastas, noción muy cuestionable actualmente, incluso en el caso del Medio Oriente.

Al igual que en otros momentos históricos de crisis energéticas, el mercado petrolero no cuenta con capacidad de producción excedente. Pese a que la OPEP ha incorporado a la oferta mundial un millón de barriles para amortiguar el alza en los precios, no ha podido detenerlo, de igual manera los países de la OPEP producen a pleno rendimiento, y fuera de la organización la producción también opera al máximo.

1.2.2 CONTEXTO PETROLERO A NIVEL NACIONAL

El petróleo ha sido determinante en México, para su economía, finanzas públicas, industria, desarrollo tecnológico, balanza comercial y sus relaciones con el exterior, en particular con los Estados Unidos. Pero, más aun, ha sido un elemento determinante para la consolidación de México como estado nacional y como un país con una economía emergente. El petróleo ha sido determinante en la vida de México desde las primeras décadas del siglo XX.

La capacidad de refinación en México no ha crecido desde hace casi tres décadas. Por eso, se importa más de la tercera parte de las necesidades de petrolíferos en el país. En 2006 las importaciones llegaron a 364 mil barriles diarios, generando un déficit comercial de más de 5 mil millones de dólares. Las importaciones de gasolinas representaron 38.8 % del consumo nacional. Esta falta de inversión oportuna ha provocado graves desajustes.

Otro caso delicado es el de la industria química nacional que reporta un déficit en su balanza comercial de más de 9 mil millones de dólares y ha sufrido la desintegración y el rompimiento de sus cadenas productivas. De igual forma, la infraestructura para el transporte el almacenamiento y la distribución de petrolíferos, acusa deficiencias graves.

1.2.3 LAS FUENTES TRADICIONALES DE ENERGÍA EN MÉXICO

Se acepta, en general, que las fuentes convencionales de energía (hidrocarburos como petróleo y gas, carbón, nuclear, geotermia e hidroelectricidad) no son necesariamente renovables, es decir, su explotación tiene un horizonte finito en el tiempo. Además, son en general resultado de la explotación de recursos heredados de muchos miles de años, así que, como en la explotación de todos los recursos primarios, existe el cuidado de no afectar la sustentabilidad del recurso para mantener bienestar de las próximas generaciones.

Tras esta generalidad, conviene puntualizar algunas diferencias entre los recursos primarios. El petróleo es la principal fuente energética contemporánea, así que los esfuerzos por sustituirlo por otros recursos equivalentes, particularmente los biocombustibles, tiene efectos enormes sobre las prácticas económicas y sociales de las naciones. En México, la emergencia de fabricar etanol para su exportación ha alterado de manera muy importante la cadena de valor maíz-tortilla y los esquemas de producción agrícola en general.

El gas se produce en el país en cantidades claramente inferiores a las que el mercado doméstico demanda, en parte por el surgimiento reciente de una gran cantidad de plantas generadoras de electricidad con base en gas. Así, México debe importar la fracción que le hace falta de los Estados Unidos, país que tiene un déficit en el recurso, por lo que su importación es muy costosa.

México tiene ciertas capacidades de generación eléctrica con base en carbón, si bien las reservas son inferiores a las de otros países. En la segunda mitad de 2007 surgió un debate serio para propiciar que las cantidades de gas asociado al carbón, rico en metano, pudiera ser aprovechado como energético, pues tirarlo a la atmósfera como se ha hecho hasta ahora resulta dañino y ha sido responsabilizado de grandes y penosos accidentes en las minas de carbón.

México es líder mundial de la geotermia, tan solo detrás de Estados Unidos, Filipinas e Italia. Sin embargo, la eventualidad de los yacimientos geotérmicos es escasa, y la participación nacional de esta forma de energía es pequeña. Se ha analizado la manera de aprovechar algunos yacimientos geotérmicos nacionales, localizados en las costas de Baja California Sur, para producir agua desalada de mar. También se han hecho cálculos para incrementar la actividad geotérmica por medios no convencionales, lo que hasta ahora no se ha logrado con seriedad. Se teme que en la medida que se reorganicen los flujos de agua subterránea y se avance en la explotación geotérmica, la presión de los yacimientos actualmente explotados decrezca.

1.2.4 LAS FUENTES RENOVABLES Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Hay un cierto consenso en que el gas natural será el combustible más importante en las primeras décadas de este siglo; igualmente se sabe que su horizonte de vida se extenderá no más allá de diez años, después de que inicie el declive del petróleo.

Las energías renovables incluyen la hidroelectricidad (aunque igualmente se clasifica como convencional), las mini-hidráulicas, la geotermia, la biomasa, el viento y la energía solar, las tecnologías energéticas son una gama más amplia de posibilidades.

También existe cierto consenso en que los gobiernos deberían diversificar sus fuentes de energía tan rápido como sea posible y con el mínimo daño a la ecología, pero hay una serie de obstáculos para caminar por la vía de los recursos renovables. Las tecnologías renovables necesitan mejores fondos, las investigaciones, un rápido desarrollo y un mayor despliegue.

En las naciones en vías de desarrollo, las fuentes renovables requieren de importantes subsidios para su pleno aprovechamiento, los países desarrollados son, hasta ahora los que afrontan los costos de energías alternativas, ya que estas se vuelven importantes, como la energía eólica y solar, en tanto que la tecnología del hidrógeno aun esta poco desarrollada y enfrenta altos costos de producción. Por su parte, la tecnología de fusión todavía no supera la etapa experimental. Los biocombustibles (los derivados del etanol e incluso del diesel) tienen un futuro promisorio en el sector transporte y en la alternativa de los transportes híbridos.

1.2.5 ENERGÍAS RENOVABLES PROCEDENTES DEL MAR

Las energías renovables provenientes del mar se deben a la influencia de la radiación solar y de los campos gravitatorios solar, terrestre y lunar sobre los océanos, si se comparan con el resto de las energías renovables, las investigaciones y los proyectos para conseguir energía procedente del mar se encuentran en

una fase inicial, sin embargo, su potencial es muy alto. Entre las posibles fuentes de energía procedentes del mar se encuentran:

- **Gradiente salino:** La diferencia de salinidad entre el agua de océanos y ríos se mantiene, esencialmente, por evaporación del agua de los océanos y por la lluvia recibida por los ríos. En estas zonas puede obtenerse energía debido a las diferencias de presión osmótica.
- **Corrientes marinas:** Es el caso de las turbinas marinas, cuyo funcionamiento es similar a un aerogenerador eólico, con la diferencia que, en este caso, es el flujo de corrientes marinas el que hace girar el rotor. Para que éste funcione, la velocidad deberá de superar los 5 nudos.
- **Mareomotriz:** Se basa en el aprovechamiento de la energía transformada por grandes masas de agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso.
- **Térmica oceánica:** Se obtiene a partir de la diferencia de temperaturas entre la superficie y las profundidades del mar. Para el aprovechamiento de esta energía es necesaria, al menos, una diferencia de temperatura de 20°C.
- **Vientos oceánicos:** En algunas zonas oceánicas los vientos pueden generar de 500 a 800 vatios de energía por metro cuadrado. Por ello, los parques eólicos marinos se convertirán en una importante energía renovable.
- **Biomasa marina:** Los microorganismos constituyen hasta el 90 % de la biomasa marina, la cual contiene una ingente cantidad de energía para la producción de biocombustible. De hecho la masa del plancton presente en los océanos equivale a 240000 millones de elefantes africanos.
- **Undimotriz:** Las olas se forman en el mar, entre otras causas, por la acción del viento, el cual al soplar, origina olas que alcanzan gran tamaño y, por el impulso del viento, corren sobre la superficie marina a gran velocidad descargando toda su potencia sobre los obstáculos que encuentran en su camino.

1.2.6 DISPOSITIVOS CONVERTIDORES DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Los dispositivos para aprovechar la energía provenientes del mar deben de tener la capacidad de captar la energía cinética y/o potencial para convertirlas en energía útil, generalmente energía eléctrica. Sin embargo el desarrollo de estos dispositivos se ven limitados por diferentes dificultades, en las cuales destacan:

- La irregularidad en la amplitud, fase y dirección de las olas, esto dificulta la obtención de la máxima eficiencia del aparato en todo el rango de frecuencias de excitación.
- La carga estructural en el caso de condiciones climáticas extremas, tales como huracanes, pueden superar a la carga media en más de 100 veces

Hasta la fecha se han desarrollado más de 100 tipos de generadores, que realizan el aprovechamiento de la energía de las olas en base a algunas de las siguientes tecnologías:

- **Columna oscilante de agua:** consiste en la oscilación del agua dentro de una cámara semisumergida y abierta por debajo del nivel del mar. Se produce un cambio de presión del aire por encima del agua que es aprovechado por una turbina.
- **Sistemas totalizadores:** Pueden ser flotantes o fijos a la orilla. Atrapan la ola incidente, almacenando el agua en una presa elevada. El agua se hace pasar por unas turbinas al liberarla.

- Sistemas basculantes: pueden ser tanto flotantes como sumergidos. El movimiento de balanceo se convierte a través de un sistema hidráulico o mecánico en movimiento lineal o rotacional para el generador eléctrico.

Entre los dispositivos de estructura flotante podemos distinguir, los absorbedores puntuales, básicamente de traslación, como por ejemplo las boyas Power Buoy o tecnología OPT de Santoña (el nombre se debe a la empresa estadounidense que las desarrolla, Ocean Power Technologies). Las boyas obtienen energía a partir del movimiento relativo entre el flotador y el mástil mediante un sistema hidráulico que acciona un generador, la salida eléctrica se transforma de baja a media tensión en una subestación submarina desde donde se lleva mediante una línea eléctrica submarina al sitio de interés.

Entre los de estructura articulada, esencialmente de rotación, como ejemplo el dispositivo *Pelamis*. El cual se basa en una estructura articulada que dispone entre sus nodos de unión un sistema hidráulico que actúa sobre un generador eléctrico. Se estima que la cantidad de energía obtenida por 30 de estos sistemas podría abastecer aproximadamente 20,000 hogares con un consumo medio europeo.

Los sistemas con movimiento lineal, entre los que destaca el oscilador de la ola Arquímedes (AWS) el cual está formado por dos partes principales, una fija sobre el fondo marino, y otra móvil que se desplaza verticalmente como resultado de la variación de presiones hidrostáticas bajo el agua debido al movimiento inducido por las oscilaciones ascendentes y descendentes de las olas.

A pesar de la diversidad de tecnologías, muy pocos sistemas han pasado a la fase de diseño. Solo unos pocos han alcanzado la etapa de ensayo a escala real. A pesar de esto los dispositivos se encuentran en desarrollo, con el objetivo principal de asegurar sistemas robustos y fiables para poder soportar las adversas condiciones climatológicas a las que estos sistemas pueden llegar a verse sometidos.

1.2.7 ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL OLEAJE

De acuerdo con la teoría lineal de ondas, la energía de una ola es una suma de la energía potencial por la altura de la lámina de agua y de la energía cinética asociada al movimiento de las partículas de agua (Airy 1845). La energía depende principalmente de la altura de ola H , y está dada por la relación que se presenta en la siguiente ecuación.

$$E = E_p + E_k = \frac{\rho g \lambda b H}{8} \dots\dots\dots [1]$$

Donde ρ es la densidad del fluido, λ la longitud de onda, g la aceleración de la gravedad y b el ancho de frente de onda. En términos del período T , y para el caso de aguas profundas, la ecuación queda según lo mostrado por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\rho g T^2 b H}{32\pi} \dots\dots\dots [2]$$

Para la generación de energía, es importante saber la potencia, ésta se obtiene a partir de la Ecuación de Pierson-Moskowitz, que estima la potencia del frente de onda por unidad de longitud en kW/m.

$$P = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 c \operatorname{sen}^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right) \left(1 + \frac{4\pi \frac{h}{\lambda}}{\operatorname{Sh}(4\pi \frac{h}{\lambda})}\right) = \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 C_g \operatorname{sen}^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right) \dots\dots\dots [3]$$

Siendo C_g la celeridad del grupo de olas, (asociada al avance de la energía), que es diferente de la velocidad C de la ola de la forma:

$$C_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{4\pi \frac{h}{\lambda}}{\operatorname{Sh}(4\pi \frac{h}{\lambda})}\right) \dots\dots\dots [4]$$

La potencia media del frente de onda por unidad de longitud, es:

$$\hat{N}_L = \frac{\rho g H^2 T}{32\pi} t h \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \left(1 + \frac{4\pi \frac{h}{\lambda}}{\operatorname{Sh}(4\pi \frac{h}{\lambda})}\right)\right) \dots\dots\dots [5]$$

En aguas profundas donde $h < \frac{\lambda}{2}$ se cumple que $C_g = \frac{C}{2}$, debido a que las olas están en cabeza del grupo van perdiendo energía y acaban por desaparecer, mientras que en la cola del grupo aparecen nuevas olas; en esta situación, la potencia \hat{N}_L por unidad de longitud de frente de ola en función del período es:

$$\hat{N}_L = \frac{\rho g H^2 C_g}{8} = \frac{\rho g H^2 C}{16} = \left| C = \frac{gT}{2\pi}; T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \right| = \frac{\rho H^2 g^2 T}{32\pi} = \frac{\rho H^2}{16} \sqrt{\frac{\lambda g^3}{2\pi}} \dots\dots\dots [6]$$

Potencia Oleaje en Aguas Profundas Teórico

$$NL = \frac{1}{32} \rho g H^2 C \dots\dots\dots [7]$$

Si se toma $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ y T en segundos nos queda en Kw/m por frente de ola

$$NL = 0.955 H^2 T \dots\dots\dots [8]$$

El desarrollo para la potencia en aguas someras se toma a partir de que $h < \frac{\lambda}{2}$ y se cumple que $C_g = C$ por lo tanto las fórmulas se desarrollan de la siguiente forma:

$$N_L = \frac{\rho g H^2 C_g}{8} = \frac{\rho g H^2 C}{8} = \left| C = \frac{gT}{2\pi}; T = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \right| = \frac{\rho H^2 g^2 T}{16\pi} = \frac{\rho H^2}{8} \sqrt{\frac{\lambda g^3}{2\pi}} \dots\dots\dots [9]$$

Potencia Oleaje en Aguas Someras Teórico

$$NL = \frac{1}{16} \rho g H^2 C \dots\dots\dots [10]$$

1.2.8 POTENCIA DEL OLEAJE REAL

El oleaje real del mar es una superposición compleja de numerosos trenes de olas no regulares con distintos valores de su período, altura y dirección, elevando el estudio a un nivel con mayor complejidad, por lo que aquí solo se exponen únicamente algunas nociones.

El comportamiento local de las olas se puede describir mediante el espectro direccional completo del estado de mar, que no es más que la función de densidad de probabilidad de la distribución del espectro de energía $S(w, \theta)$ que depende de la dirección θ y la frecuencia w .

La potencia del oleaje real depende, por lo tanto, de una serie de factores como la frecuencia w de las olas, su dirección θ , la profundidad h del mar, la celeridad del grupo de olas C_g etc., que está dada por la expresión:

$$N_L = \gamma \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(w, h) S(w, \theta) dw d\theta = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{S(w, \theta)}{w} dw d\theta = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(0)} T_p = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(0)} \frac{2\pi}{w} \dots [11]$$

Siendo T_p el período pico correspondiente a la frecuencia central del espectro $S(w\theta)$.

Si se define el *enésimo, o momento espectral de orden n* de la distribución de energía direccional a una sola dirección, la expresión de la energía queda en la forma:

$$N_L = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(-1)} \dots [12]$$

En aguas profundas, $h > \frac{\lambda}{2}$, se cumple que: $C_g = \frac{g}{4\pi w}$ por lo que la potencia del frente de olas de anchura unidad, para olas no regulares viene expresada por:

$$N_L = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(-1)} = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{(0)} T_E = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_S^2 T_E = 0.493 H_S^2 T_E \dots [13]$$

Donde T_E es el período energético que es igual a $T_E = 0.8572 T_p$, donde resulta

$$N_L = 0.423 H_S^2 T_p \frac{kW}{m} \dots [14]$$

La versión que se utilizó en esta tesis fue la de Pierson-Moskowitz:

$$N_L = 0.458 H^2 T \dots [15]$$

Donde N_L es la potencia en Kw/m , H es la altura de ola y T el período medio.

1.2.9 ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO

Otro factor que se tomó en cuenta para el aprovechamiento de energías renovables, es la potencia eólica, uno de los recursos con mayor exposición y facilidades en cuanto a instalación de equipos y estudios, para esto se explica un poco de teoría sobre el aprovechamiento de este recurso.

Es la energía cinética de las moléculas del aire divididas entre el tiempo. Esto se debe a que la energía cinética es inherente al movimiento de las partículas de aire. Por lo tanto el potencial eólico se define como la cantidad de moléculas de aire que se mueve a través de un área determinada en un período de tiempo.

Debido a las características de las capas atmosféricas, existen diferencias entre la energía cinética del viento, la tasa y los límites de producción del potencial eólico.

Muchos investigadores han realizado estimaciones del potencial eólico en algunas regiones alrededor del planeta, (Manwell et al 2006), menciona que lo máximo que se puede extraer de la energía eólica teóricamente se puede producir a partir de la energía cinética contenida en el viento, es cerca del 60 % de la potencia disponible, Sin embargo, este factor se reduce al 40 % para las mejores turbinas de viento construidas con eje horizontal. En consecuencia, ese es el potencial eólico disponible para la conversión a otro tipo de energía.

Para un análisis del viento y la estimación del potencial del recurso, es necesario contar con una gran cantidad de información de por lo menos 2 factores importantes en su estudio, tanto dirección como la velocidad de viento.

Con una base de información lo suficientemente amplia y un medio que permita compactar los datos de viento, ofrece una opción para la evaluación de su potencial energético y las posibilidades de sitios para su explotación, para esto existen técnicas estadísticas que son herramientas para determinar estos valores, y estimar la potencia eólica media por unidad de área.

Para la evaluación de un sitio en particular y determinación de potencias disponibles, es necesario obtener los valores promedios de las velocidades en un determinado tiempo, mensual, estacional o promedios multianuales, de esta forma se define la potencia media por unidad de superficie disponible para dicha localidad.

1.3 ANTECEDENTES DE ATLAS DE ENERGÍA UNIDIMOTRIZ

Existen estudios sobre el análisis de potencial energético del oleaje a nivel internacional, los primeros atlas de energía, estaban orientadas al cálculo del recurso energético, según estos atlas las zonas con mayor potencial de oleaje a escala mundial, serian las situadas entre las latitudes 30° y 60° tanto en el hemisferio norte como en el sur Figura. 1. Esto es debido, en gran parte, a que la acción del viento en estas zonas es mayor.

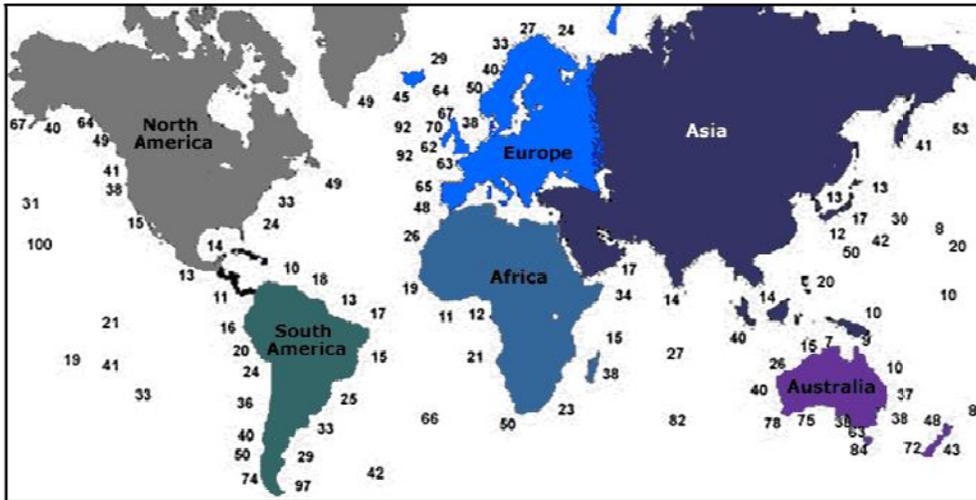


Figura. 1 Distribución mundial media anual del potencial energético del oleaje en mar abierto, en kW/m por frente de ola

Uno de los primeros atlas se realizó en Europa, lo denominaron WEARTLAS (Pontes et al 1996, Pontes, 1998). Este estudio incluye información relativa al clima del oleaje anual y estacional de 85 puntos distribuidos en el Atlántico y el Mediterráneo.

En el 2008, el país vasco logró un estudio del potencial en sus costas, teniendo como objetivo establecer zonas adecuadas para la instalación de captadores, para esto establecieron criterios con los que determinaron *Índices de Idoneidad*. Estos índices se basaron en factores agrupados en: medioambientales, técnicos y socioeconómicos, además, integraron todos los factores catalogándolos como limitantes y no excluyentes. Se mencionaran solo algunos de los criterios de valoración de estos factores:

Zonas excluyentes:

- Zonas de fondeo y canales de acceso a puertos
- Cables submarinos en el lecho marino
- Conducciones marinas

La malla de flujo de energía del oleaje la tomaron de la distribución calculada a partir de datos puntuales del Atlas realizado por la Universidad de Cantabria (L. Mera, 2005), el índice del flujo de energía fue calculado dividiendo directamente el valor del flujo en cada punto de la malla por el máximo, por lo que varía entre 0.3 (menor energía) y 1 (mayor energía).

En cuanto a los aspectos medioambientales, fueron consideradas aquellas zonas o figuras amparadas por la legislación o algún tipo de normatividad.

Dentro de los países europeos, Inglaterra, realizó un Atlas de recursos de energías renovables, éste abarca todo el litoral del Reino Unido e incluye información de datos meteorológicos y oceanográficos.

La fuente principal de datos de viento y oleaje fueron los modelos de pronósticos elaborados por el *Met Office*, el oleaje fue propagado con el modelo NWP (*Numerical Weather Prediction*). Utilizaron estados de mar con

intervalos de 3-25 s en períodos y longitudes de onda de entre 15 -975 m de longitud. Cubre un período de tiempo desde Junio de 2000 hasta septiembre de 2003 lo que da información de 3 años y 3 meses.

La cuantificación de la potencia transmitida por el oleaje la realizaron a partir de la siguiente expresión:

$$P_w = 0.0623 \rho g H_s C_g \dots \dots \dots [16]$$

Donde P_w es la energía de las olas en (W) por metro de cresta de ola, ρ la densidad del agua (1025 kg/m^3), g es la aceleración de la gravedad, H_s altura de ola significativa y C_g la celeridad de grupo.

La variabilidad del recurso eólico fue caracterizada en base a su velocidad y densidad:

$$P_{viento} = 0.5 \cdot \rho \cdot V^3 \dots \dots \dots [17]$$

Donde V es la velocidad del viento (m/s), ρ la densidad del aire (1.225 Kg/m^3).

En Latinoamérica, se han realizado estudios importantes, en Chile (Acuña et al. 2007), quien evaluó diversos dispositivos de costa de aguas profundas, existentes en el mercado, estimaron la potencia de salida de estos basándose en el clima marítimo, para esta evaluación utilizaron la base de datos en aguas profundas, conocida como *Olas de Chile II*. Está compuesta por un historial de ondas unidireccionales de el Océano Pacífico entre 1985 al 2004.

Escogieron 10 sitios a lo largo de toda la costa chilena, su elección se basó en zonas donde el oleaje tuviera una acción privilegiada, con presencias de puntas o cabos que concentran la energía.

Obtuvieron los valores en aguas someras por medio de la propagación con el modelo numérico STWAVE versión 4.0. Con esto consiguieron los espectros que utilizaron para la altura del oleaje en aguas poco profundas, a partir de aquí calcularon la energía en forma de potencia, la ecuación básica que utilizaron fue:

$$P = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) C_g(f, h) df d\theta \dots \dots \dots [18]$$

Donde P es la potencia, ρ es la densidad del agua, S densidad espectral, en función de la frecuencia (f) y dirección (θ), C_g la celeridad de grupo.

Con el fin de resumir el clima marítimo, dividieron la serie de datos por temporadas, anuales, mensuales y estacionales. Además de separarlas espacialmente por líneas batimétricas de 10 m, 25 m, 50 m y aguas profundas. Obtuvieron el potencial en cada línea batimétrica y presentaron gráficas de la distribución en el tiempo donde muestran la variabilidad interanual, ciclos atmosféricos de largo plazo, variabilidad estacional.

En México, el inventario de tecnologías nacionales para el aprovechamiento de las energías renovables es casi nulo, la mayoría de los proyectos de este tipo son modestos ya que están obstaculizados por una visión limitada del potencial, así como escasos fondos para la investigación, debido a estos limitantes esta línea de investigación se encuentra en etapa embrionaria.

De los pocos trabajos que existen a nivel nacional referente a potencial energético del oleaje, CICESE, está realizando una investigación para obtener el potencial energético que existen en las costas de Baja California, para esto se planea llevar a cabo un estudio con metodología donde se incluyan: observaciones directas,

simulaciones numéricas, validación de modelos con datos obtenidos *in situ*, estadísticas de largo plazo y caracterización del clima marítimo de toda la Península.

Los procesos que se llevarán a cabo, para ejecutar dicho proyecto, serán en primera instancia, la regionalización de la Península de Baja California, de acuerdo al régimen de oleaje.

Capítulo II

2 REPRESENTACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE

2.1 INTRODUCCIÓN

Para cualquier estudio en el ámbito oceanográfico, es de suma importancia tener como base sólida de los conceptos que conforman los fenómenos relacionados con el tema, así como un estudio previo del origen de los modelos utilizados para la caracterización de los estados de mar presentados en la zona de estudio, en base a los resultados se toman las decisiones para el desarrollo de este trabajo. En este capítulo se realiza una descripción conceptual de los regímenes del oleaje y bases de los modelos empleados para los resultados de esta tesis.

2.2 PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS

- OLEAJE

El oleaje se define como la oscilación de la superficie del mar, causada por una superposición de ondas que se propagan en determinadas direcciones. La energía del oleaje es, estrictamente, una transformación de la energía solar. El sol es el responsable de crear gradientes de temperatura en la atmósfera y diferencias de presiones que dan lugar a las corrientes de aire. Las olas se generan en mar abierto, donde la acción de arrastre de los vientos crea ondas sobre la superficie cuya característica dependen de la intensidad y la duración del viento, y sobre el “fetch” donde se generan.

Desde su generación hacia la costa, como se sabe, las olas sufren distintos procesos de transformación y depende de la geomorfología de la playa a la que arriban. Para la generación de energía se aprovecha la variación de la energía cinética presente en los movimientos orbitales de las partículas que son movidas por la onda que se propaga.

El oleaje puede ser de dos tipos. El oleaje de tipo Swell (o mar de fondo) es altamente energético que se genera por eventos de tormenta en zonas lejanas y que se propaga por largas distancias. En estas propagaciones, las frecuencias tienen a organizarse por medio de interacciones entre las ondas, y llegan a la costa con una frecuencia predominante, el oleaje tipo Sea (o mar de mar) es aquel que se genera por los vientos locales de zonas, tiene mayor dispersión en las frecuencias y direcciones.

- MAREA

La marea es la variación del nivel del mar debido a fenómenos de atracción gravitacional de los cuerpos celestes sobre las masas de agua, o sobre la acción de campos de vientos y de presión sobre los mismos. Estos forzadores crean una onda larga que se propaga hasta la línea de costa, y de acuerdo con la batimetría local, resultan en una variación periódica del nivel del mar. Las variaciones de este nivel pueden ser desde apenas 30 cm hasta 15 m. De acuerdo con la fuerza que la genera, la marea puede definirse de dos tipos,

marea meteorológica y marea astronómica. La marea astronómica se define como el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel del mar con períodos próximos a las 12 o 24 horas que se producen por los efectos gravitacionales del sistema tierra-luna-sol. Desde el punto de vista práctica, es necesario conocer el comportamiento de la onda de marea, especialmente para predecir la amplitud de la misma en un instante y lugar determinado.

- **CORRIENTES OCEÁNICAS**

Son movimientos de agua en una dirección determinada que obedecen a gradientes de temperatura y densidades entre cuerpos de agua, que además son influenciadas por la circulación de los vientos y factores como la fuerza de Coriolis. Estas corrientes se dan a todas las escalas, desde la continental hasta la local, y pueden ser usadas para la generación de energía eléctrica usando principios similares a los de la generación eólica, es decir, haciendo girar un rotor dotado de palas que son movidas por las corrientes de agua. Estos equipos deben permitir orientarse de acuerdo a la dirección de las corrientes para optimizar su aprovechamiento.

El principal inconveniente del aprovechamiento de este fenómeno es el hecho que regularmente las corrientes oceánicas están muy alejadas de zonas pobladas, entonces hay grandísimos costos asociados a la conexión adicionalmente algunas corrientes varían mucho su intensidad y dirección a lo largo del año, por lo que presentan problemas de confiabilidad.

2.3 GENERALIDADES DEL OLEAJE

2.3.1 FACTORES QUE MODIFICAN LOS PARÁMETROS DEL OLEAJE

El oleaje es el fenómeno que mejor representa el estado del mar. Éste es la respuesta de la superficie del mar a la variación en las condiciones atmosféricas. Sin embargo, su estudio es complejo y no ha sido hasta la segunda mitad del siglo XX cuando los primeros modelos analíticos han empezado a ser capaces de ofrecer una descripción completa del oleaje.

El movimiento de la superficie libre del mar, denominado como oleaje, es un fenómeno que se encuentra presente en la superficie de cualquier cuerpo de agua, este se analiza como un proceso estocástico, debido a la aleatoriedad del oleaje, se considera como un fenómeno estacionario o por lo menos débilmente estacionario, con el objetivo de reducir y simplificar el análisis estadístico. Para definir la estacionariedad es necesario trabajar con procesos de tal duración que tengan un tiempo suficiente para que los procesos sean imperceptibles. Estos intervalos de tiempo en que el proceso se puede considerar débilmente estacionario se denominan *estados de mar*. La duración de éste tiene que ser lo suficientemente corto para que el proceso se considere débilmente estacionario y lo bastante largo como para que contenga información suficiente para que el análisis estadístico sea significativo.

2.3.2 DESCRIPCIÓN ESPECTRAL DEL ESTADO DE MAR

Para representar al oleaje en forma matemática normalmente se utiliza el desplazamiento vertical de la superficie libre del mar, considérese una onda progresiva en una profundidad indefinida con un sistema de coordenadas x, y, z fijo en el espacio, con $z=0$ en el nivel medio y positivo hacia arriba con un ángulo θ que

forma la dirección de propagación en el eje x , con estos ejes, la superficie libre $\eta(x,y,t)$ de una onda propagándose desde aguas profundas, esta puede ser descrita por una senoide definida por:

$$\eta(x, y, t) = a \cos \left\{ \frac{\omega^2}{g} (x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t + \varepsilon \right\} \dots\dots\dots [19]$$

Donde a es la amplitud de la onda, ω su frecuencia angular y ε su fase.

Véase ahora que la superficie libre puede ser interpretada como la suma de un número infinito de componentes sinusoidales de amplitudes, frecuencias y ángulos a_j , ω_j y θ_j aleatorios. La fase ε es también aleatorio, con distribución uniforme en el rango $-\pi < \varepsilon_j < \pi$ y su magnitud depende de la frecuencia y del ángulo. De esta manera, se puede describir el desplazamiento vertical de la superficie libre del mar debido a un oleaje irregular mediante el sumatorio:

$$\eta(x, y, t) = \sum_j a_j \cos \left\{ \frac{\omega_j^2}{g} (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j) - \omega_j t + \varepsilon_j(\omega_j, \theta_j) \right\} \dots\dots\dots [20]$$

La energía total del oleaje por unidad de área horizontal, promediada en el tiempo, expresada en función de la frecuencia angular de las ondas componentes, ω , se representa mediante la función de densidad espectral del desplazamiento vertical de la superficie libre o espectro del oleaje, $S(\omega)$.

Una vez generado el oleaje por el viento, se propaga hacia la costa con su propia energía, por lo que en general en un punto determinado la superficie libre del mar estará perturbado por el oleaje generado localmente por el viento (sea) y por el oleaje que se ha propagado hasta dicho punto procedente de otras zonas de generación (swell), en ocasiones, es posible observar grandes olas de fondo propagándose en dirección contraria al viento y al oleaje generado por el viento. Cuando el mar de fondo se mezcla con el mar de viento, es difícil identificarlos en el registro de la superficie libre. Sin embargo, quedan claramente separados en el espectro.

Debido a que las olas no se mueven siempre en la misma dirección que el viento, la energía del oleaje representada en el espectro es la suma de la energía propagándose en muchas direcciones. Por lo tanto, se hace necesario considerar la función de densidad espectral $S(\omega, \theta)$, que representa la energía total por unidad de área horizontal, promediada en el tiempo, existente en cada intervalo de frecuencia ($\Delta \omega$) y en cada intervalo de dirección ($\Delta \theta$). Si la energía por unidad de área total del oleaje, promediada en el tiempo, en el recinto ($\Delta \omega, \Delta \theta$) se representa por $\frac{1}{2} \rho g a_j^2$ donde a_j es una variable aleatoria positiva, entonces se puede escribir, ignorando el factor ρg :

$$S(\omega, \theta) \Delta \omega \Delta \theta \cong \frac{1}{2} a_j^2 \dots\dots\dots [21]$$

El promediado temporal de la energía total de las olas de todas las frecuencias y dirección de un oleaje dado por:

$$\sum_{\Delta \omega} \sum_{\Delta \theta} \frac{1}{2} a_j^2 \cong \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} s(\omega, \theta) d\omega d\theta \dots\dots\dots [22]$$

Esta ecuación es la base de la descripción estocástica del oleaje

2.3.3 PARÁMETROS ESPECTRALES

Al observar un registro de oleaje, se intuye la necesidad de reducir los datos a una forma más compacta y comprensible. El espectro es una de las maneras más genéricas de describir las propiedades del oleaje irregular, representando como se reparte la energía sobre un rango de frecuencias y direcciones. El espectro del oleaje contiene gran cantidad de información que puede ser representada mediante la introducción de una serie de parámetros que sirven para conocer las características principales de dicho espectro. Algunos de estos parámetros espectrales aparecen frecuentemente en las funciones de distribución estadísticas asociadas al oleaje.

2.3.4 TRANSFORMACIÓN Y DEFORMACIÓN DEL ESPECTRO A CAUSA DE LOS PROCESOS DE PROPAGACIÓN

Desde aguas profundas hasta el punto de rotura, el oleaje sufre una serie de cambios debido la variación de la batimetría, algunos procesos importantes de esta transformación se describen dentro de este apartado, diferenciando cuales ocurren en aguas intermedias y someras.

Cuando la profundidad es mayor a un medio de la longitud de onda, el oleaje se encuentra en profundidades indefinidas o en aguas profundas si aun tocar fondo. Cuando las olas entran a una profundidad menor, se producen cambios en la altura, longitud y dirección de propagación, por lo que el cambio se considera espectral.

A medida de que las olas se aproximan a aguas someras se observa un cambio en la altura y longitud de onda el llamado fenómeno de someramiento que provoca el peraltamiento de la ola. Cuando la profundidad del agua es aproximadamente igual a la altura de la ola, el perfil deja de ser estable, pues la velocidad orbital de las partículas de agua es mayor a la velocidad de avance del frente, produciéndose la rotura y disipando la mayor parte de la energía transportada.

2.3.5 MODELOS APLICADOS A PROPAGACIÓN

A medida de que el oleaje se aproxima hacia la costa, el efecto del fondo comienza a percibirse, como consecuencia de esta interacción el oleaje se transforma. Estos procesos se traducen en variaciones de la altura y dirección de propagación, lo que implica fenómenos importantes cerca de la costa utilizada para fines ingenieriles: procesos como la refracción y someramiento, debido a la batimetría y las corrientes, difracción y reflexión, como consecuencia a obstáculos de cabos o islas, y disipación de energía por efecto de roturas son solo unos factores de los tantos que se deben de tomar en cuenta.

En aguas someras, la amplitud de las olas aumenta mientras que la longitud de onda se reduce, generando un peraltamiento de la geometría de la ola, en esta profundidad la celeridad de onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad, de manera que la cresta de la ola viaja a mayor velocidad produciendo la rotura del oleaje, que genera una gran pérdida de energía y gran turbulencia.

Antiguamente se aplicaban métodos poco eficientes, técnicas de trazado o métodos semigráficos basados principalmente en la *Ley de Snell*, se trata de la *Teoría del Rayo*, que estudia específicamente el fenómeno de refracción y el someramiento de una onda sinusoidal simple, propagándose sobre líneas batimétricas

paralelas, a pesar, de que en su tiempo fue una técnica sencillamente ilustrativa, en la actualidad a quedado obsoleta debido a sus múltiples limitaciones, una de las más importantes es en la aplicación de casos reales con batimetrías muy irregulares, se encuentra limitada cuando se trata de fondos variables.

El objetivo de la propagación consiste en aproximar el oleaje desde aguas profundas hacia la costa y así evaluar la variabilidad del potencial energético de oleaje en la costa. La batimetría de las zonas de estudio y la orientación de la costa respecto a oleaje incidente es particular para cada caso.

Los modelos numéricos de propagación de ondas intentan modelar la transformación que sufre el oleaje en su viaje hacia la costa. Los diferentes tipos de modelos numéricos existentes, dependen de las ecuaciones que se utilicen para modelar el problema y del esquema numérico empleado, que implica una serie de limitaciones en los fenómenos que son capaces de simular.

Siguiendo la necesidad para obtener un buen pronóstico del oleaje desde aguas profundas, se emplearon esfuerzos por modelar matemáticamente la propagación del oleaje en fondo variable, existen diferentes caminos para resolver este problema la teoría más adecuada para abordar esta complicación es por medio de la teoría lineal, que ha demostrado ser la más efectiva para la transformación del oleaje a aguas someras, Dingemans (1997). Especialmente la solución elíptica de está es la que incluye los procesos importantes de difracción, disipación de energía, someramiento, transmisión y reflexión.

Uno de los problemas en la simulación numérica de estos fenómenos es, sin duda, la reducción del dominio computacional. En general, el dominio del fluido se extiende al infinito en las direcciones horizontales.

Algunos modelos de elementos finitos propuestos por Mei (1983) y desarrollados por Tsay And Liu (1983), Kostense(1986), aproximan la batimetría y representan la región exterior al dominio computacional por una profundidad constante. De esta manera es posible describir el dominio computacional. Las ondas dispersas tienen que satisfacer la condición de radiación en el infinito y ellas pueden ser descritas por una serie de Fourier-Bessel, o utilizando elementos infinitos.

Es necesario reducir el dominio computacional a un óptimo y por tanto, el dominio del fluido será truncado a alguna distancia del área de interés por fronteras artificiales. Para obtener un problema bien planteado, es necesario programar condiciones sobre dichas fronteras, que simulen el comportamiento de la parte exterior del dominio del fluido, para problemas con superficies libres. Tales como, la propagación de ondas gravitatorias en el mar, se requiere, que las ondas superficiales al aproximarse a una frontera artificial sean totalmente transmitidas en la frontera, y no origine reflexión de ondas.

Usualmente la frontera artificial es colocada suficientemente lejos del área de interés en el modelo, de manera que la imprecisión de tales condiciones no afecte a los resultados en esta área, sin embargo, ello aumenta notablemente el costo computacional.

Muchas investigaciones han desarrollado aproximaciones parabólicas de diferentes órdenes con condiciones de fronteras locales, para el cálculo de ondas dispersas del fluido, (Dalrymple 1992). Tales aproximaciones son fácilmente implementadas en códigos de diferencias finitas o elementos finitos, pero debido a que ellas caracterizan a ondas salientes que viajan con una dirección predominante, solo las componentes de las ondas que viajan en esa dirección son absorbidas totalmente, hecho que hizo notar (Kirby 1989). Con el aumento del orden de la derivada respecto a la componente lateral, tales aproximaciones pueden acomodar

ondas salientes con una gran apertura, la cual todavía es limitada y puede ser problemática en dominios de forma compleja.

2.4 TEORÍA LINEAL

La teoría lineal o primer orden en el régimen de Stokes, tiene múltiples ventajas para su aplicación en el cálculo del oleaje, se trata de la teoría más sencilla, debido a que con su carácter lineal es posible eliminar los términos no lineales facilitando la obtención de soluciones analíticas sencillas, puede utilizarse como base para encontrar otras soluciones posibles por superposición.

Para resolver el problema de flujo, es necesario establecer tanto su ecuación de gobierno como las condiciones de frontera a los que va a estar sometido dicho fluido. Aceptando las hipótesis de que se trata de un fluido homogéneo, incomprensible e irrotacional, la conservación de la masa se puede definir a través de la ecuación de Laplace, ésta es la ecuación a resolver con sus correspondientes condiciones de contorno.

La teoría de ondas de pequeña amplitud es la teoría de oleaje más simple que existe, esta es esencialmente una teoría lineal, los términos de inercia convectivos no lineales son considerados pequeños. Esta hipótesis es extremadamente conveniente porque la elevación de la superficie libre puede ser despreciada *a priori* y tal solución es válida no obstante que el movimiento del oleaje sea diferente de cero.

Para esto la ecuación de gobierno que se debe de resolver, como se mencionó antes es la de Laplace solo considerando dos dimensiones:

$$\nabla^2\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{en } 0 \leq \bar{x} \leq L; -h \leq z \leq 0 \dots\dots\dots[23]$$

Planteando las fronteras:

- Condición de contorno cinemática en un fondo horizontal, $\nabla_n h = 0$ se reduce a:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = -h \dots\dots\dots[24]$$

- La condición de contorno dinámica en la superficie libre

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} - g\eta = 0 \quad \text{en } z = 0 \dots\dots\dots[25]$$

- La condición de contorno mixta en la superficie libre

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = 0 \dots\dots\dots[26]$$

- Las condiciones de contorno laterales

$$\Phi(\bar{x}, z, t) = \Phi(\bar{x} + L, z, t)$$

$$\Phi(\bar{x}, z, t) = \Phi(\bar{x}, z, t + T)$$

De esta forma la incógnita queda en términos del potencial Φ

2.5 ECUACIÓN DE LA PENDIENTE SUAVE (MILD SLOPE ECUATION)

Algunos problemas teóricos se solucionan por medio de modelos numéricos, en ocasiones es necesario el uso de aproximaciones parabólicas, estas se encuentran entre la brecha de los modelos de difracción no lineal y la ecuación de la *Mild Slope*. El modelo se puede utilizar de varias formas, dependiendo de su aplicación. La forma hiperbólica para aplicaciones en tiempo variable y la forma elíptica, para los problemas estacionarios.

Los modelos de propagación de oleaje basados en la ecuación de la *Mild Slope* han encontrado una gran aplicación en la ingeniería de costas y puertos, los resultados de dicho modelo, están influenciados por fronteras rígidas artificiales, estas contienen ondas dispersas originadas o modificadas por la batimetría o por otras fronteras que producen reflexión. Fue originalmente desarrollada por Berkhoff (1972).

El desarrollo de la versión modificada, Silva et al. (2002), supone flujo incomprensible, homogéneo e irrotacional sobre un fondo $h(x, y)$, siendo X e Y las coordenadas cartesianas horizontales. La coordenada vertical, Z , es positiva hacia arriba y el nivel $Z=0$ se encuentra en el nivel medio del mar.

La ecuación de gobierno, Laplaciano, es:

$$\nabla_h^2 \Phi + \frac{\partial \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad -h(x, y) \leq z \leq 0 \dots \dots \dots [27]$$

Donde $\Phi(x, y, z, t)$ es el potencial de velocidades que describe el flujo, t es el tiempo y $\nabla_h = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$.

Las condiciones de frontera son similares a las utilizadas en teoría lineal, esto es,

Condiciones dinámica y cinemática de la superficie libre

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad z = 0 \dots \dots \dots [28]$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad z = 0 \dots \dots \dots [29]$$

Condición de impermeabilidad en el fondo

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \nabla_h h \cdot \nabla_h \Phi = 0 \quad z = -h(x, y) \dots \dots \dots [30]$$

La presión, p , es dada por la ecuación linealizada de Bernoulli

$$p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} + gz \right) \quad -h \leq z \leq 0 \dots \dots \dots [31]$$

Empleando el método de separación de variables, el potencial de velocidades se descompone en:

$$\Phi(x, y, z, t) = \varphi(x, y, t)M(z) \dots \dots \dots [32]$$

Donde:

$$M(z) = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \dots\dots\dots [33]$$

- φ Amplitud compleja
 h profundidad
 K numero de onda, obtenido a partir de la siguiente relación de dispersión Losada et al. (1996)

$$\sigma^2 - gk \tanh(kh) = 0 \dots\dots\dots [34]$$

Una forma de resolver este problema en el que las variables independientes es el potencial de velocidades es aplicando la segunda identidad del teorema de Green a $M(z)$ y $\Phi(x, y, z, t)$, haciendo las operaciones y sustituciones correspondientes se llega a la forma básica de la ecuación modificada de la pendiente suave (Silva et al. 2002).

$$\nabla_h \cdot (I_1 \nabla_h \phi) + (k^2 I_1 + r(h))\phi = 0 \dots\dots\dots [35]$$

Para considerar la pérdida de energía a la ecuación se le incorpora un término disipativo, quedando:

$$\nabla_h \cdot (I_1 \nabla_h \phi) + (k^2 - i\sigma W)I_1 + r(h)\phi = 0 \dots\dots\dots [36]$$

- W término disipativo
 σ Frecuencia angular
 T período
 H_B altura de ola de rotura

A pesar de su confiabilidad la principal desventaja de este modelo es que requiere esfuerzos computacionales muy grandes, y la inclusión de las condiciones de frontera suele ser complicada, para resolver este problema se han hecho varias versiones con aproximaciones hiperbólicas y parabólicas.

2.5.1 MODELO DE PROPAGACIÓN REF/DIF

En los últimos años, ha crecido la necesidad de mejorar la capacidad de predicción en los métodos tradicionales de refracción, esto conduce a desarrollar varias técnicas para el uso de modelos que incluyen la combinación de refracción y difracción.

Entre estos métodos, la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave presenta un particular atractivo para el estudio de la propagación de ondas en zonas costeras, esta debido a que ha arrojado los resultados más certeros hasta el momento. En este caso la limitante más importante para su aplicación está relacionada con el ángulo de dirección de propagación y alineación de la malla de cálculo.

Este método fue desarrollado originalmente por Radder (1979) y Liu & Lozano (1980) después de haber sufrido una modificación posterior en el sentido de incluir efectos tales como la disipación (Darlymple et al, 1984) y las ondas de interacción, cadenas (Boijj; Liu 1983; Kirby, 1984). Los resultados de los modelos basados en estas ecuaciones se compararon con los datos de laboratorio (Tsay y Liu, 1982) y datos de campo (Liu y Tsay 1984) y ha demostrado una buena concordancia Liu y Tsay (1983), también desarrollo un esquema iterativo para la inclusión numérica de los pequeños efectos de reflexión.

Esta versión parabólica de la Ecuación de la pendiente suave, se amplía con el segundo orden de Stokes por Yue Mei(1980), Kirby y Dalrymple (1983) y Liu Tsay (1984). Otras características importantes tales como la no-linealidad (Kirby y Dalrymple, 1986a), el surf (Kirby & Dalrymple, 1986b) y mayores aproximaciones de orden son capaces de modelar ángulos mayores de propagación que fueron introducidos por Kirby y Dalrymple al modelo REFDIF.

Los datos de entrada del modelo son mallas batimétricas en formato GRD text grid, las condiciones del oleaje (altura y dirección de las olas en las condiciones de contorno, el período de ola en segundos, las mareas (opcional) y la amplitud de las olas). La principal desventaja computacional es la necesidad de 5 datos de longitud de onda para resolver una ola, por lo tanto, dada la densidad de datos REF/DIF normalmente se aplica a regiones pequeñas (del orden de kilómetros). Otra desventaja es que no modela campos de olas crecientes (Andrew,1999).

2.5.2 ECUACIONES BASE DEL REF/DIF

El modelo REF/DIF ha sido desarrollado para aplicaciones prácticas, su base, como se mencionó anteriormente es la ecuación Mild Slope, el modelo actual fue desarrollado por Kirby (1984), que se puede describir como:

$$\frac{D^2\varphi}{Dt^2} + \nabla \cdot U \frac{D\varphi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g)\varphi = 0 \dots \dots \dots [37]$$

Donde φ es el potencial de velocidades de la superficie libre del agua

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \nabla \dots \dots \dots [38]$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \dots \dots \dots [39]$$

$$U = (U_{(x,y)}, V_{(x,y)}) \dots \dots \dots [40]$$

$$C = \frac{\sigma}{k} \dots \dots \dots [41]$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \dots \dots \dots [42]$$

Se incluyen en el modelo varias funciones adicionales con el fin de aumentar el rango de aplicaciones y precisión:

- *Rotura*

El modelo comprueba si la altura de la ola local supera el umbral, esto es si la relación $h/d=0.78$, cuando se llega a exceder este valor, el flujo de energía de rotura del oleaje sufre una disminución, esta con el fin de eliminar la energía del tren de ondas.

- *Mecanismos de amortiguación de la onda*

Además del fuerte mecanismo de la rotura de la ola, REF/DIF ofrece al usuario tres mecanismos de amortiguación del lecho marino. Estos son: a) amortiguación laminar de la capa límite, b) amortiguación por filtración en el lecho marino, c) amortiguación turbulenta de la capa límite.

- *Onda no lineal*

Este tiene un fuerte efecto sobre la velocidad de fase, por lo tanto pueden modificar significativamente tanto la refracción como la difracción. Por ejemplo, las ondas en una playa con poca pendiente refractan más lentamente que lo previsto en teoría lineal, ya que aumenta la altura con respecto a la profundidad del agua, disminuyendo la velocidad del frente de ola, directamente proporcional a la profundidad, lo que provoca un oleaje más lento. La velocidad de fase es mayor mientras exista una mayor amplitud, en la zona iluminada la velocidad de fase es mayor debido a una gran amplitud en comparación a la zona de sombra donde la amplitud es baja, esto provoca una curvatura de las ondas de refracción en el área de sombra.

El modelo está diseñado para predecir la propagación de una onda monocromática en aguas intermedias, incluye efectos de la no linealidad como se predijo la teoría de Stokes de tercer orden (Kirby y Dalrymple 1983). Dado que el modelo es a menudo usado para predecir la altura de ola en la zona de rompiente abarcando hasta la zona de swash, tiene que ser corregido para evitar las singularidades derivadas de la teoría de Stokes en aguas poco profundas. Al fin de proporcionar una corrección al modelo en el límite de aguas poco profundas, Kirby y Dalrymple (1986b), proporcionaron un algoritmo que da una revisión entre la teoría de Stokes y una modificación lineal desarrollada por Hedges (1976).

2.5.3 OLUCA-UNAM Y MWAPO3

La ecuación modificada de pendiente suave, se programó en lenguaje fortran 77 este programa se le dio el nombre de WAPO4, por sus siglas en ingles Wave Propagation On the Coast y la cuarta versión, para facilitar el manejo de este programa se creó la versión MWAPO_V4 el cual genera archivos de entrada para el programa OLUCA-UNAM (versión modificada del Ref-Dif), Kirby y Dalrymple, 1996) y ejecutarlo de forma automática.

El programa OLUCA-UNAM (propagación del oleaje monocromático y espectral) resuelve, a través de una aproximación parabólica, la ecuación modificada de la pendiente suave y por ende a diferencia del modelo WAPO4 no considera los efectos de reflexión y tiene limitaciones en cuanto a los efectos de la difracción, permite la propagación del oleaje en batimetrías y/o donde los efectos de difracción tienen importantes irregulares. No obstante lo anterior y en virtud que el programa OLUCA-UNAM es substancialmente más rápido que el WAPO4, para cuando se quiere llevar el oleaje a aguas intermedias (a través de una malla de aproximación) resulta muy conveniente su empleo.

El programa WAPO4 tiene la función de generar y resolver el sistema de ecuaciones para estimar los potenciales de velocidades locales a lo largo y ancho de una malla computacional. La malla se construye con la ayuda del programa BWAPO4 y datos específicos que deben de darse en un fichero de condiciones iniciales. La información necesaria para ejecutar los programas se introducen a través de una serie de ficheros de entrada y los resultados se escriben en una serie de programas de salida.

2.6 DESCRIPCIÓN DEL MODELO WAM

El WAM (Wave Model) es un modelo numérico utilizado para estimar las condiciones de oleaje generadas por la acción de viento. Fue desarrollado por un amplio grupo de investigadores de diferentes institutos que forman el WAMDI GROUP 1988, (Wave Model Development and Implementation Group) a partir del proyecto *Sea Wave Modelling Project* (SWAMP). El modelo integra la ecuación básica de transporte, que describe la evolución de un espectro bidimensional de energía de oleaje con respecto a la frecuencia y la dirección del oleaje sin hacer ninguna presunción inicial sobre la forma del espectro.

Este modelo resuelve la ecuación de transporte de energía mediante el siguiente método de solución implícita:

$$\frac{dF}{dt} + \frac{\partial}{\partial \phi_w} (\phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda_w} (\lambda F) + \frac{\partial}{\partial \theta_w} (\theta F) = S \dots \dots \dots [43]$$

Donde:

$F(f^*, \theta_w, \phi_w, \lambda_w)$: es la función de densidad espectral que tiene como variable dependiente f^* θ_w =dirección de propagación del oleaje ϕ_w =latitud y λ_w =longitud, t =tiempo

El resultado del método es el término S que simboliza un parámetro tanto de fuente como de sumidero de la energía de las olas e incluye los efectos producidos por el aporte de energía del viento (S_{in}), las interacciones no lineales entre las olas (S_{nl}) y la disipación de la energía por rotura (S_{ds}), esto se representa de la siguiente forma:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \dots \dots \dots [44]$$

Janssen (1989) definió el término de generación y disipación del oleaje de energía (S_{in}) de la siguiente forma:

$$S_{in} = \beta F \dots \dots \dots [45]$$

Donde F es la función de densidad espectral y β es la función que relaciona el crecimiento exponencial de la energía del oleaje relacionada con la energía del viento.

2.6.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO HURAC

El modelo de segunda generación HURAC desarrollado por Silva et al. (2002), tiene como fundamentos los modelos Hydromet-Rnakin Vortex de Holland (1980) y Bretchsneider (1990), este modelo se descompone en tres submodelos que describen los campos de presión, viento y oleaje que se describirán en seguida.

1. Submodelo presión atmosférica

El modelo obtiene los valores del campo de presión mediante la siguiente ecuación:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) e^{(R/r)} \dots \dots \dots [46]$$

Donde:

P_0 = Presión que se encuentra en el centro del huracán

P_r = Presión a una distancia radial r

P_N = Presión Normal

R= Radio de vientos ciclos tróficos Máximos

Nota: las medidas se encuentran en milibares y kilómetros

2. Submodelo de velocidad de viento

Para la estimación del viento se calculan los gradientes máximos de la velocidad del viento y la velocidad alcanzada a la altura de diez metros sobre el nivel del mar.

La siguiente ecuación describe y calcula el gradiente máximo del campo de viento de un ciclón estacionario (U_R):

$$UR = 21.8 (P_N - P_0)^{1/2} - 0.5 fR \dots \dots \dots [47]$$

En la cual:

f = parámetro de Coriolis ($f = 2\omega \sin \phi$)

ω = velocidad angular

ϕ = es la latitud en grados

La velocidad para un ciclón en movimiento y una distancia r medida desde el centro del ciclón es:

$$W = 0.886 (F_V U_R + 0.5 V_F \cos(\theta + \beta)) \dots \dots \dots [48]$$

Donde:

$(\theta + \beta)$ = ángulo de total entre la velocidad de traslación

U_R = velocidad del viento a una distancia radial desde el centro del ciclón

F_V = factor de amortiguamiento (relación de movimiento en r, U_R y U_r), este es aproximado con lo siguiente:

Cuando $r/R < 1$:

$$F_V = 1 - 0.971 e(-6.826(\frac{r}{R})^{4.798}) \dots \dots \dots [49]$$

Cuando $r/R > 1$:

$$F_V = \text{Exp}(A \text{Ln}^3(\frac{r}{R})) \text{Exp}(B \text{Ln}(\frac{r}{R})) \dots \dots \dots [50]$$

Donde:

$$A = -0.99*(1.066 - e^{(-1.936NC)})$$

$$B = -0.357(1.4456 - e^{(-5.2388 NC)}) \dots \dots \dots [51]$$

3. Submodelo de oleaje

Para obtener la altura de la ola significativa en un ciclón estacionario, el submodelo de oleaje aplica la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.2887F_h \left(1 - \frac{6.69N_c}{1+10.3N_c-3.25N_c^2}\right) \dots\dots\dots[52]$$

$$\sqrt{R(P_N - P_0)} \left(1 + \frac{v_f \cos(\theta+\beta)}{2U_R F_V}\right)^2 \dots\dots\dots[53]$$

Donde Fh es aproximado a través de la siguiente relación:

Si $r/R < 1$:

$$F_h = \frac{1+0.8974\left(\frac{r}{R}-1\right)}{1+0.742\left(\frac{r}{R}-1\right)+0.07382\left(\frac{r}{R}-1\right)^2} \dots\dots\dots[54]$$

S $r/R > 1$:

$$F_h = \frac{1+0.8974\left(\frac{r}{R}-1\right)}{1+0.742\left(\frac{r}{R}-1\right)+0.07382\left(\frac{r}{R}-1\right)^2} - \frac{N_c\left(\frac{r}{R}-1\right)}{1+C\left(\frac{r}{R}-1\right)+\frac{N_c}{10}\left(\frac{r}{R}-1\right)^2} \dots\dots\dots[55]$$

Donde:

$$C = \frac{0.037N_c^{2.55}}{0.13+N_c^{2.55}} \dots\dots\dots[56]$$

Capítulo III

3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CLIMA MARÍTIMO

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental del presente capítulo es presentar en forma detallada los conceptos utilizados para realizar el análisis y caracterización del clima marítimo, que está basado en el análisis estadístico que dio como resultado el resumen del Atlas de oleaje en las costas mexicanas.

Dentro del intervalo de tiempo de un estado de mar, las propiedades estadísticas deben de obtenerse a partir de una muestra cuyo tamaño sea suficientemente grande para asegurar la bondad de los cálculos estadísticos.

De esta manera el registro continuo del oleaje se sustituye por una información estadística, discreta en el tiempo, correspondiente a un estado de mar. Dentro de cada uno las propiedades estadísticas del oleaje vienen definidas por los momentos estadísticos obtenidos del proceso estacionario y ergódico en lo que se denomina análisis del oleaje a corto plazo. La variación en el tiempo de los parámetros estadísticos de los estados de mar constituye lo que se denomina curva de estados de mar. La estadística que se realiza en la curva de estados de mar se denomina del oleaje a largo plazo o regímenes de oleaje.

Todos los estudios de largas series de datos de oleaje en aguas profundas provienen de programas de re-análisis, en la primera fase se aplicó el mismo método con datos tomados del National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Estos alimentaron al modelo WAM-HURAC. Los resultados analizados crearon los estado de mar en aguas profundas presentados en el Atlas de clima marítimo de las costas mexicanas Silva et al (2007), una vez conocido y caracterizado el régimen medio y extremal del oleaje, se traslada hacia la zona de interés, para ello deben ser propagados todos los estados de mar, esta se explicará a detalle en el capítulo IV . En este apartado, se da una pequeña explicación de cómo se realizó el régimen medio y extremal del clima marítimo en el Atlas de clima marítimo de las costas mexicanas.

3.2 GENERALIDADES ESTADÍSTICAS

Uno de los objetivos fundamentales de la realización de un análisis estadístico de la señal es obtener una serie de parámetros que sean representativos del estado de mar y que al introducirlos en las funciones de distribución teórica permitan la definición probabilística del parámetro y, en su caso, la recomposición, mediante simulación de una muestra temporal del proceso.

Dado que se asume que una variable del oleaje en un estado de mar es un proceso estacionario ergódico y gaussiano, dos parámetros estadísticos son suficientes para caracterizar probabilísticamente el proceso, los parámetros más empleados son de altura de ola y período. Estos parámetros estadísticos se pueden definir de diferentes maneras. Entre ellos, los más utilizados se describen a continuación.

3.2.1 ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE DE HS

La altura de ola significativa, H_s o $H_{1/3}$ es el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar. Surgió de la necesidad de establecer un parámetro estadístico que relacionará las alturas de ola obtenidas en el registro instrumental del oleaje y las establecidas a través de observación visual de un estado de mar.

A partir de un registro de oleaje del desplazamiento vertical de la superficie libre, la altura de ola significativa se define como la media aritmética del tercio de ola de mayor altura del registro es decir:

$$H_{\frac{1}{3}} = \sum_{i=1}^{\frac{N}{3}} \frac{H_i}{\frac{N}{3}} \dots \dots \dots [57]$$

Donde H_i es la serie de alturas de ola individuales del registro, ordenada de mayor a menor, y N es el número total de olas individuales del registro.

Existen otras formas alternativas de obtener aproximación al valor de H_s , una de ellas es por la relación existente en determinadas condiciones de oleaje entre momento espectral de orden cero m_0 y H_s

Altura de ola media cuadrática H_{rms} , es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las alturas de ola del registro:

$$H_{rms} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right]^{1/2} \dots \dots \dots [58]$$

Altura de ola máxima, H_{max} , es la altura de ola correspondiente a la mayo ola que se encuentre en un registro de N olas

Altura de ola media de las $1/n$ mayores olas, $H_{1/n}$, corresponde a la media aritmética de las N/n alturas de ola mayores del registro, la altura significativa es $H_{1/3}$ otros valores muy utilizados son $H_{1/10}$ y $H_{1/20}$

Período medio T_z es la media aritmética de los periodos, T_z del registro.

Período significativo, $T_{1/3}$ es la media aritmética de los $N/3$ periodos mayores del registro de N olas.

3.2.2 RÉGIMEN MEDIO

Es la distribución media de probabilidad, escalar o direccional, de un parámetro de estado de mar, normalmente formado por valores anuales, para su correcta caracterización suele ser suficiente tener series de oleaje de más de 5 a 10 años (series cortas a medias), aunque es preferible disponer de la mayor cantidad de datos posible. Coloquialmente el régimen medio de oleaje es el grupo de estados de mar que ocurren con mayor frecuencia.

El objetivo de ese análisis es representar las condiciones más frecuentes, puesto que su resultado es imprescindible para estudios de dinámica litoral.

Las formas teóricas para idealizar al oleaje se agrupan en modelos deterministas, paramétricos y estocásticos. Un modelo determinista se obtiene a través de relaciones físicas y no requiere datos experimentales para su desarrollo. El modelo paramétrico puede ser asimilado como un modelo determinista en la estimación de sus parámetros, al arrojar la misma salida a partir de la información suministrada.

A diferencia del anterior, el modelo estocástico tiene la propiedad de brindar resultados en un sentido estadístico. Esto significa que el dato de salida no es el mismo dato de entrada pero conserva las mismas características estadísticas.

Cuando se aplica un modelo, es necesario estimar sus parámetros, los cuales son función de los valores de la muestra, que no son más que observaciones de una variable aleatoria. Esto refleja en última instancia que el parámetro estimado es aleatorio y tiene asociada una distribución de probabilidad.

Cuando se obtiene el conjunto de datos de altura de ola y probabilidad de no excedencia, el paso siguiente consiste en la determinación de los parámetros de la función, estas técnicas se mencionan a continuación.

3.2.1 FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL OLEAJE

Bajo ciertas condiciones las variables asociadas al oleaje, consideradas como variables aleatorias, siguen unas distribuciones de probabilidad conocidas, en muchos de esos casos, los parámetros estadísticos obtenidos de los registros de dichas variables, permiten definir completamente las distribuciones estadísticas de los registros. De entre las variables del oleaje, las más utilizadas son el desplazamiento vertical de la superficie libre, la altura de ola y el periodo.

Si se sabe que el desplazamiento de la superficie libre es un proceso estacionario, ergódico y gaussiano, la distribución de densidad de la $\eta(t)$ es la siguiente:

$$f(\eta) = \frac{1}{\eta_{rms}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\eta^2}{2\eta_{rms}^2}\right] \dots\dots\dots [59]$$

Donde η_{rms} es el desplazamiento vertical medio cuadrático, de la superficie libre (que coincide con la varianza, ya que la media es nula).

Cuando tenemos una distribución muestral y la comparamos con la teórica, se origina un pequeño desfase, esta asimetría se expresa usualmente en términos de Sesgo, γ_1 , y Kurtosis γ_2 :

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma_\eta^3} = \widehat{m}_3 \dots\dots\dots [60]$$

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma_\eta^4} - 3 = \widehat{m}_4 - 3 \dots\dots\dots [61]$$

Donde μ_n y \widehat{m}_n son respectivamente los momentos centrales y normales de la distribución del desplazamiento vertical de la superficie libre.

El sesgo y la Kurtosis son característicos de la función de densidad que están relacionadas con la no linealidad, el sesgo es una medida de la asimetría vertical de la superficie libre, caracterizada por crestas cortas y peraltadas. Estas características del oleaje pertenecen a aguas someras. La kurtosis define

estadísticamente el apuntamiento de la distribución con respecto a la distribución normal. Si estos dos términos son cero entonces la distribución es normal.

3.2.2 RÉGIMEN EXTREMAL

La seguridad y la operatividad de una instalación en la costa pueden estar condicionadas por la acción del oleaje en situación de temporal, es decir en situaciones donde la altura de oleaje alcanza una intensidad poco frecuente. Con el fin de acotar el riesgo que corre una instalación, debido a la acción del oleaje, es necesario tener una estimación de la frecuencia o probabilidad con la que se presentan temporales que se superen una cierta H_s . Un régimen extremal de oleaje, es precisamente, un modelo estadístico que describe la probabilidad con la que se puede presentar un temporal de una cierta altura de riesgo. Los métodos más utilizados en este análisis son:

3.2.2.1 Método de la muestra total o método de la distribución inicial

El método parte de toda la información de oleaje registrada en un período determinado y se apoya en la función de distribución de probabilidad de no excedencia de un año climático medio (régimen medio). Existen distintas aproximaciones en función del tipo de datos de partida. Así, si de lo que se dispone es de información instrumental, se hace uso de la siguiente expresión:

$$\Phi(H_s) = [F(H_s)]^{n(H_s)} \dots\dots\dots [62]$$

Siendo Φ la ecuación extremal, $F(H_s)$ el régimen medio del oleaje y $n(H_s)$ el número de pruebas estadísticas en un año medio y definido como:

$$n(H_s) = \frac{T \cdot n}{t(H_s)} \dots\dots\dots [63]$$

Donde T es la duración real del año climático considerado, $t(H_s)$ es el tiempo total en que se supera un cierto valor de H_s y n es el número de veces que se excede ese valor.

3.2.2.2 Método de los valores pico

Es el más utilizado aunque requiere un conjunto de datos mucho más extenso en el tiempo, ya que los valores máximos registrados en un período de tiempo determinado, que puede ser de un año o bien el máximo de una acción de temporal. Se diferencian por tanto dos grandes grupos:

Método de los máximos anuales: Consiste en seleccionar tan solo el valor máximo anual de la altura de ola en cierto punto de la costa a lo largo de muchos años. Es decir, para cada año seleccionar la máxima altura de ola que se produjo. Si se hiciera durante muchos años, se conocería aproximadamente la probabilidad de superar cierta altura de ola.

Si se plantean las hipótesis de años independientes y cambios climáticos inexistentes o muy lentos (y ninguna otra) es un método estadísticamente coherente.

3.2.2.3 Método de la serie de duraciones parciales o método de los valores de pico (*POT, Peak Over Threshold*)

A diferencia del método anterior, con este se aprovecha toda la información disponible y puede hacer estimaciones más precisa. Además es un método más fiable que el de máximos anuales cuando la información disponible corresponde a un período inferior a 20 años, como sucede en este caso.

El método POT se basa en suponer que los máximos que superan un cierto umbral y que están separados por un cierto intervalo de tiempo son independientes entre sí. Esto implica que si en un año ha habido temporales muy importantes no es a causa de que los sucesos extremos tiendan a concentrarse en ciertos años si no que esta concentración ha sido por azar. Si los temporales son independientes, el hecho de que en un año haya habido un gran temporal no significa que la probabilidad de que ese mismo año existieran otros temporales importantes sea mayor (o menor), aceptada la hipótesis, la muestra a analizar estará constituida, pues, por lo máximos locales o bien los picos temporales que superen un determinado umbral de altura (H_0). En cualquier caso, los máximos seleccionados deben cumplir la condición de independencia. Para este método se define el número medio de temporales al año (λ) como la relación entre el número total de temporales registrados (N_T) y el tiempo efectivo de medida (T_{ef}):

$$\lambda = \frac{N_T}{T_{ef}} \dots\dots\dots [64]$$

3.3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS

3.3.1 PROBABILIDAD ANUAL DE EXCEDENCIA

La probabilidad de que el mayor temporal ocurrido en un año tenga una H_s superior a un cierto valor H_a preestablecido está dado por la expresión.

$$P_a(x) = 1 - e^{-\lambda(1-F_w(H_a))} \dots\dots\dots [65]$$

Donde λ es el número medio de temporales ocurridos en un año, y F_w es la distribución Weibull de excedencias cuya expresión es:

$$F_w(H_a) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_a - \alpha}{\beta}\right)^\gamma\right) \dots\dots\dots [66]$$

Los valores de los parámetros, α , β y γ se proporcionan en la sección de resultados.

3.3.2 PROBABILIDAD CONJUNTA

Uno de los análisis que es considerable aplicar en un estudio a largo plazo, es la distribución probabilidad conjunta, éste se forma a partir de los datos de altura de ola significativa (H_s) y el período medio (T_m). En ocasiones tiene un mejor resultado utilizar el período significativo T_s o el período pico espectral T_p , esto debido a que el período medio se considera menos estable estadísticamente

Esta distribución de altura de ola significativa y período medio se logró clasificando los valores del registro en marcas de clase con intervalos de 0.5 por sector, se determino posteriormente el período medio y finalmente se cálculo la frecuencia de ocurrencia de estas características.

3.3.3 ROSAS DIRECCIONALES

La forma más práctica de representar, la dirección de propagación del oleaje y del viento, es por medio de gráficos concéntricos, que permite visualizar las intensidades y frecuencias de parámetros del oleaje y velocidades de viento. En una rosa el ancho de las clases indica la magnitud del fenómeno, mientras que su longitud indica la frecuencia con que aparece.

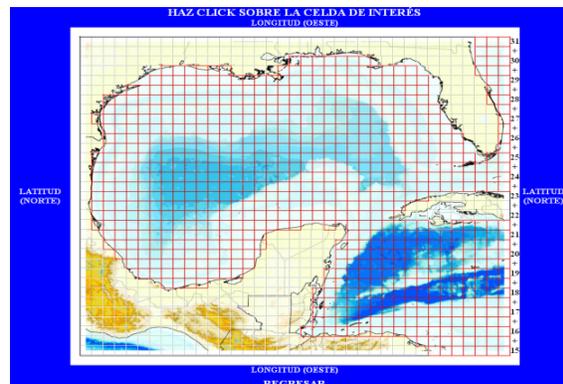
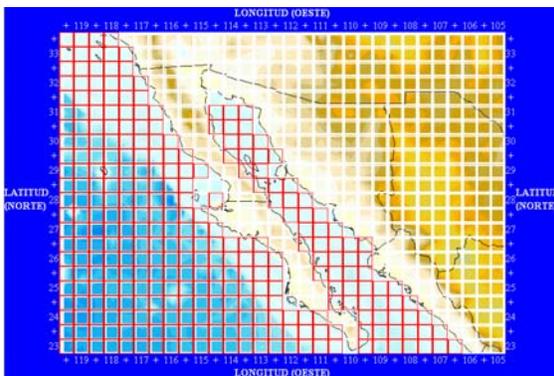
La elaboración de estas rosas, consisten en clasificar principalmente las direcciones de propagación, evaluando la frecuencia con la que se presenta cada una. Al dibujarlos se representan por medio de “áreas en forma triangular”, indicando la escala concéntrica de la intensidad y dirección.

3.3.4 HISTOGRAMA

Un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, se utiliza para variables continuas o discretas, con un gran número de datos, agrupados en clases. En el eje de las abscisas se construyen unos rectángulos que tienen por base la amplitud del intervalo, y por altura, la frecuencia absoluta de cada intervalo. En el análisis del Atlas se cuantificaron el número de eventos en escalas de tiempo mensual y anual. Para la caracterización energética se determinó la energía asociada a cada suceso y se desarrolló la clasificación de la misma manera que para la altura de ola, se presentan los histogramas contra el número de ocurrencias.

3.4 ATLAS DEL CLIMA MARÍTIMO DE LAS COSTAS MEXICANAS

Como se mencionó anteriormente este Atlas fue creado a partir de un re-análisis de la base de datos NCEP/NCAR. El número total de celdas es de 1170 y 817, respectivamente. En la [Figura 2](#) se muestran las mallas de trabajo para los litorales Atlántico y Pacífico. En la [Figura 2](#) se muestran las mallas de trabajo para los litorales Atlántico y Pacífico.



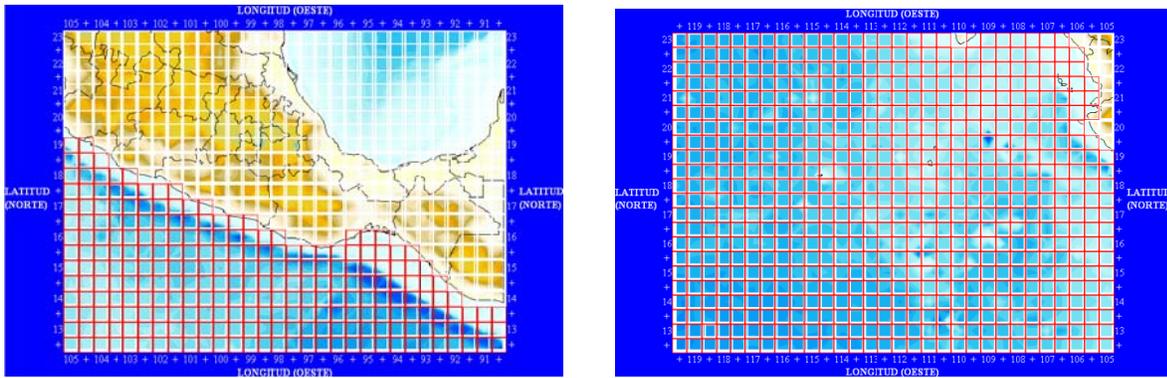


Figura. 2 Mallas de trabajo del Atlas del clima marítimo de las costas mexicanas

Cada celda está conformada por datos de información que proporcionan, mes, día hora velocidad del viento (m/s), dirección del viento (grados), altura de ola significativa (m), dirección de propagación (grados), período (s), número consecutivo del registro.

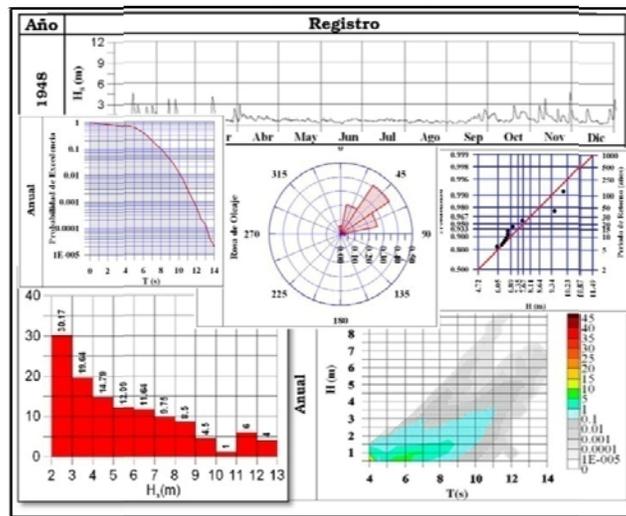


Figura. 3 Representación gráfica de los análisis del atlas

Se toma como ejemplo la celda perteneciente a la costa de Mazatlán que se encuentra entre las coordenadas 106.5 Longitud y 23 Norte, cada una contiene un resumen de los análisis que se mencionaron en este capítulo, los cuales presentan gráficas de probabilidad de excedencia, probabilidad conjunta, rosas de direcciones, histogramas con donde se presentan tormentas normalizadas por mes y años, alturas de ola significativa y evolución temporal de la altura de ola significativa (Figura. 3).

Se mencionan algunos de los análisis que se pueden encontrar en el resumen del clima marítimo. Se presentan de forma anual y desglosada por estaciones cada uno de los siguientes Análisis:

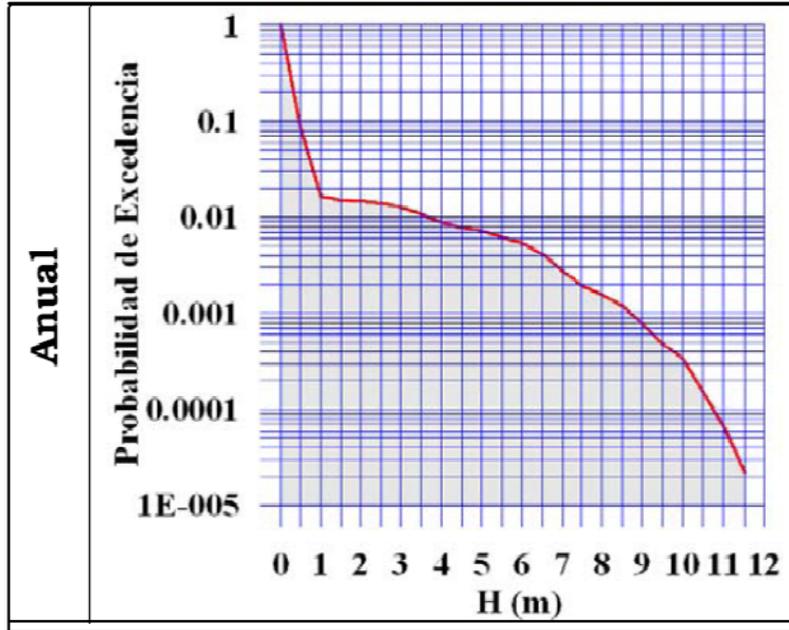


Figura. 4 Probabilidad de excedencia de alturas de ola significante

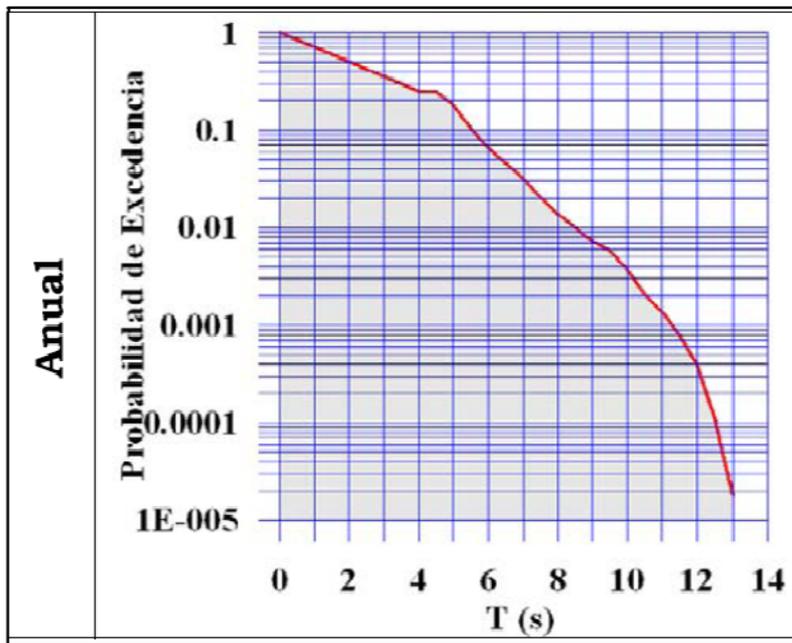


Figura. 5 Probabilidad de excedencia de períodos medio de ola

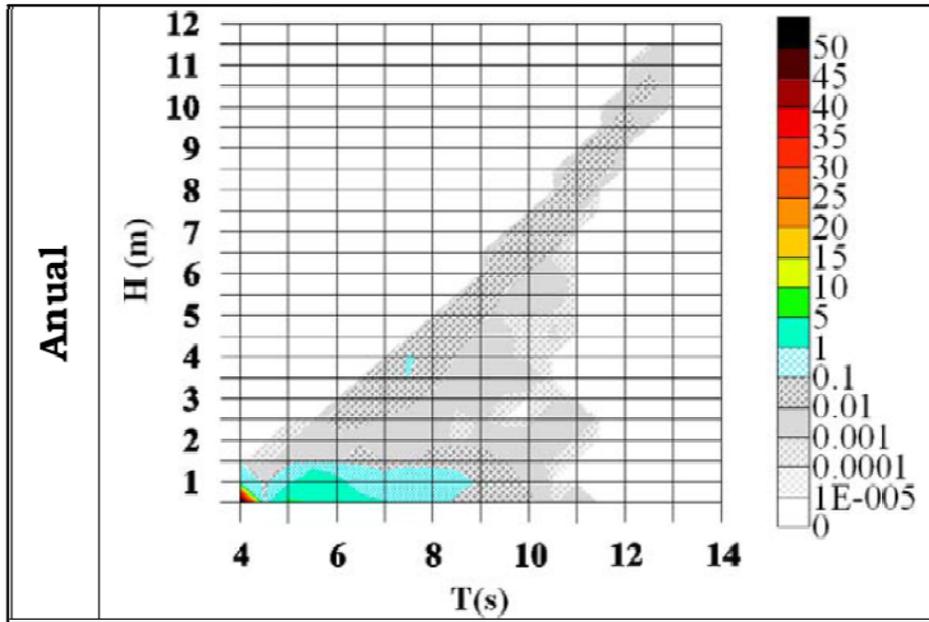


Figura. 6 Probabilidad conjunta altura de ola significativa y período medio de ola

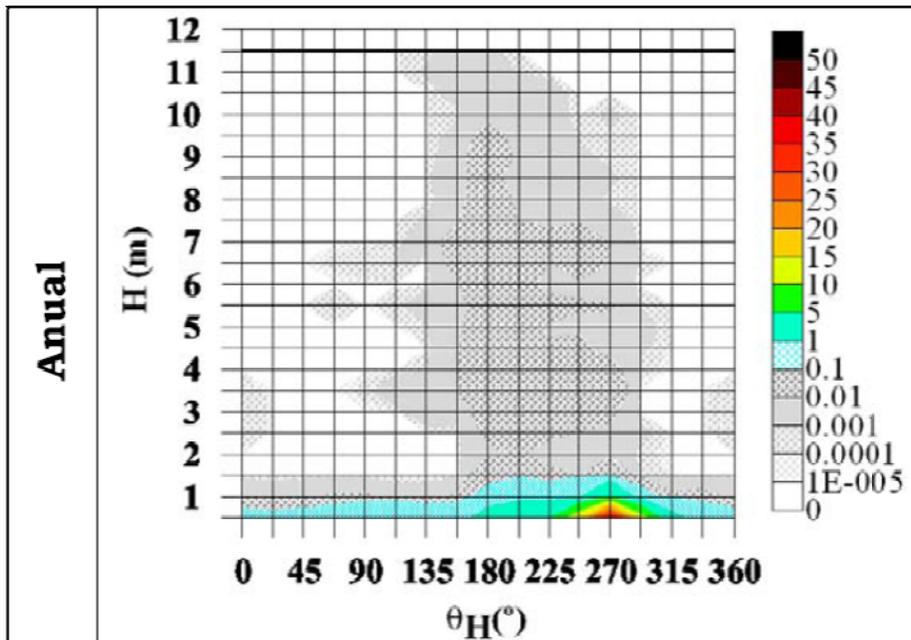


Figura. 7 Probabilidad conjunta altura de ola significativa y dirección de propagación

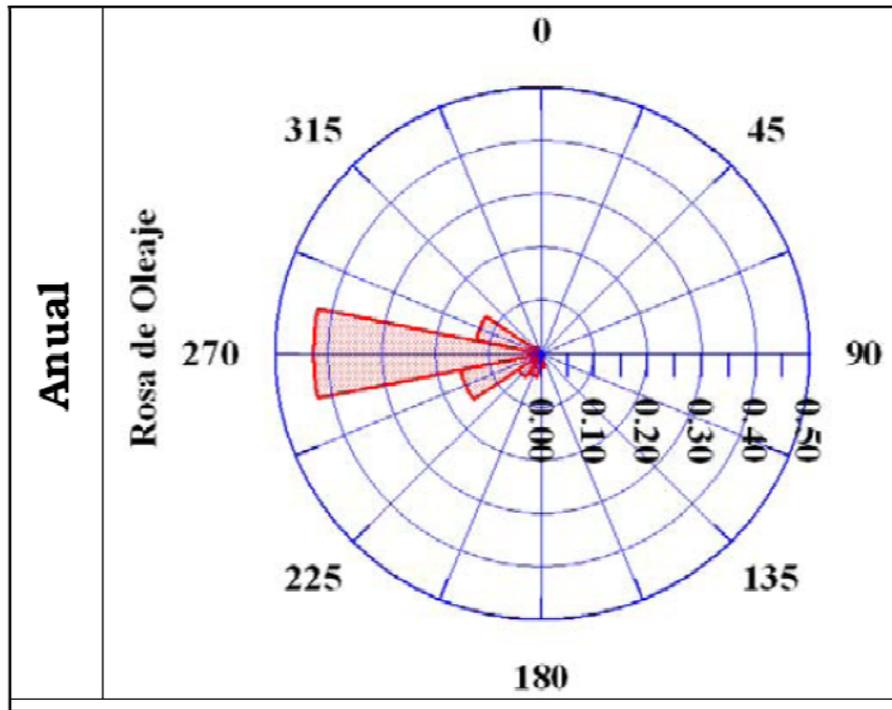


Figura. 8 Rosa de oleaje

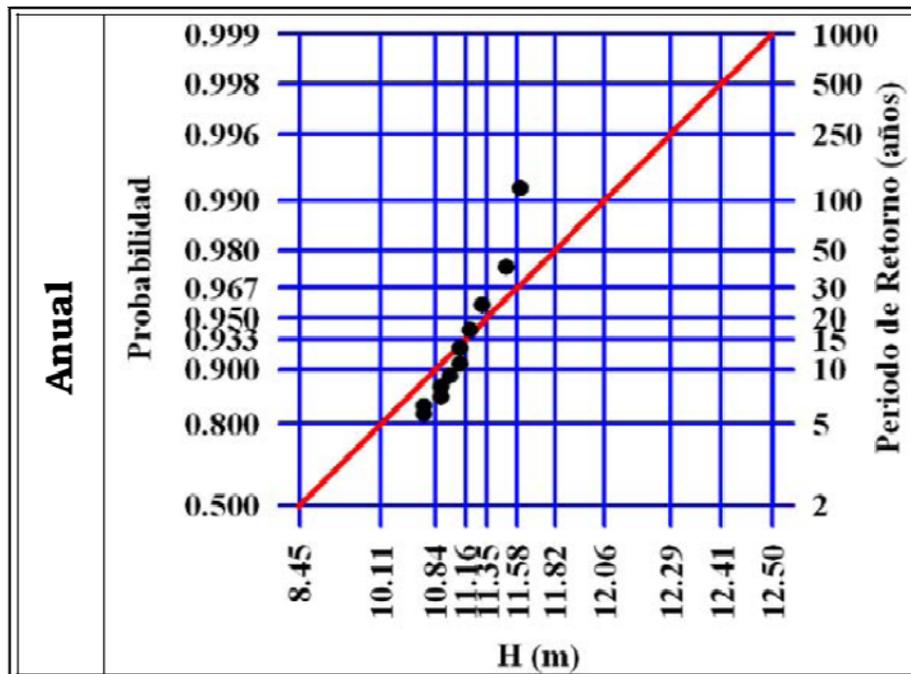


Figura. 9 Régimen extremal de alturas de ola significativa

Análisis de viento:

- Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos
- Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia
- Rosa de vientos
- Régimen extremal de velocidades de viento sostenido

Análisis de tormentas:

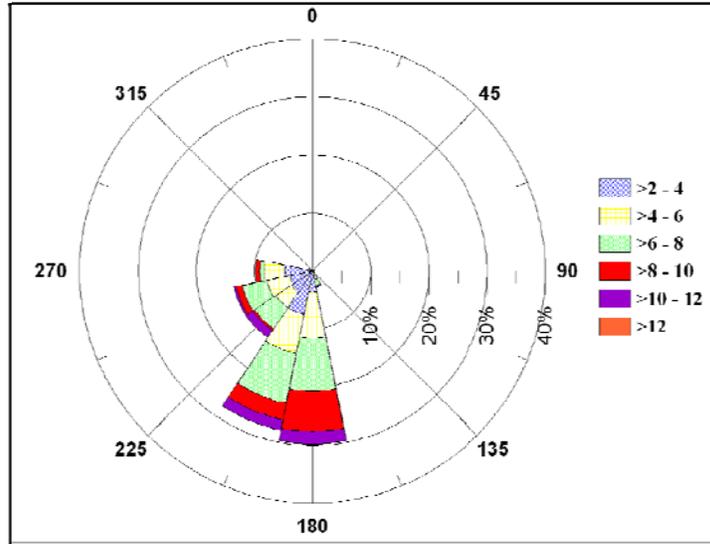


Figura. 10 Rosa de altura de ola significativa

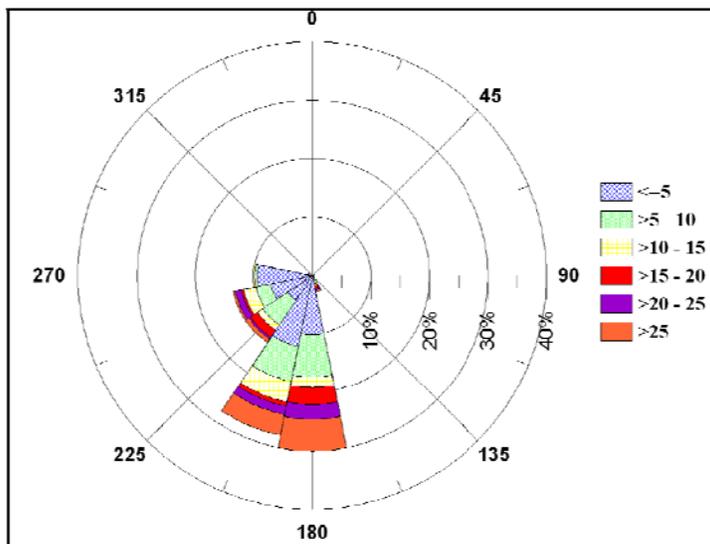


Figura. 11 Rosa de energía normalizada

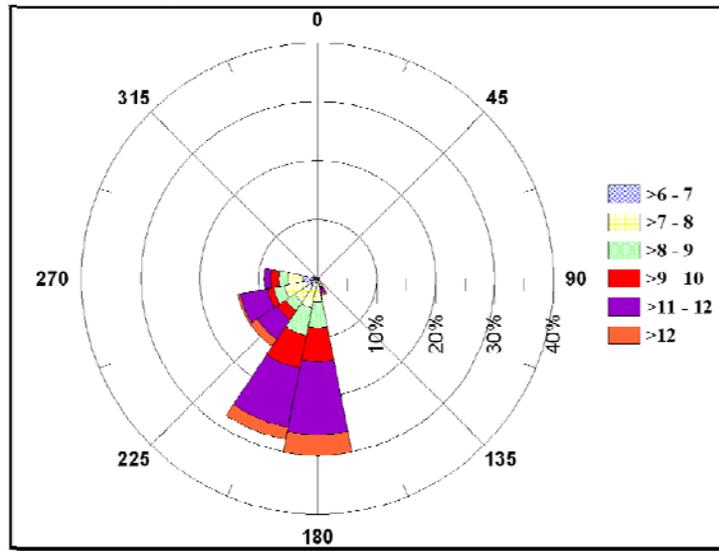


Figura. 12 Rosas de periodos de ola de pico

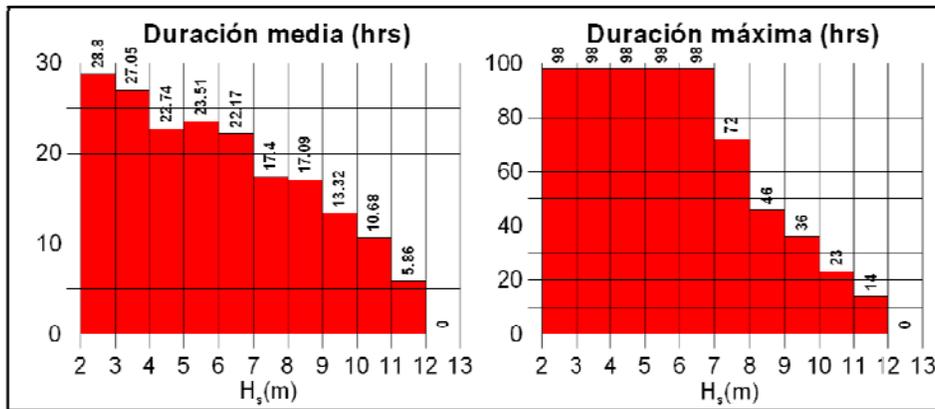


Figura. 13 Duración media de tormentas

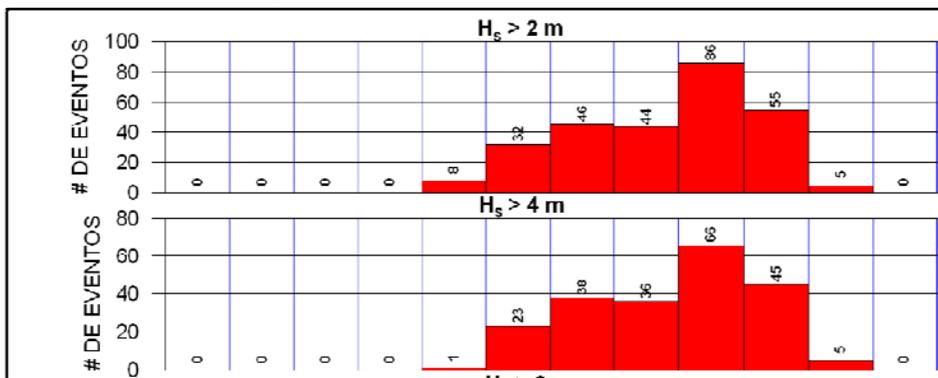


Figura. 14 Presentación de alturas de ola significativa por mes

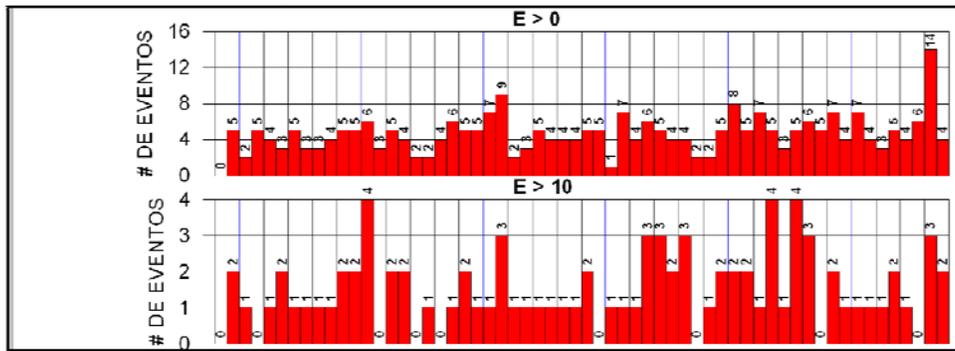


Figura. 15 Presentación de alturas de ola significantes por año

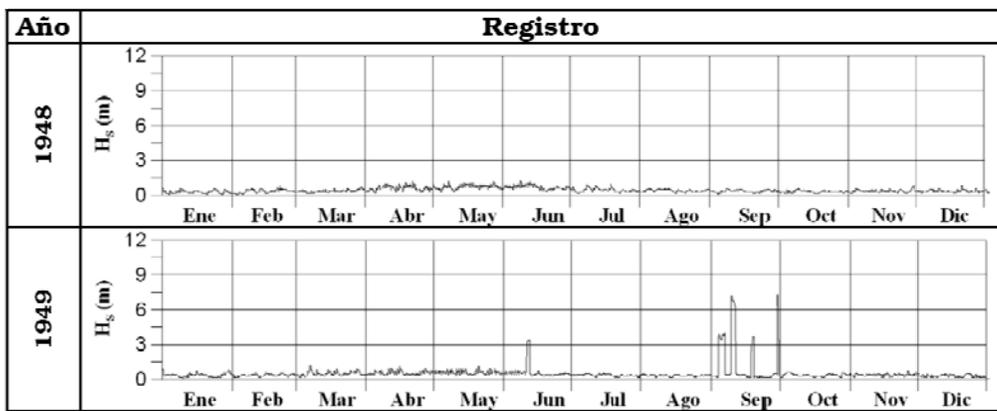


Figura. 16 Presentación de tormentas normalizadas por año

Capítulo IV

4 POTENCIAL ENERGÉTICO EN LA COSTA

Para propagar un oleaje donde se considere la refracción y difracción, es primordial la aplicación de modelos numéricos que resuelven dichos procesos, debido a que estos pueden complicarse con métodos paramétricos. En este estudio se utilizó el modelo REF/DIF, la importancia de elegir este modelo, se basó en su rapidez, además considera la refracción y difracción, proceso muy importante para la propagación.

La metodología de esta tesis, se realizó en dos partes, la primera se enfocó al análisis y caracterización del clima marítimo en aguas profundas, obteniendo el potencial energético de todo el país, la segunda etapa del análisis, se orientó hacia aguas someras, para esto se propagaron los espectros con el modelo REF/DIF partiendo del re-análisis de la base de datos. En el siguiente apartado se explicará con detalle la metodología que se realizó en cada una de las fases.

4.1 ANÁLISIS EN AGUAS PROFUNDAS

La base de datos histórica de viento y oleaje, se obtuvo a partir del Atlas de oleaje de la República Mexicana (Silva et al, 2007).

Este Atlas fue generado a partir de la hibridación de dos modelos, uno numérico y otro paramétrico. El primero de ellos es el conocido WAM; modelo de tercera generación que resuelve la ecuación básica de transporte que describe la evolución de un espectro bidimensional de energía de oleaje con respecto a la frecuencia y dirección del oleaje, El segundo modelo es el HURAC de Silva et al. 2002, que se divide en tres submodelos que describen los campos de presión, de viento y oleaje de huracanes. Este modelo híbrido se alimenta con datos de velocidad de viento que se obtuvieron del re-análisis de la base de datos NCEP/NCAR.

El primer objetivo fue obtener la potencia disponible del oleaje y del viento cerca de la costa, realizando un análisis estadístico de los 59 años de datos. Se estimaron promedios multianuales incluyendo oleaje de tormenta y por estaciones del año que se delimitaron de la siguiente manera: Noviembre a Enero (invierno), Febrero a Abril (Primavera), Mayo a Julio (Verano), Agosto a Octubre (Otoño).

A fin de evitar sobre-estimaciones, se eliminaron los datos de tormentas. Para lograrlo, se consideró tormenta a eventos con altura de ola mayor a una vez y media la altura media de todo el registro, con una duración de mínimo 12 horas continuas. Se aplicó el método de los valores picos, que se realizó seleccionando el valor más alto que se presentó en el transcurso de cada año, promediando los 59 años.

La metodología utilizada para obtener el potencial del oleaje fue en base a la versión de de Pierson-Moskowitz:

$$N_L = 0.458H^2T \dots\dots\dots [67]$$

Donde N_L es la potencia en kW/m de frente de ola, donde H es la altura de ola que se obtuvo a partir de los análisis ya mencionados, y T el período asociado a esta altura de ola.

Los análisis se aplicaron de la misma manera a los datos de velocidad del viento, En esta tesis se utilizó la siguiente ecuación para el cálculo del potencial del viento por unidad de área:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \dots\dots\dots [68]$$

Donde P , es el potencial, A son las unidades por área en el que se va a calcular, U es la velocidad del viento y ρ es la densidad del viento que se definirá más adelante. Con la ecuación anterior se obtiene la potencia eólica disponible que puede ser extraída para convertir toda la energía cinética en energía útil.

La densidad de la potencia es determinada mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = 1.226 - (1.194 \times 10^{-4})z \dots\dots\dots [69]$$

Donde ρ está en kg/m^3 , z se trata de la altura sobre el nivel del mar, en este caso $10 m$. Esta expresión corresponde a una temperatura estándar de $15^\circ C$ y una presión atmosférica de $1013 mbar$ ($1013 hPa$).

Esta metodología, se aplicó al par de celdas del Atlas, aledañas a la línea de costa, con el objetivo de homogenizar todo el litoral, las cuales resultaron 334 celdas con dimensiones de un grado por lado cada una.

4.1.1 RESULTADOS EL POTENCIAL ENERGÉTICO EN AGUAS PROFUNDAS EN EL LITORAL DEL PAÍS

La aplicación de las expresiones para el cálculo de la potencia disponible del análisis estadístico del oleaje y del viento, ecuación [71] y [72], dio como resultado mapas con la distribución espacio-temporal de la potencia en cada celda aledaña a la costa, mismos que se presentan y describen a continuación.

El primer análisis fue obtener los máximos anuales, resultó de seleccionar el valor más alto que se presentó en el transcurso de cada año, promediando los 59 años, el resultado se muestra en la (Figura. 4)

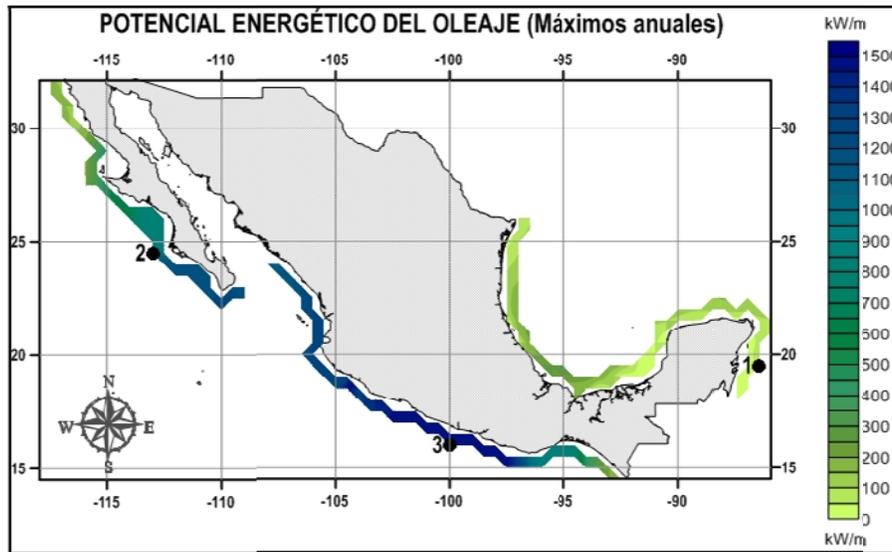


Figura. 17 Potencia promedio del máximo anual del oleaje en las costas mexicanas

Los niveles de potencia más altos corresponden a la costa suroeste del Pacífico Mexicano. Esto se debe a que en el Golfo de México y el Caribe los máximos anuales suelen ser bajos con excepción de los años donde se presentan huracanes, al promediar estos valores, los resultados tienden a bajar. En lo que respecta al Pacífico, los valores son altos en el transcurso de todo el año.

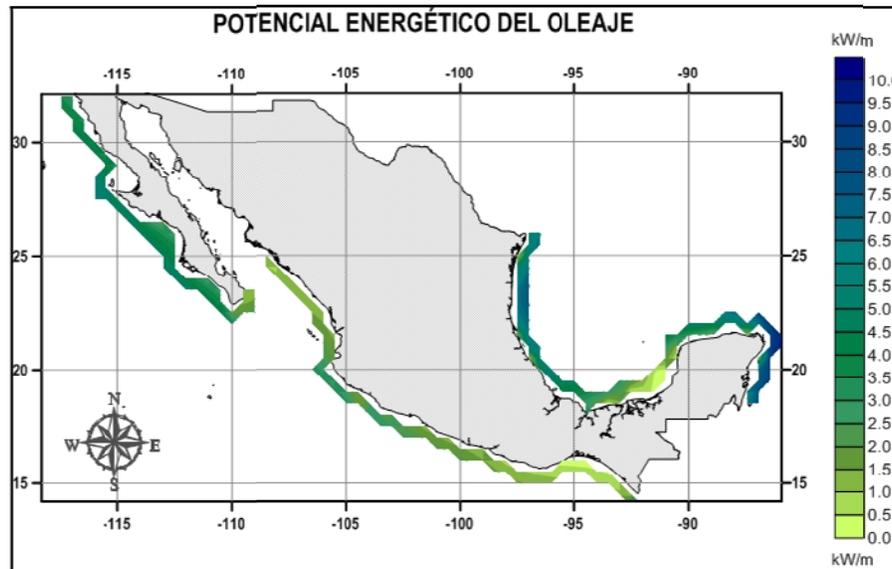


Figura. 18 Potencia media del oleaje en las costas Mexicanas

Pérez-Romero (2008) con implementación numérica y Young (2006) con mediciones in situ han reportado que el oleaje principal en el Golfo de México es de tipo Swell, considerando las características de este tipo, al ser oleaje que abandona el área de generación y disipa energía, suelen ser alturas y períodos que presentan ciertas direcciones predominantes, al promediar oleaje regular sin considerar la época de huracanes donde se presentan alturas y períodos muy altos, promediados resultan valores pequeños.

En la vertiente del Pacífico Rivillas (2008) realizó un análisis extremal donde corroboró que a pesar de que en el Pacífico el número de temporales es menor, tienen mayor intensidad y por tanto liberan mucha más energía en comparación con los de el Atlántico, además las tormentas del Pacífico tienen menor duración, donde las intensidades notables se dan en el suroeste del Pacífico Mexicano.

Se observa en la figura 18 la potencia correspondiente a la altura de ola media aun sin filtro de tormentas. Desde un punto de vista general, se pueden observar tres zonas donde destacan los potenciales energéticos más altos, se incluyen, la Península de Yucatán, la parte alta del Golfo de México, y el Pacífico de la Península de Baja California.

Los valores máximos se encuentran en la Península de Yucatán con intervalos que van desde 7 hasta 9 kW/m, estos valores son altos debido a que el análisis presentado en la Figura 18 incluye tormentas y huracanes. El norte del Golfo de México cerca de la costa de Tamaulipas es la segunda zona donde resalta el potencial con valores que rondan los 5-7 kW/m. La tercera zona, perteneciente al Pacífico, se encuentra en la Península de Baja California sus valores se encuentran entre los 4 y 6 kW/m. Por su parte, el área del Golfo de Tehuantepec es la zona con menor potencia teniendo intervalos de 0.5 a 2 kW/m.

Para evitar sobreestimaciones, se filtraron las tormentas, limitando el umbral, basándose en la altura media de ola, multiplicada por 1.5 unidades, esta con una duración mínima de 12 horas. Excluyendo las tormentas resultó la siguiente ilustración Figura 19.

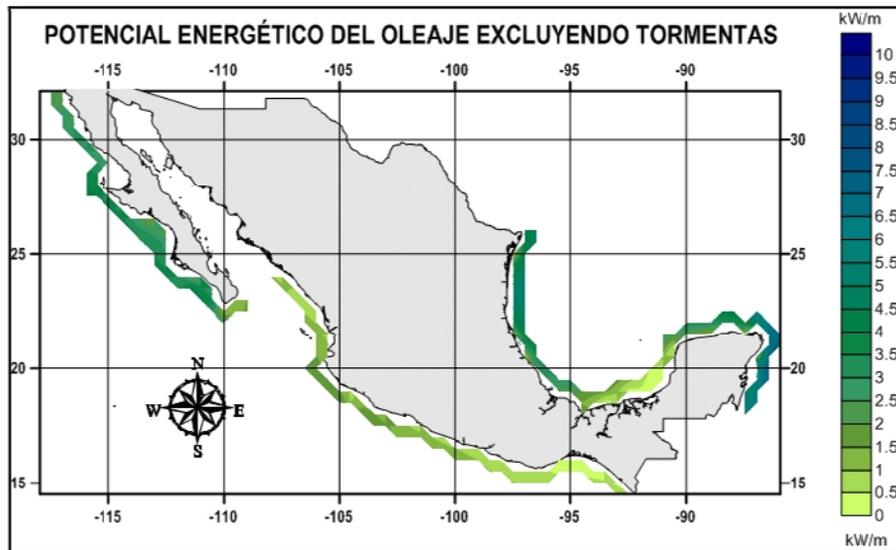


Figura. 19 Potencia filtrada de tormentas del oleaje en las costas Mexicanas

El comportamiento de los valores filtrados en cuanto a conducta espacial es similar a los valores medios, la zona con mayor potencial sigue perteneciendo al Caribe, con rangos que van desde 4 hasta 7 kW/m, seguida del área frente las costas de Tamaulipas, los valores van desde 3 hasta 5 kW/m, Baja California tiene intervalos muy similares a Tamaulipas, las potencias que se presentan a lo largo de la Península no tiene variabilidad espacial, por lo que se considera una zona con valores uniformes, con un máximo de 4 y un mínimo de 3 kW/m. En general en todo el litoral del país los potenciales disminuyeron 2 kW/m después de filtrar las tormentas (Figura 19).

Con el fin de detallar el análisis, se desglosaron los mapas por estaciones en el transcurso de todo el año, este procedimiento consistió en separar la información por meses de la siguiente manera: Noviembre - Enero (invierno), Febrero - Abril (Primavera), Mayo - Julio (Verano), Agosto - Octubre (Otoño), donde se encontraron comportamientos estacionales muy particulares.

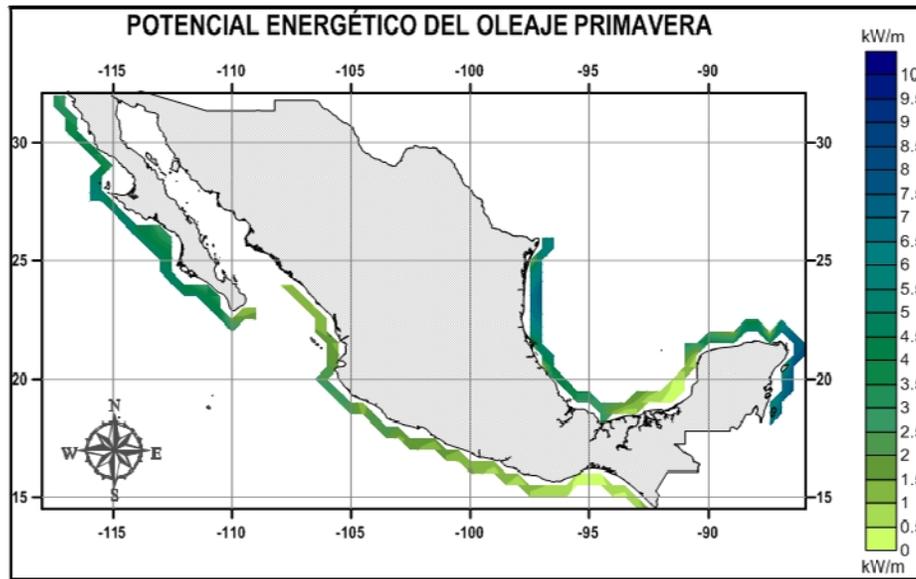


Figura. 20 Potencia media del oleaje en la estación de primavera

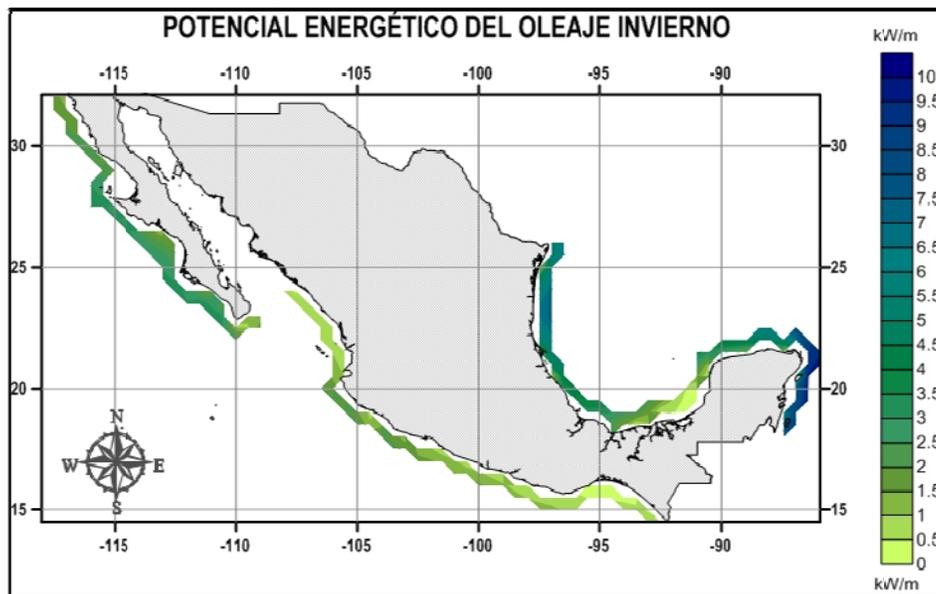


Figura. 21 Potencia media del oleaje en la estación de invierno

Enfocándose en el Golfo de México, los potenciales más altos se encuentran en los meses de invierno (Figura. 21), resaltando en la Península de Yucatán con valores que van desde 6 a 9 kW/m, bajando a la estación de primavera de 5 a 7 kW/m. En el alto Golfo de México muy cerca de las costas de Tamaulipas se

tiene poca variabilidad temporal, por lo que el rango se encuentra entre 5 y 7 kW/m en las dos estaciones, el área de tabasco es la zona con menor intensidad en lo que se refiere a la potencia del oleaje, este se encuentra entre los intervalos de 0.5 y 2.5 kW/m, en las dos estaciones.

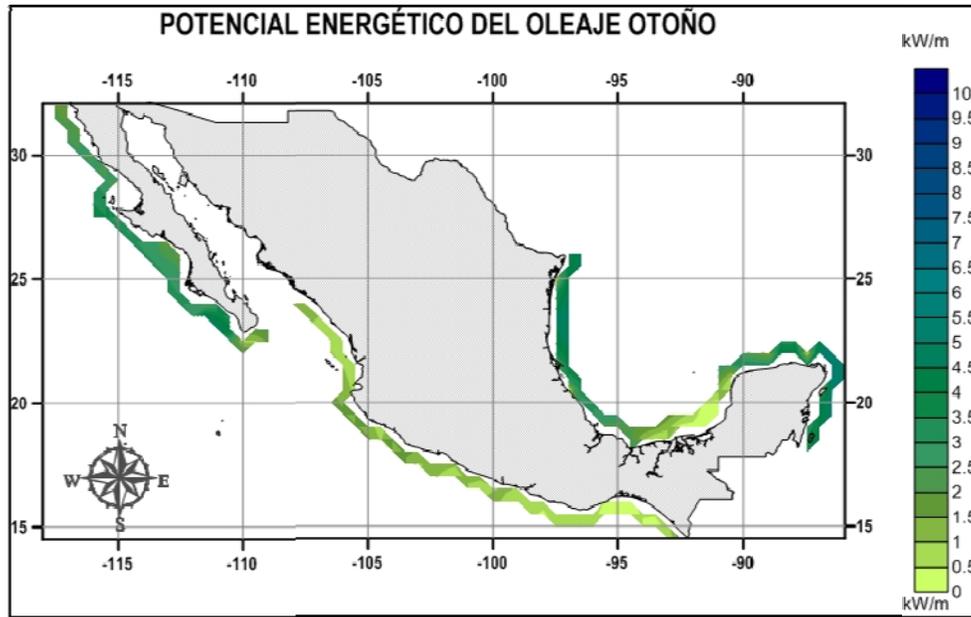


Figura. 22 Potencia media del oleaje en la estación de otoño

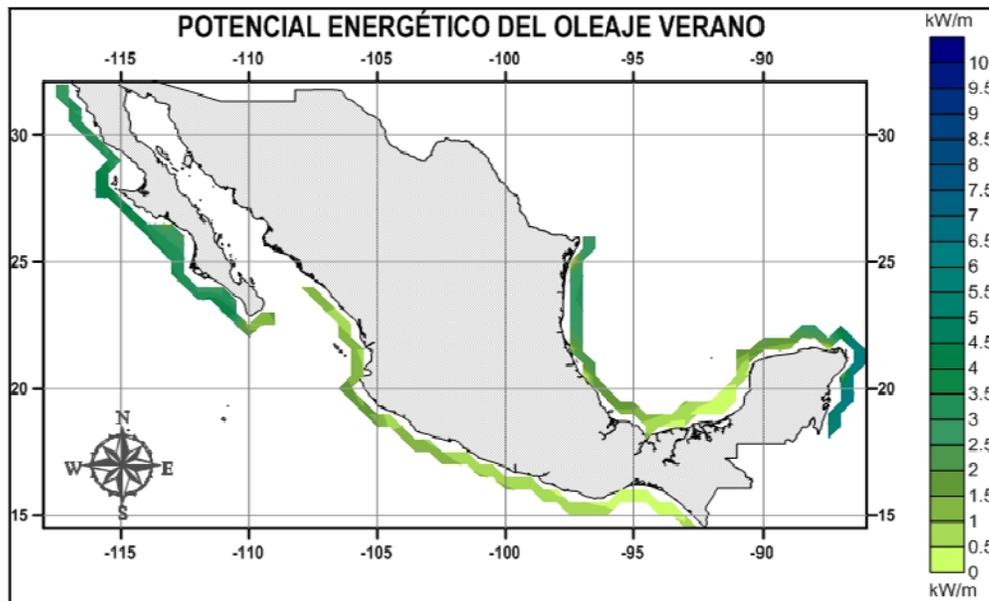


Figura. 23 Potencia media del oleaje en la estación de verano

En relación con el Pacífico, el comportamiento es inverso, el potencial con menor intensidad se encuentra en los meses de invierno con rangos de 2 y 3 kW/m, aumentando en primavera hasta valores de 4 y 6 kW/m. Según Castro (2011), que realizó un estudio espacio-temporal de los vientos en las costas de Baja California, las intensidades más fuertes son en las estaciones de invierno-primavera (Figura. 20 y Figura. 21). Esta variabilidad estacional es, en gran parte, consecuencia del centro de Alta Presión del Pacífico Norte (CAP); teniendo esto en cuenta, al aumentar la velocidad del viento se incrementa el tamaño de ola como consecuencia su potencial, considerando el viento como la fuerza generadora del oleaje.

Los potenciales más bajos, en las dos vertientes Atlántica y Pacífica, se encontraron en los meses de verano y otoño (Figura. 22 y 23), localizando los más pequeños en todo el año en la estación de verano, estos valores mínimos en la zona del Caribe se encuentran entre los 5 y 6 kW/m, en la zona de Tamaulipas no exceden los 3 kW/m, Baja California es el caso donde los valores más bajos se encuentran en otoño, éstos se limitan en rangos similares a Tamaulipas en verano, sin sobrepasar los 3 kW/m. con esto se puede asegurar un mínimo de potencial en el año de 3 kW/m solo en el área de Tamaulipas y Baja California, el Caribe es la zona más alta con un valor mínimo de 5 kW/m.

El suroeste del Pacífico está dentro de las áreas con energía insuficiente para su explotación, contrastando con las costas de Baja California que tienen potencial con intensidades suficientes para considerar el aprovechamiento. Existe una gran diferencia de las dos zonas, a pesar de estar en el Pacífico Mexicano, retomando que el oleaje de la Península de Baja California es generado por el viento que viene del norte mismo que da origen a la corriente de California, se muestra en la Figura 24 la circulación del viento en el mes de invierno tomado de Lancin (1976). El viento tiene una dirección en el Pacífico suroeste de tierra a mar, este es predominante en los meses de invierno no es generador de oleaje, por lo que las alturas serán pequeñas en comparación con la península de Baja California.

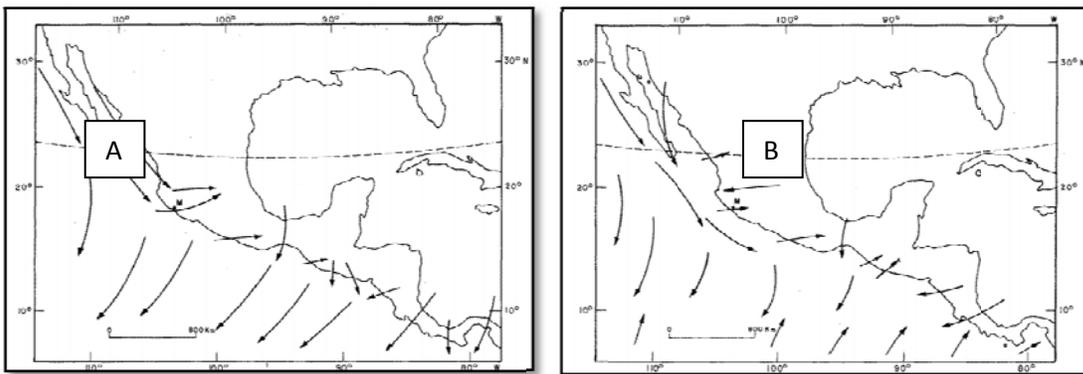


Figura. 24 Dirección de los vientos en las costas centro Este del Pacífico (A) Invierno (B) Verano

En verano Figura. 24 B, el cambio de direcciones se presenta con mayor énfasis en la zona del Golfo de Tehuantepec, esto debido a los vientos Tehuanos originados por el cambio de presiones entre el Golfo de México y el Pacífico. A pesar de esta pequeña modificación en la dirección, el viento es el generador de las corrientes y remolinos presentados en el Golfo de Tehuantepec pero al parecer el oleaje no es afectado por este factor, esto puede interpretarse ya que la intensidad sigue siendo baja.

4.1.2 ANÁLISIS DEL VIENTO

En cuanto a la energía eólica, se puede apreciar que el comportamiento tiene similitud con la distribución de la potencia del oleaje, coincidiendo las zonas con potenciales altos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se estima que en condiciones medias se presentan, en promedio, valores que favorecen la explotación energética en el Golfo de México más que en las costas del Pacífico, donde destacan tres zonas en el que la velocidad es mayor, como consecuente su potencial energético.

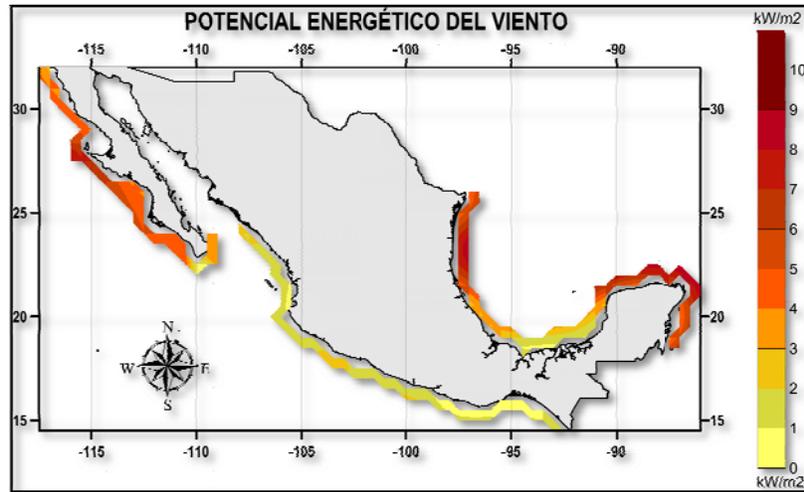


Figura. 25 Potencia media del viento de las costas Mexicanas

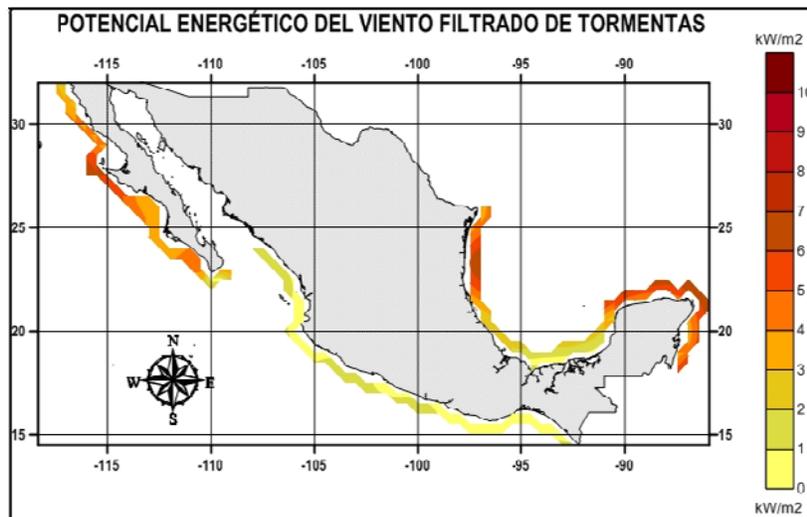


Figura. 26 Potencia filtrada de tormentas del viento en las costas Mexicanas

Si se observa el Caribe Mexicano (Figura. 25) se tienen valores alrededor de 3 y 8 kW/m², la segunda zona coincidente con la potencia del oleaje se encuentra alejada a la costa de Tamaulipas, con variabilidad que ronda entre 4 y 7 kW/m², la tercera sobresaliente es la Península de Baja California, justo en la zona central, los valores se encuentran entre 3 y 7 kW/m².

El umbral de tormentas se basó en la altura de ola y su duración, en el filtrado del viento se excluye las velocidades asociadas de estos mismos rangos de oleaje, por lo que se observa la misma conducta con intensidades menores.

Con este análisis se observa que la disminución del potencial es notablemente más bajo, la zona del Caribe siendo la mayor en lo que se refiere al potencial eólico, disminuye hasta el intervalo de 3-5 kW/m², teniendo los mismos valores en el norte del Golfo de México. La concentración en el Pacífico sigue perteneciendo a la Península Eugenia encontrada en el centro de la Península de Baja California, con un valor máximo de 6 kW/m². Solo en esa pequeña área se mantiene el potencial, el resto de la Península disminuye drásticamente la energía, teniendo un intervalo de 3 y 4 kW/m².

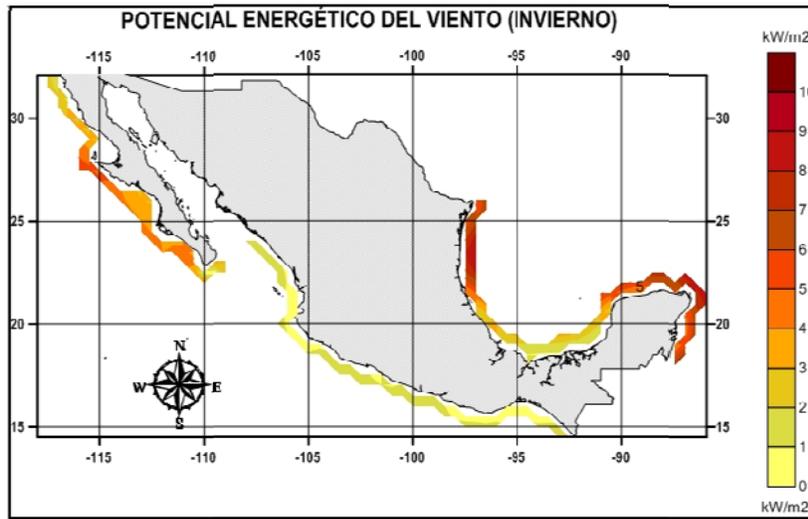


Figura. 27 Potencia media del viento en la estación de invierno

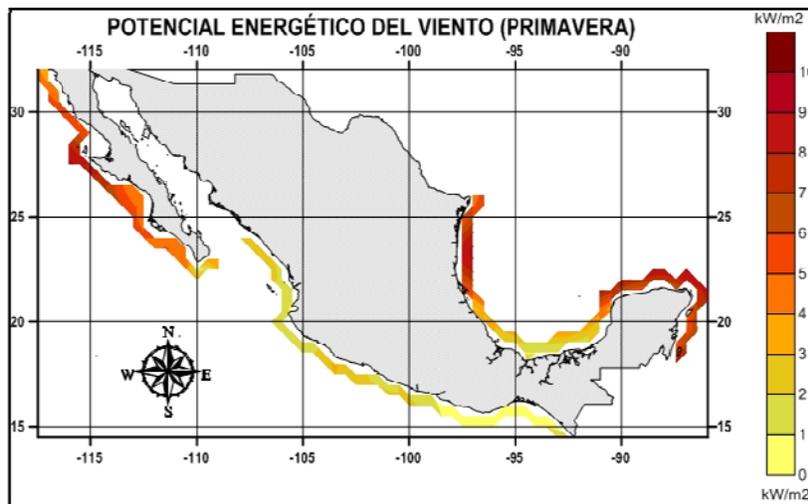


Figura. 28 Potencia media del viento en la estación de primavera

En el desglose de las estaciones se encontró el mismo comportamiento en los potenciales con mayor intensidad en las estaciones de invierno y primavera (Figura 14 y Figura 15)

Considerando solo el Golfo de México, los potenciales no tienen cambio estacional con respecto a los meses de valores más altos, el Caribe se encuentra entre los 3 y 8 kW/m² la siguiente zona con potenciales relevantes es Tamaulipas con valores de 5 y 8 kW/m², este intervalo se dan en las dos temporadas.

En el litoral del Pacífico se encuentra un comportamiento estacional, los meses con mayor potencial pertenecen a la primavera, con un mínimo de 4 kW/m² y máximo de 9 kW/m². Disminuyendo considerablemente hasta el rango de 3-5 kW/m², los cambios que tiene el suroeste del Pacífico no tienen mayor consideración, ya que no sobrepasa 2 kW/m² primavera (Figura. 15) ni 1 kW/m² en verano (Figura. 17).

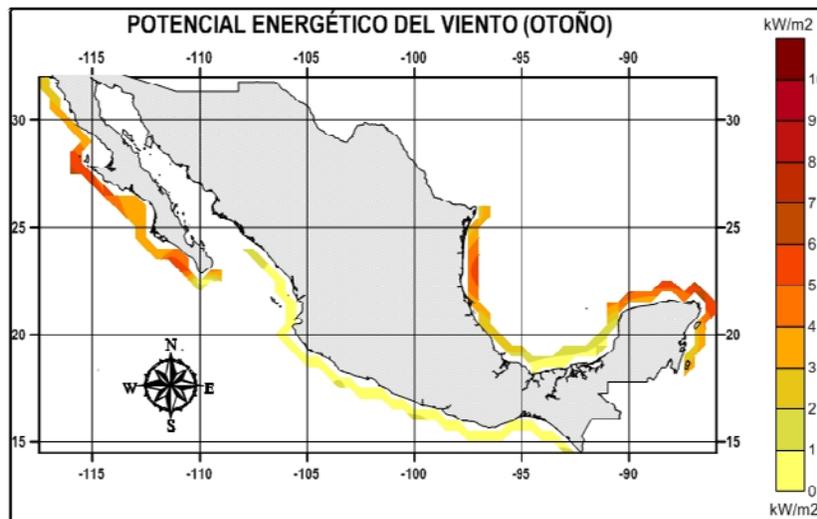


Figura. 29 Potencia media del viento en la estación de otoño

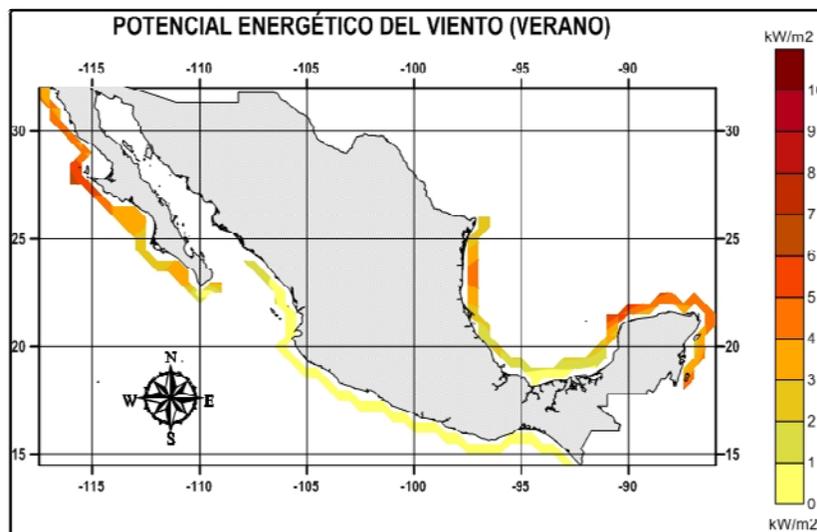


Figura. 30 Potencia media del viento en la estación de verano

Las temporadas con menor potencial ocurren en los meses de verano y otoño (Figura 29 y Figura 30), disminuyendo en el Caribe en la época de verano hasta los 3-5 kW/m², el norte del Golfo de México, no

excede 4 kW/m^2 , en Baja California la zona con menos variabilidad temporal, es la parte media de la Península, los valores en las dos estaciones incluyendo los meses de invierno tienen un rango promedio de $4\text{-}6 \text{ kW/m}^2$, se puede considerar que esta parte de Baja California, no tiene un comportamiento estacional, por lo que se considera una zona muy estable asegurando energía que no disminuye de los 4 kW/m^2 , alcanzando un máximo en primavera de 9 kW/m^2 .

4.1.3 SITIO DE APLICACIÓN 1

Se seleccionaron tres sitios distribuidos en todo el país de forma aleatoria, esto con el fin de detallar el análisis del potencial real aprovechable, donde se incluyen gráficas de probabilidad conjunta de altura de ola significativa y período medio, variabilidad temporal en el transcurso de los 59 años.

La tendencia que tienen las líneas de potencia en las gráficas de probabilidad conjunta indican que a mayor período y altura de ola, mayor es el potencial, esto se confirma con la versión de la potencia utilizada de Pierson-Moskowitz ($N_L=0.458H^2T$) donde a pesar de que la altura de ola se encuentra al cuadrado, el período, al tener un rango de valores más altos, puede definir el resultado de la potencia.

La primera celda analizada, se encuentra en las zonas aledañas de Isla Cozumel dentro del Caribe Mexicano entre las coordenadas de 86.5 de longitud y 19.5 latitud.

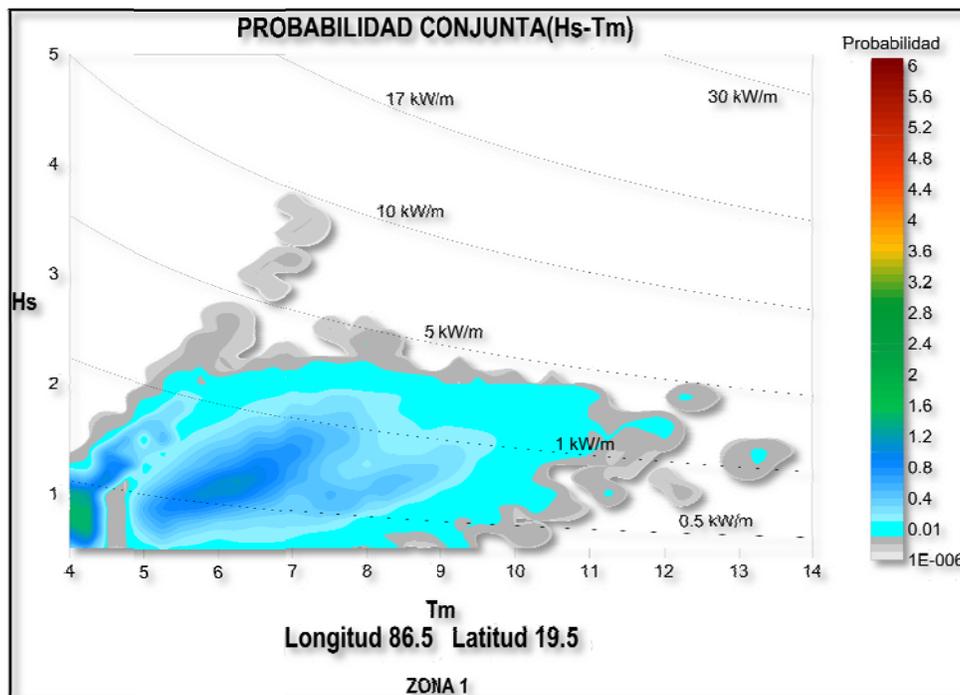


Figura. 31 Probabilidad conjunta de altura de ola y período para la zona 1

Muestra que la probabilidad más alta que se puede presentar es para alturas de oleaje menores a 1 m y períodos que no exceden los 4.5 s, el máximo valor que puede presentarse es de 2m Figura. 31, éstas gráficas se formaron a partir de la base de datos filtrados de tormentas.

La potencia con más ocurrencia se encuentra por debajo de los 0.5 kW/m, a pesar de esto, se puede considerar un aprovechamiento a partir de las combinaciones entre los períodos menores a 9s, y alturas de ola menores a 2 m, este potencial no supera 1 kW/m. La variabilidad se obtuvo a partir de promedios anuales y de los valores filtrados de tormentas.

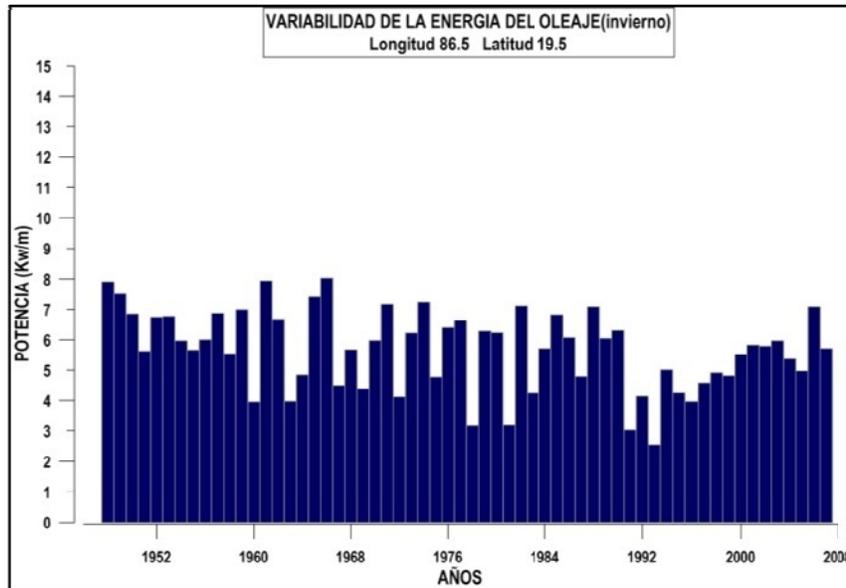


Figura. 32 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en la estación de invierno

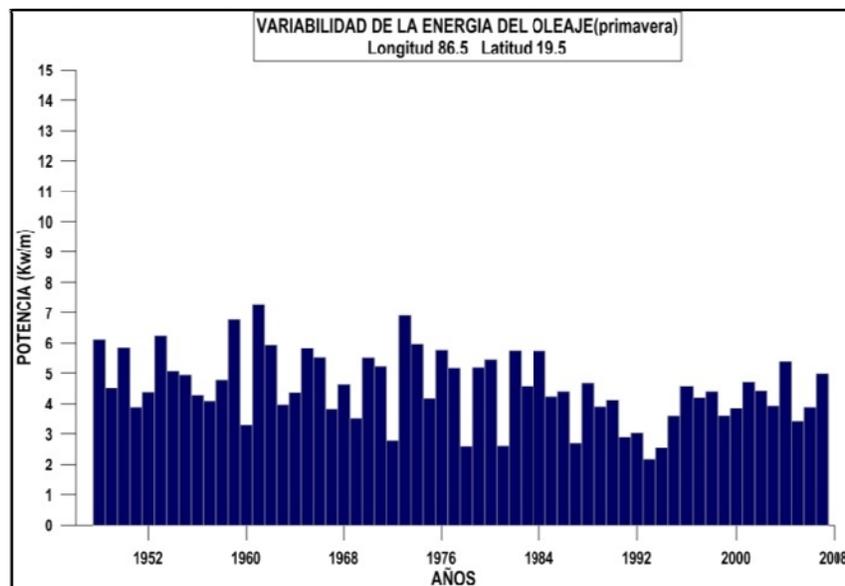


Figura. 33 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en la estación de primavera

En las dos estaciones con variabilidad alta se encuentra primavera e invierno Figura. 32 y Figura 33 con una potencia a considerar alrededor de 3 kW/m, se selecciona como límite de potencial puede llegar hasta 7 u 8 kW/m, pero la probabilidad de que esto suceda es muy baja, por lo que se asegura la potencia mínima.

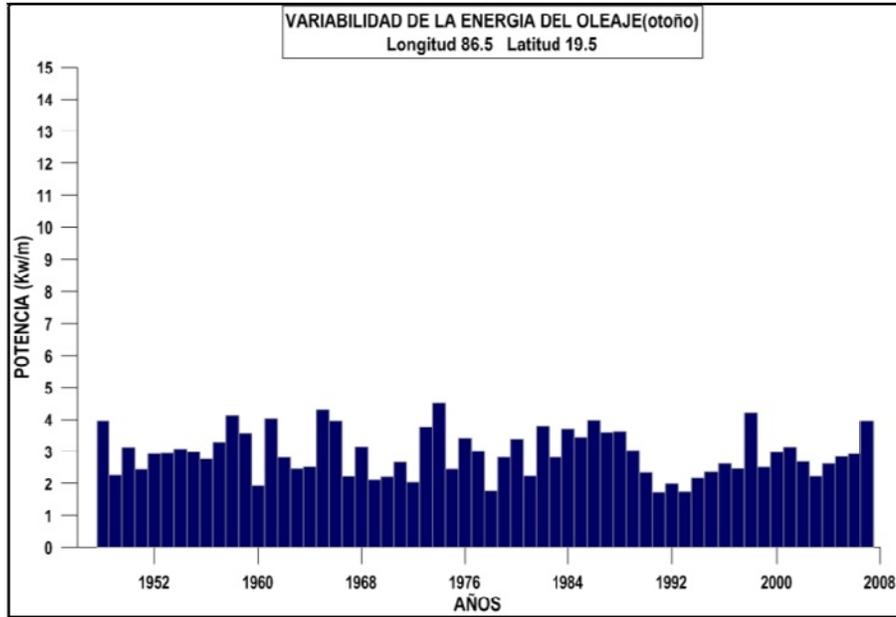


Figura. 34 Variabilidad anual de la potencia del oleaje otoño en la zona 1.

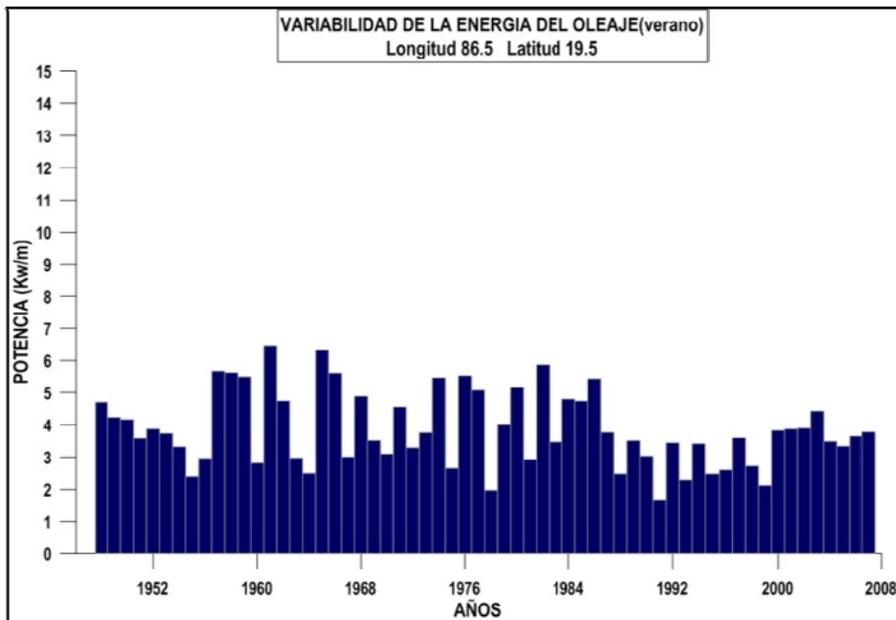


Figura. 35 Variabilidad anual de la potencia del oleaje verano en la zona 1

Las estaciones con mínimos verano y otoño (Figura. 34 y Figura. 35) tienen asegurado un potencial de 2 kW/m, solo con 1 kW/m de diferencia en las épocas con mayor potencial, retomando las gráficas de

probabilidad conjunta, donde la mayor ocurrencia se encuentran en los valores de potenciales menores a 0.5 kW/m, se puede ultimar que este punto no posee potencial favorable a explotar.

El caso del viento tiene un comportamiento similar con respecto al cambio estacional, las mayores potenciales se encuentran en las estaciones de primavera e invierno (Figura. 36), estos son más altos que el oleaje, asegurando en las dos estaciones por lo menos un mínimo de 5 y 6 kW/m².

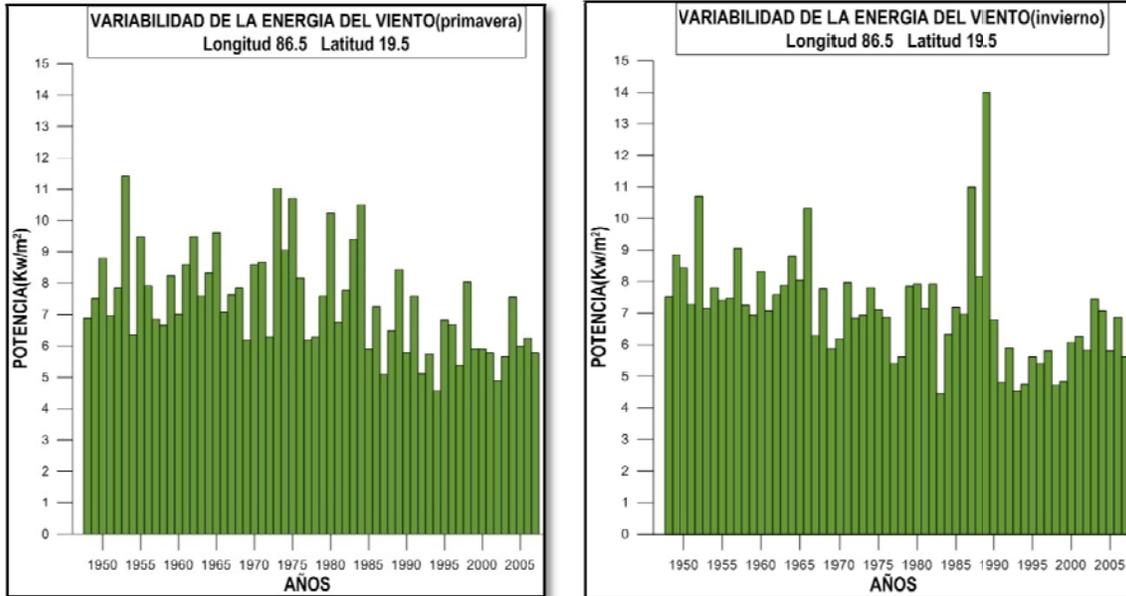


Figura. 36 Variabilidad anual de la potencia del viento en primavera e invierno en la zona 1

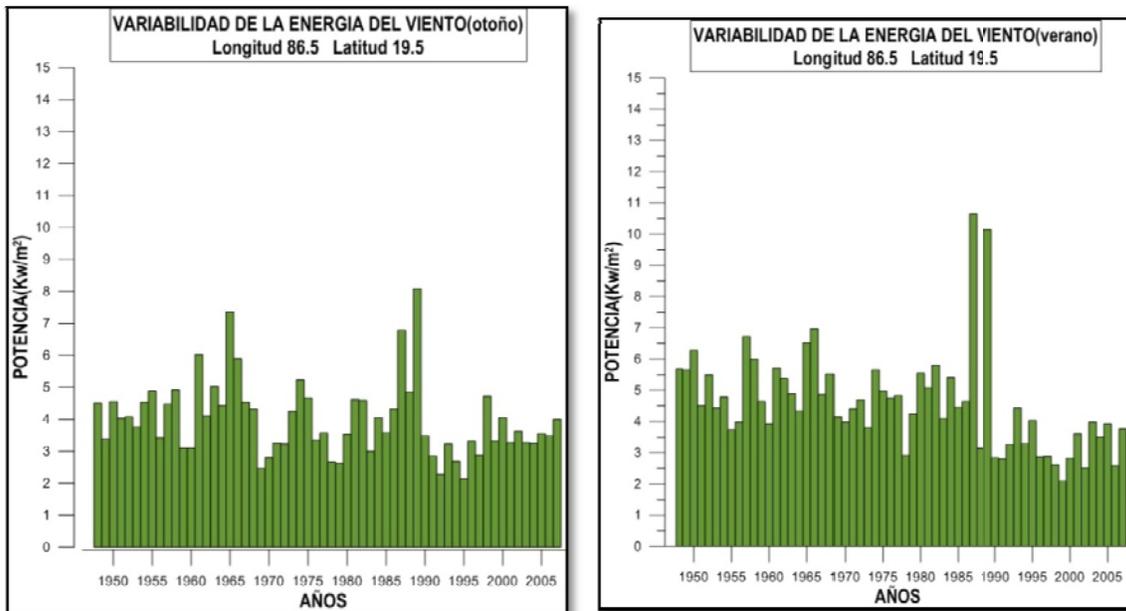


Figura. 37 Variabilidad anual de la potencia del viento en otoño y verano en la zona 1.

Las temporadas con menor intensidad fueron en los meses de verano y otoño (Figura. 37), rondan entre los 3 kW/m², se considera entonces un intervalo en todo el año de entre 3 y 6 kW/m², el viento en esta estación tiene mayor ímpetu en lo que se refiere la explotación energética. Al contrario del oleaje, donde su máximo es de 3 kW/m² es el mínimo para el viento, lo que supone que el aprovechamiento del viento sería la opción viable a aprovechar.

4.1.4 SITIO DE APLICACIÓN 2

Las siguientes zonas se eligieron en el litoral del Pacífico, la segunda zona se ubicó en la parte media de la Península de Baja California.

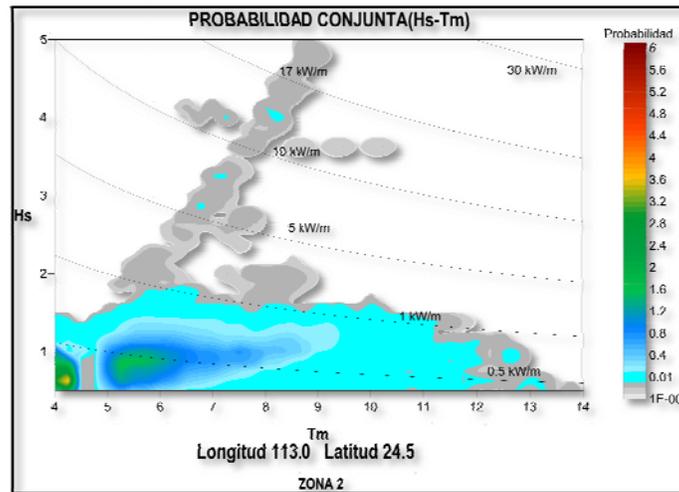


Figura. 38 Probabilidad conjunta de altura de ola y período para la zona 2

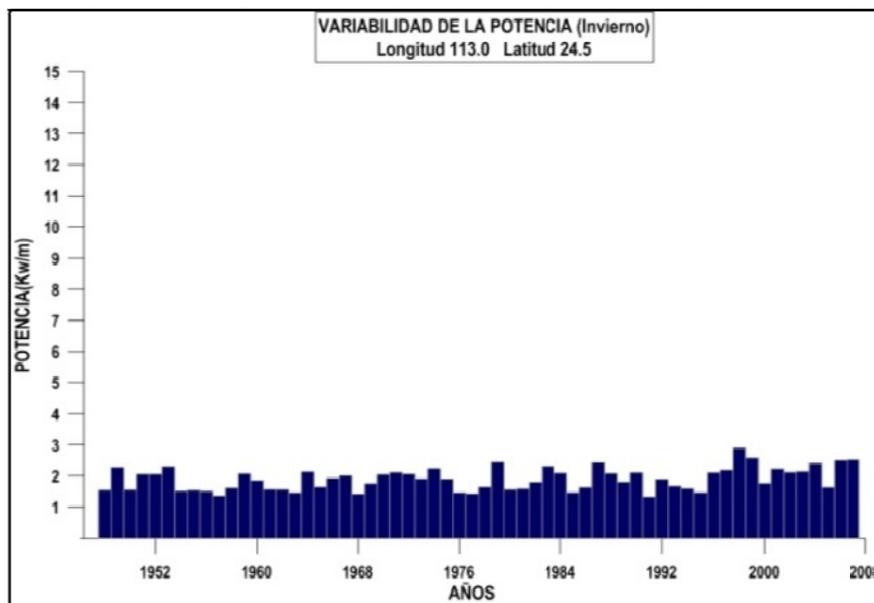


Figura. 39 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en invierno en la zona 2.

Las alturas de ola se encontraron con menor intensidad, el rango más grande de probabilidad se localiza en las alturas menores a 1 m y período menor a 4.5 s. (Figura 38)

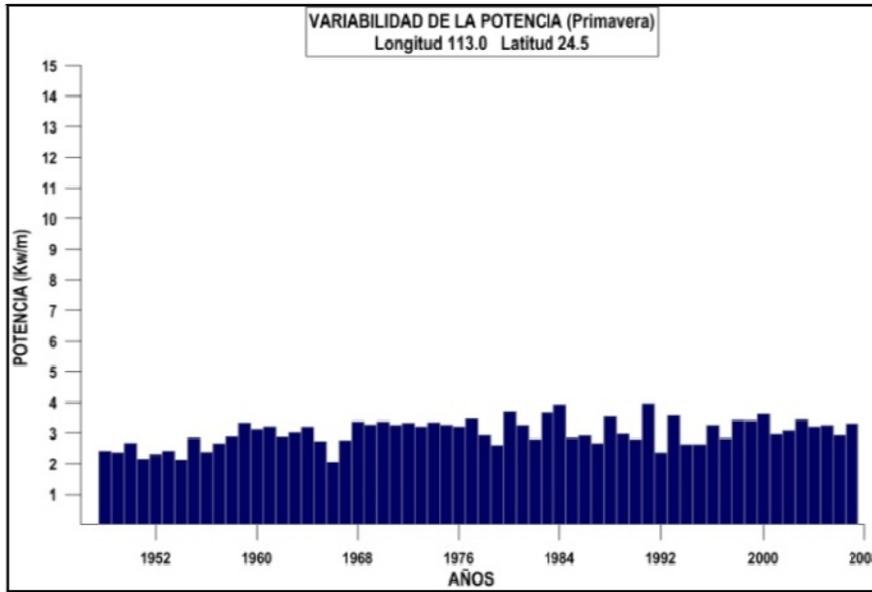


Figura. 40 Variabilidad anual de la potencia del oleaje en primavera en la zona 2

En un panorama general, las alturas de ola que se pueden presentar son menores a 2 m, los períodos alcanzan 9s. Esto limita a un potencial menor de 1kW/m, con menos probabilidad, pero es posible que lleguen a períodos de 12 s, aun así la potencia no aumenta debido a que la altura de ola no va más allá de 2 m y la potencia no sobrepasa 1 kW/m. (Figura. 38)



Figura. 41 Variabilidad anual de la potencia del oleaje otoño en la zona 2.

Esta zona no tiene variabilidad relevante, por lo que los valores permanecen con un poco de estabilidad multianual, con potencias que no sobrepasan en promedio 1.5 kW/m por frente de ola, siendo las dos estaciones con valores más altos. (Figura. 39 y Figura. 40)

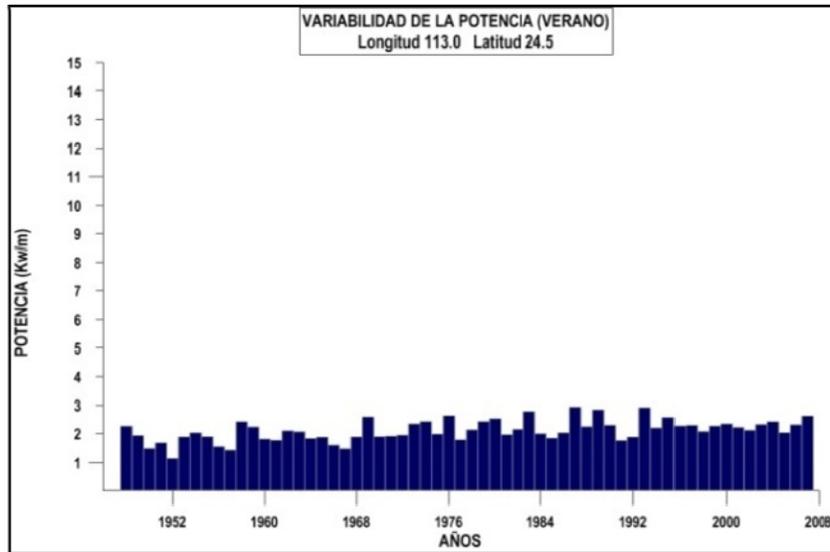


Figura. 42 Variabilidad anual de la potencia del oleaje verano en la zona 2

El resto de las estaciones verano y otoño (Figura 41 y Figura 42) tiene poca variabilidad así como valores mínimos que no se consideran viables para explotación ya que los valores que se aseguran no sobrepasan ni el 1 kW/m, en tres de cuatro estaciones del año, el máximo puede llegar hasta 2.5 kW/m en temporadas de primavera.

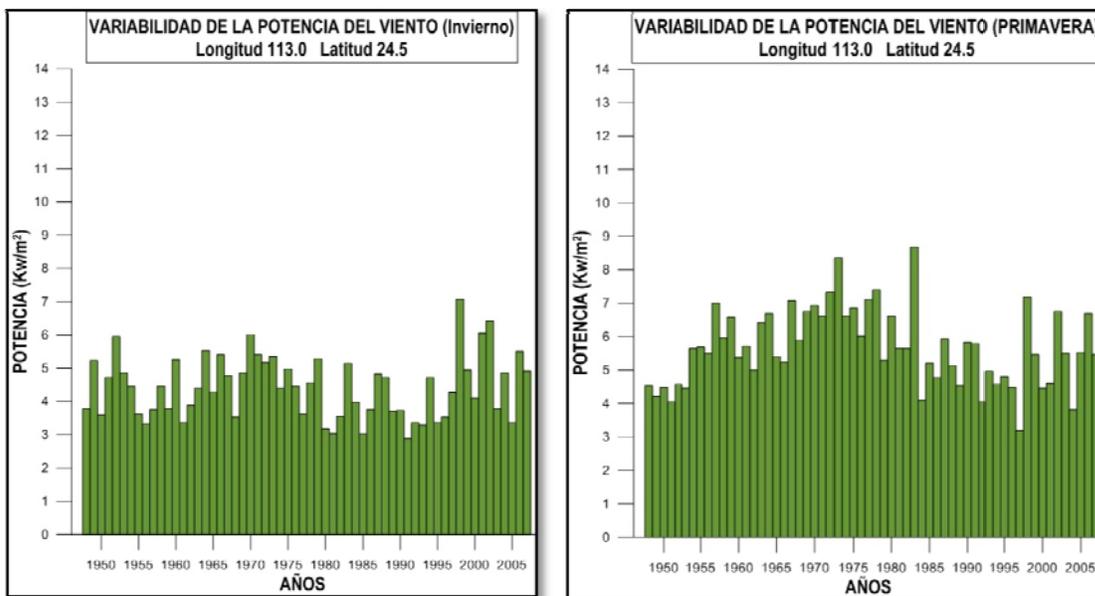


Figura. 43 Variabilidad anual de la potencia del viento en primavera e invierno en la zona 2.

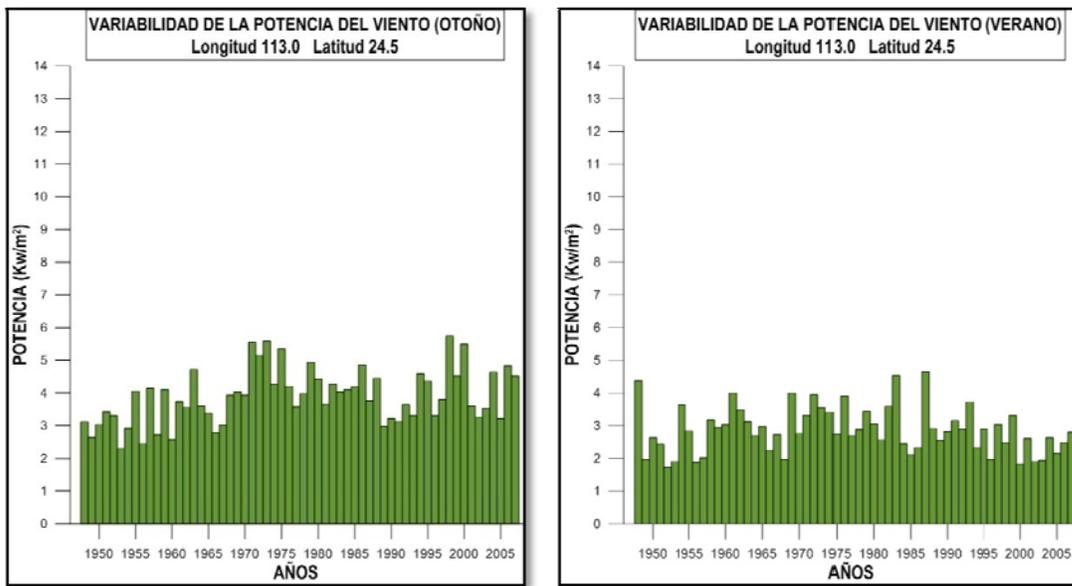


Figura. 44 Variabilidad anual de la potencia del viento en verano e otoño en la zona 2.

El viento dio buenos indicios con valores más altos que el oleaje, a pesar de la alta inestabilidad, podemos encontrar valores menores a 3 kW/m^2 en invierno, aumentando hasta 4 kW/m^2 en primavera (Figura. 44).

En las estaciones con mínimos se encuentran potencias de 2 kW/m^2 , con esto se puede definir que el umbral para el viento no disminuye más allá de 2 kW/m^2 y puede duplicarse en la estación de primavera (Figura. 43).

En esta parte de la Península de Baja California se encontró que los potenciales de oleaje no son suficientes para lograr un aprovechamiento viable, el viento tiene potencias mayores que se pueden considerar explotables.

4.1.5 SITIO DE APLICACIÓN 3

En las costas de Guerrero se ubica el último punto, las alturas de ola son muy pequeñas y los períodos pueden ser bastante grandes, a pesar de esto se sigue concentrando en alturas de menos de 0.5 m y períodos que llegan hasta 13 s , estas combinaciones de estados de mar solo tienen variación con el período, la altura de ola tiene valores casi constantes (Figura. 45).

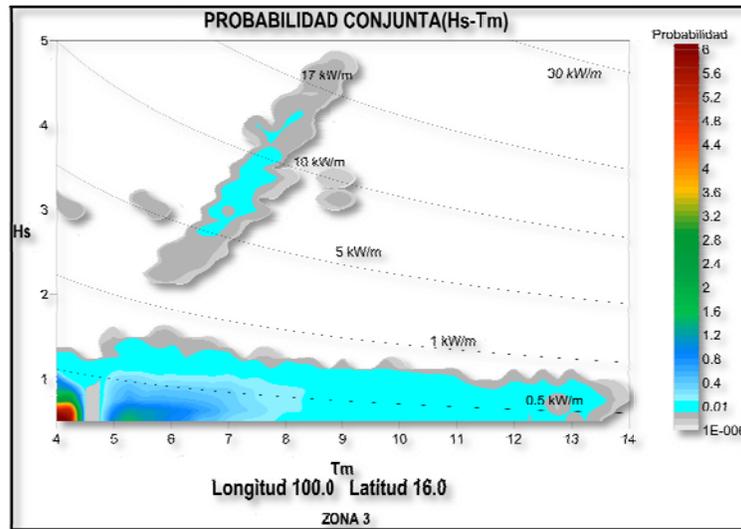


Figura. 45 Probabilidad conjunta de altura de ola y período para la zona 3

El valor de la potencia no llega ni a 1 kW/m, esta zona tiene los resultados más bajos de los tres sitios,

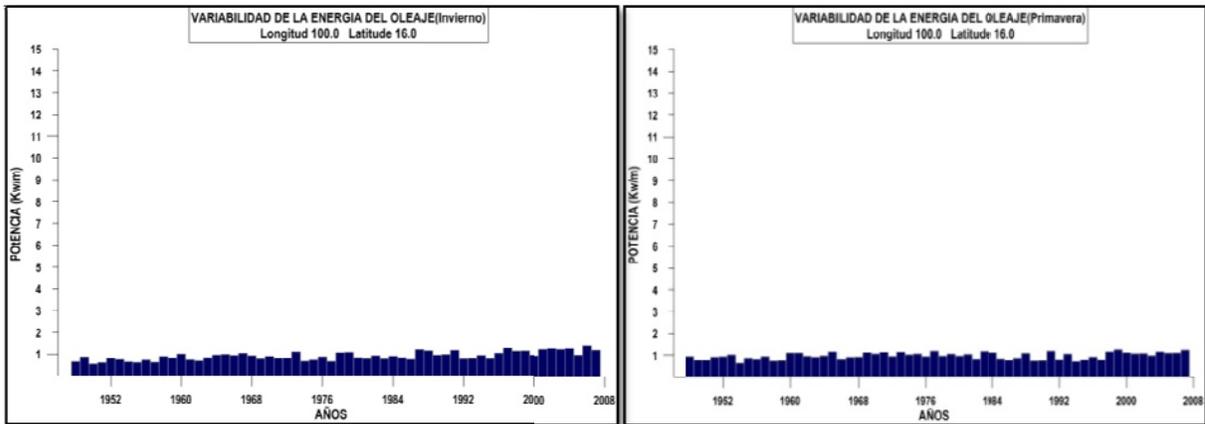


Figura. 46 Variabilidad anual de la potencia del oleaje de las cuatro estaciones del año en la zona 3.

coincidiendo con los mapas de potencias (Figura 18 y 19). En este caso, el factor limitante para un potencial tan bajo es la altura de ola, debido a que su umbral no sobrepasa 1 m, a pesar de que los períodos pueden llegar a ser relativamente altos. La potencia con mayor probabilidad no excede los 0.5 kW/m, el rango donde se concentra la probabilidad y los mapas de potencia, nos da un indicativo que en cuestión energética esta zona es poco productiva, por lo que se confirmó en la variabilidad multianual de las estaciones del año.

En ninguna de las cuatro estaciones excede 1 kW/m, retomando la gráfica de probabilidad (Figura. 45), la concentración se encuentra dentro del rango de 0.5 kW/m, con esto se termina de confirmar que la zona es escasa energéticamente, sin actividad estacional ni cambios en la variabilidad multianual, la posibilidad de explotación es casi nula por lo menos en esta celda tomada del Pacífico Mexicano.

4.2 ANÁLISIS EN AGUAS SOMERAS

4.2.1 FUENTE DE INFORMACIÓN

- Batimétrica

Las bases de datos batimétricos se obtuvieron del programa GEBCO, donde se crearon mallas de 1000 x 1000 nodos, la interpolación tipo Kriging con espaciamiento de 30m, se realizó en el programa Surfer, con el formato adecuado para el modelo REF/DIF. La base de datos con la que se mejoró la calidad de la malla se consiguió a partir de la recopilación de datos de campo, de las diferentes API's (Administración Portuaria Integral). La falta de información de datos de campo fue limitante para la elección de las zonas a detallar, por las cuales se seleccionaron los siguientes puntos: Ensenada, Baja California (-117°,31.5°). Mazatlán, Sinaloa (-106.5°,23°). Manzanillo, Colima (-104.5°,18.5°). Altamira, Tamaulipas (-97.5°,22.5°). Un ejemplo de las mallas que se utilizaron en la propagación se muestra a continuación (Figura. 34)

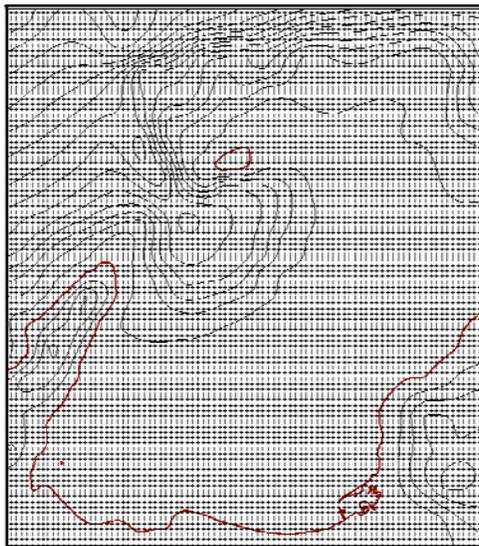


Figura. 47 Ejemplo de batimetría girada utilizada para propagar el oleaje (Caso Ensenada B.C.)

Las mallas se giraron de tal manera que la frontera de entrada del oleaje se encontrara en dirección norte, esto con el fin de facilitar el manejo del modelo con respecto al ángulo de propagación, considerando que una de las limitantes del modelo REF/DIF es la propagación del oleaje con ángulos menores a 45° y mayores a -45°, además de seleccionar la frontera de menor irregularidad, por la condición que plantea el modelo REF/DIF, donde la batimetría debe de presentar cierta uniformidad. Teniendo las batimetrías, es necesario seleccionar los estados de mar, para lograr las combinaciones de alturas y períodos fue necesario hacer un análisis espectral que se describirá en el siguiente apartado.

- Análisis espectral

Se selecciono el espectro tipo JONSWAP modificado por Goda (1985) para el análisis espectral . La ventaja que tiene esta versión, es que las expresiones pueden ser reescritas en función de los parámetros de altura de ola del momento de orden cero, H_0 y período pico, T_p , consiguiendo la siguiente expresión:

$$S(f) = \alpha H_{m0}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-1.25 (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-1 (T_p f - 1)^2 / (2\sigma^2) \right]} \dots\dots\dots [70]$$

Donde:

$$\alpha \approx 0.0624 / [0.23 + 0.0336\gamma - .185(1.9 + \gamma)^{-1}] \dots\dots\dots [71]$$

$$\sigma \approx 0.07 \text{ Para } f \leq f_p \text{ y } \sigma \approx 0.09, \text{ para } f > f_p \dots\dots\dots [72]$$

$1 \leq \gamma \leq 7$ normalmente se utiliza la media 3.3

A partir del m_0 y la densidad espectral $S(f)$:

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \dots\dots\dots [73]$$

Donde el $m_0 = \int_0^\infty S(f) df$

Se obtuvo la altura de ola H_{m0s}

$$H_{m0s} = 4.004 \sqrt{m_0} \dots\dots\dots [74]$$

Se creó un espectro para cada T_p , abarcando todas las combinaciones posibles de estados de mar que se pueden presentar, se corrió un rango de períodos pico desde 4 hasta 12 s y altura de ola unitaria (Figura. 48)

Considerando la restricción del modelo REF/DIF con respecto a las direcciones, se limitó a propagar ángulos menores a 45° y mayores a -45° , se eligieron las direcciones más frecuentes de cada zona y época del año, el detalle de éstas se mencionará en los resultados.

Basándose en las gráficas de probabilidad conjunta presentadas en el resumen del Atlas de oleaje, Silva et.al.(2002), se seleccionaron las combinaciones de estados de mar con mayor probabilidad de cada sitio, los espectros utilizados en la metodología fueron únicamente los períodos presentados en estas gráficas, con la facilidad de que en la versión del JONSWAP Goda(1985) se diseña el espectro en base a H_{m0} y T_p , se utilizó la altura unitaria y los períodos picos correspondientes, se desglosó el espectro para continuar con su propagación en el modelo REF/DIF.

La altura de ola local se originó a partir de la reconstrucción del espectro propagado y las combinaciones de estados de mar específicas de cada zona, se realiza una multiplicación entre las mismas, dicho producto dio origen al oleaje real que se presenta en las costas seleccionadas.

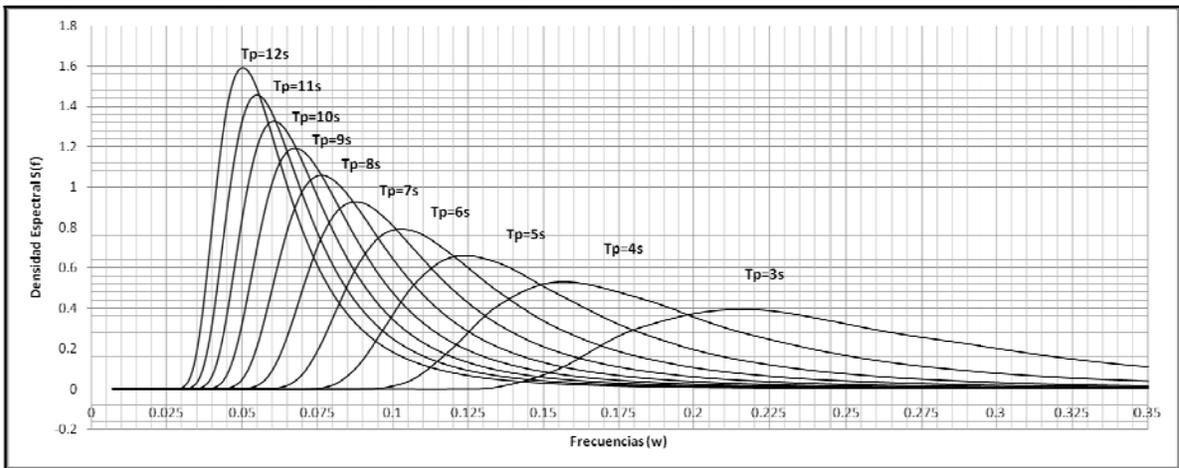


Figura. 48 Espectros JONSWAP propagados en REF/DIF

Es importante mencionar que para el análisis de la potencia energética se utilizaron los períodos picos (T_p), con la siguiente relación: $T_p = 1.6 \cdot T_m$.

Se seleccionó la línea batimétrica de 20 m, tomando en cuenta la disponibilidad que hay de los dispositivos convertidores de energía, además de considerar las complicaciones constructivas y de colocación de estos módulos, se tomó la altura correspondiente de dicha profundidad para obtener su potencia, en el siguiente apartado se especificará a detalle tal procedimiento.

4.2.2 POTENCIAL ENERGÉTICO EN AGUAS SOMERAS

Para obtener el potencial en aguas profundas se utilizó la versión de Pierson-Moskowitz ésta tiene su origen en base a la celeridad de grupo donde en aguas profundas se considera que $h > \frac{\lambda}{2}$, y se cumple que $C_g = \frac{c}{2}$, el proceso físico principal que actúa en esta relación surge con la idea de que las olas que se encuentran en la parte frontal del grupo van perdiendo energía y terminan desapareciendo, mientras en la cola del grupo comienzan a aparecer nuevas olas, en esta situación la potencia (N_L) por unidad de longitud de frente de ola en función del período es:

$$N_L = \frac{\rho g H^2 C_g}{8} = \frac{\rho g H^2 c}{16} \dots\dots\dots [75]$$

Esta pertenece a aguas profundas Ecuación [77], en someras donde $h < \frac{\lambda}{2}$ se cumple que $C_g = c$ en este caso si H se mide en metros, T en segundo y $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ nos resulta la ecuación:

$$N_L = 0.955 H^2 T \quad \text{en} \quad \text{kW/m} \dots\dots\dots [76]$$

La ecuación [78] fue la utilizada para obtener la potencia por frente de ola en aguas someras.

4.3 CASO DE APLICACIÓN ENSENADA BAJA CALIFORNIA

4.3.1 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS

El Puerto de Ensenada, B.C., se encuentra ubicado en los 31°50'30"N y los 116°38'O, para ser más específicos a 110 kilómetros al sur de la frontera México-Estados Unidos. Comprende una superficie de 25.2 Hectáreas, con un promedio de 18km de largo y 14 km.

Se caracteriza por ser un bahía somera en la que aproximadamente un 75 % de su área presenta profundidades menores a 50 m y bajos de 6 m, el 25% restante forma parte de un cañón submarino localizado entre Punta Banda y la Isla sur de Todos Santos, y alcanza profundidades de 400 m. El clima característico de la zona es semiseco templado con una temperatura promedio de 11 a 21 °C, con presencia de Veranos frescos y un régimen de lluvias del tipo invernal, con nieblas frecuentes a lo largo de toda la franja costera.

El oleaje incide durante la mayor parte del año en dirección E-SE. Durante el Verano los vientos provenientes del NO y O son de regular intensidad, y el oleaje es moderado. Durante la estación de invierno el oleaje proviene del noroeste con alturas significantes de 2 m y durante el verano proviene del suroeste con alturas significantes de 0.5 m. Esta alternancia estaciona en la dirección de aproximación del oleaje afecta el sentido de las corrientes litorales que transportan sedimentos a lo largo de las playas dentro de la Bahía de Todos Santos, sin embargo, estos estadísticos subestiman las alturas del oleaje generado durante eventos episódicos de tormenta como los observados durante el invierno de 1977/78. Las corrientes litorales en la parte norte de la bahía presentan una dirección predominante hacia el sureste en la parte sur de la dirección es hacia el norte y en la parte central se tiene un área de convergencia de corrientes.

Tomando en cuenta la geomorfología, a la bahía se le considera abierta con pendiente suave y con tres tipos de costa: protegida rocosa, abierta rocosa y abierta arenosa

Los límites naturales definen una circulación continua de agua oceánica. La línea de costa de la bahía está compuesta de una ribera rocosa que comprende Punta San Miguel, Punta El Sauzal, Punta Morro y Punta Ensenada, con playas de bolsillo entre ellas. Una playa arenosa de 14 km de longitud se inicia al sur del puerto de Ensenada y termina en la base de Punta Banda. Esta playa se interrumpe por una boca que determina la entrada a una laguna costera conocida como el Estero de Punta Banda, la ribera rocosa de Punta Banda se caracteriza por ser una costa muy irregular, con cantiles casi verticales y playas pequeñas con escasas arena entre ellos.

4.3.2 CARACTERÍSTICAS SOCIALES Y ECONÓMICAS

En el municipio de Ensenada se satisface una demanda en los siguientes rubros; Agua potable 96%, Electrificación 91.3%, recolección de basura 92.5%, parques y jardines 164,791 m², cuenta con 8,824,500 m² de área dentro de la mancha urbana de las cuales el 19% presenta pavimentación de concreto hidráulico, 43% de pavimentación con concreto asfáltico, 3% de empedrados y un 35% sin pavimentar. Los principales sectores productos y servicios en la actividad económica son la agricultura y ganadería donde se explotan 84400 ha y el aprovechamiento de 4103541 Ha en uso pecuario mismas que representan el 77.1% de la superficie total del municipio. La actividad comercial se encuentra orientada fundamentalmente al mercado

interno, destacándose los giros al menudeo, los cuales el 46% y 44% de los establecimientos. La actividad pesquera es sin lugar a dudas una de las más importantes, ya que es generadora de empleo y productora de alimentos para consumo humano, tanto para el mercado regional, nacional y de exportación. La captura está constituida por 96 especies registradas oficialmente, participan en ella especies de alto rendimiento en volumen, de medio o bajo valor económico, como son: las pesquerías masivas de sardina, macarela, bonito y algas marinas; hay otras, de más alto rendimiento económico, aun cuando su volumen de captura no sea muy grande; como son las pesquerías de erizo, camarón pepino y abulón.

4.3.3 RESULTADOS

Para la propagación de resultados se utilizó una batimetría con resolución de 25 metros en una malla con dimensiones de 887 x 999 nodos (Figura. 49) la batimetría se obtuvo del programa GEBCO, que contiene una batimetría global con resolución de 30 segundos disponible en el *british Oceanographic data Centre (BODC)*, han sido realizadas a partir de la combinación de datos de calidad contrastada, procedente de sondas de barcos y satélite, fueron mejoradas con datos de campo disponibles en la literatura. Para obtener el potencial de la línea batimétrica, se aplicó la metodología explicada en los apartados ya descritos.

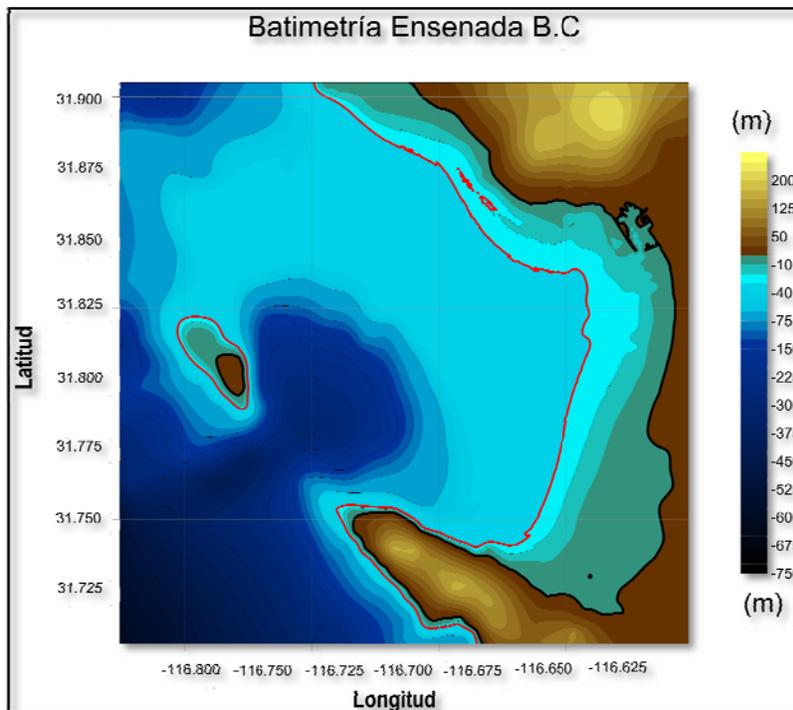


Figura. 49 Batimetría de la Bahía de Todos Santos

La configuración batimétrica de la bahía es irregular. Los rasgos sobresalientes son: el bajo de San Miguel, con una profundidad mínima de 5.5 m, que se ubica entre Punta San Miguel y las islas de Todos Santos, una depresión submarina entre Punta Banda y las islas, con profundidades de hasta 550 m, la bahía se encuentra protegida principalmente por la península de Punta Banda. Enfocándonos a la parte media de la bahía la pendiente es con poca inclinación en comparación con las líneas batimétricas del costado externo de la península de Punta Banda y zonas aledañas a la isla Todos Santos

Se utilizó el análisis que se encuentra en el Atlas para determinar el estado de mar de la zona, donde se seleccionaron las rosas de propagación del oleaje, determinando las direcciones que se corrieron en el modelo REF/DIF.

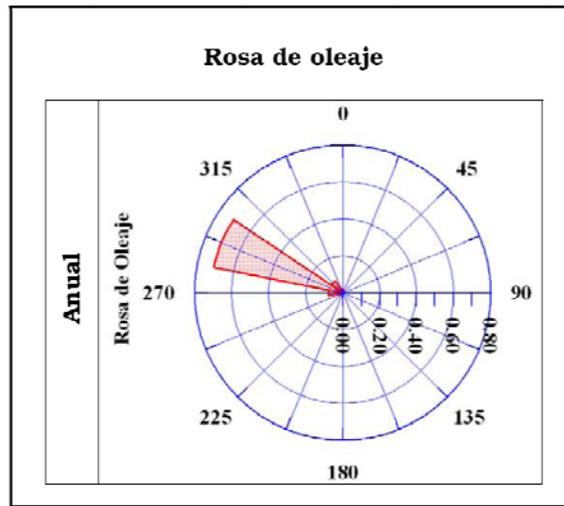


Figura. 50 Rosa de la dirección de propagación del oleaje

En las Figuras. 50 se muestra que la dirección predominante inicia a partir de los 292.2°. Se presentan las alturas y períodos que se encuentran en los rangos de dicha zona, estos intervalos se tomaron de las gráficas de probabilidad conjunta con la Hs y Tm.

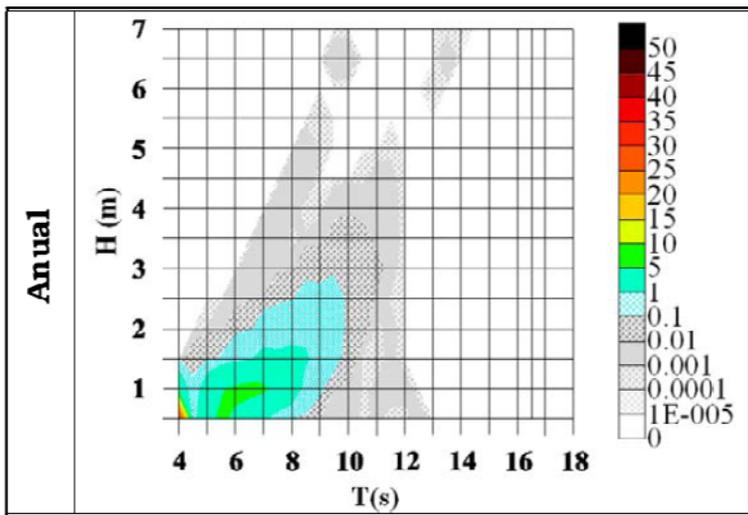


Figura. 51 Rosas de dirección de propagación y de probabilidad conjunta de altura significativa y período medio de ola

propagar. Los resultados (6.4, 8s, 9.6s, 11.2s) se presentan en la

El rango de estados de mar utilizados, se encuentran en el límite de 2 m de altura de ola, y períodos a partir de 4 segundos hasta 8. Se seleccionó el rango de mayor probabilidad que representa la Figura 51

Los mapas resultantes se elaboraron en dos etapas, en la primera se propagó un oleaje con altura de ola unitario donde se utilizaron los períodos pico, éste se obtuvo a partir

del producto entre el período medio (Tm) y 1.6, obteniendo los Tp a

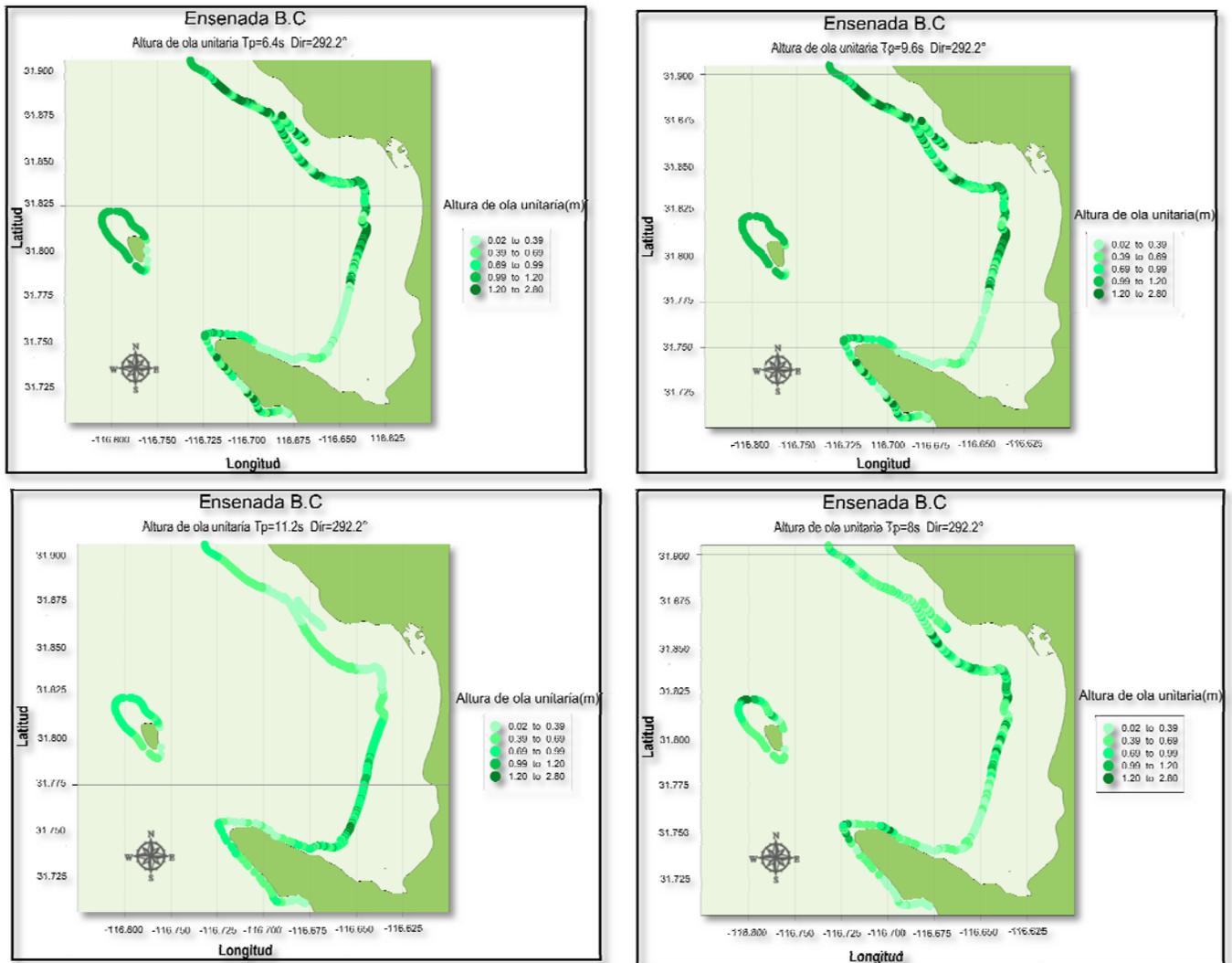


Figura. 52 Mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los periodos pico 6.4, 8s, 9.6s, 11.2s en la línea batimétrica de 20m dirección 292.2°

Los periodos con mayor probabilidad según (Figura. 51) se encuentra en el $T_m=4s$ y $T_m=6s$ tratándose en los mapas de propagación de alturas unitarias $T_p=6.4s$ y el $T_m=9$.

En el caso de la Bahía de Todos Santos, la morfología de la línea de costa y la batimetría son un factores que dominan la distribución espacial de altura de ola, marcando puntos frecuentes en los que el oleaje es más alto, con estos primeros resultados se eligieron posibles sitios de explotación energética.

Los sitios que marca la dirección 292.5° de la propagación, se encuentran en la parte media y norte de la bahía, conforme se propaga a la línea de costa, en la zona que se encuentra protegida por la Península de Punta Banda posee alturas de ola pequeñas (Figura. 39) excepto en el periodo de 11.2 s que será explicado a continuación.

Los Tp 6.4 s, 8 s y 9.6 s tienen un comportamiento similar entre ellos, el período 11.2 s muestra alturas de ola con distribución espacial diferente a las anteriores, teniendo valores más altos en la zona resguardada por la Península de Punta Banda, siendo el área donde se obtuvieron las alturas más pequeñas en los otros períodos. Este desfase en la distribución de magnitudes de oleaje a lo largo de la línea de costa, puede ser atribuido principalmente al período alto, recordando la ecuación para obtener la longitud de onda en aguas someras ($L = T\sqrt{gh}$) cuando el período es mayor aumenta proporcionalmente la longitud de onda, teniendo cada celda un espaciamiento de 25 m, y considerando que la longitud de onda para un período de 7s es de 98m, no es suficiente una celda de 25m para que el modelo tenga un funcionamiento óptimo.

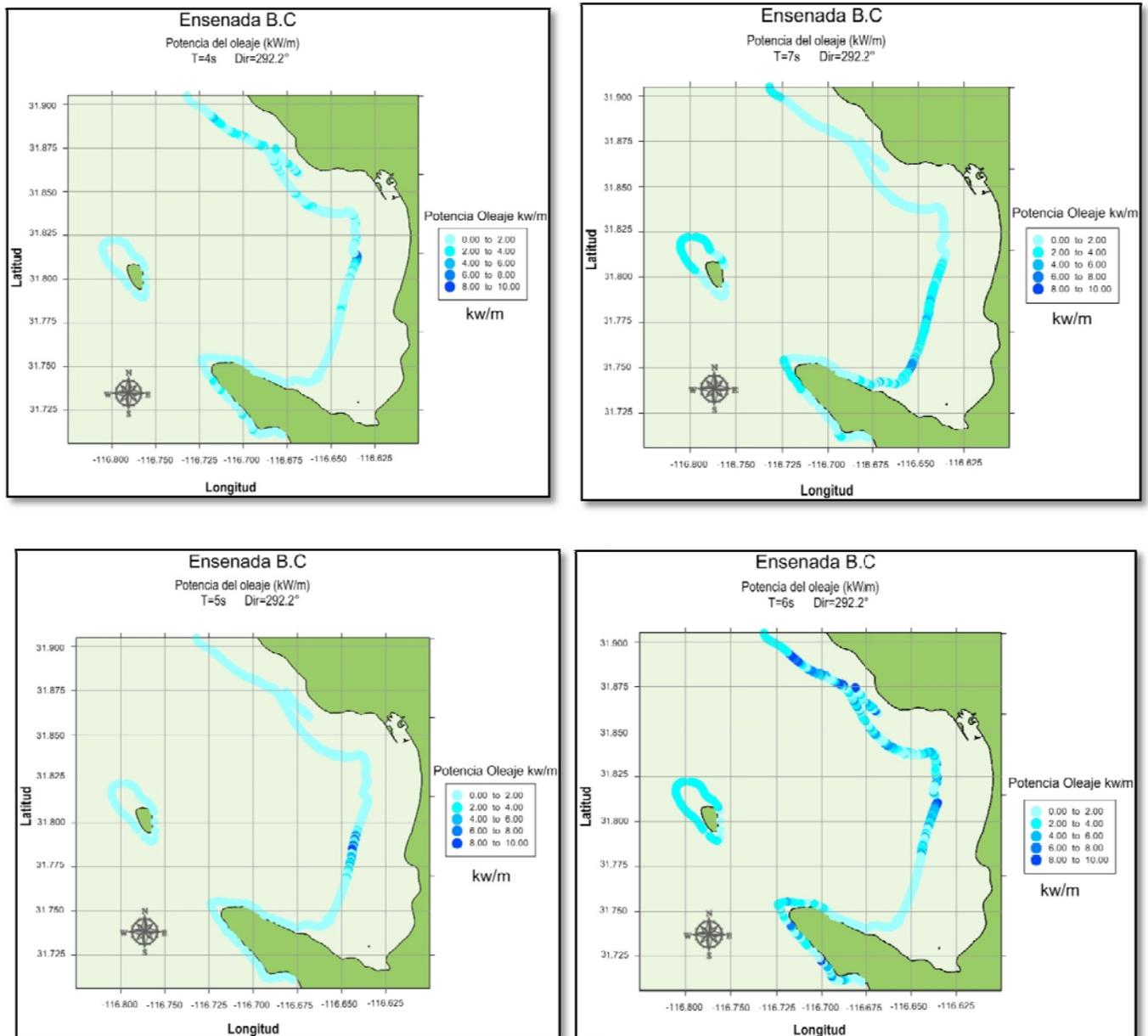
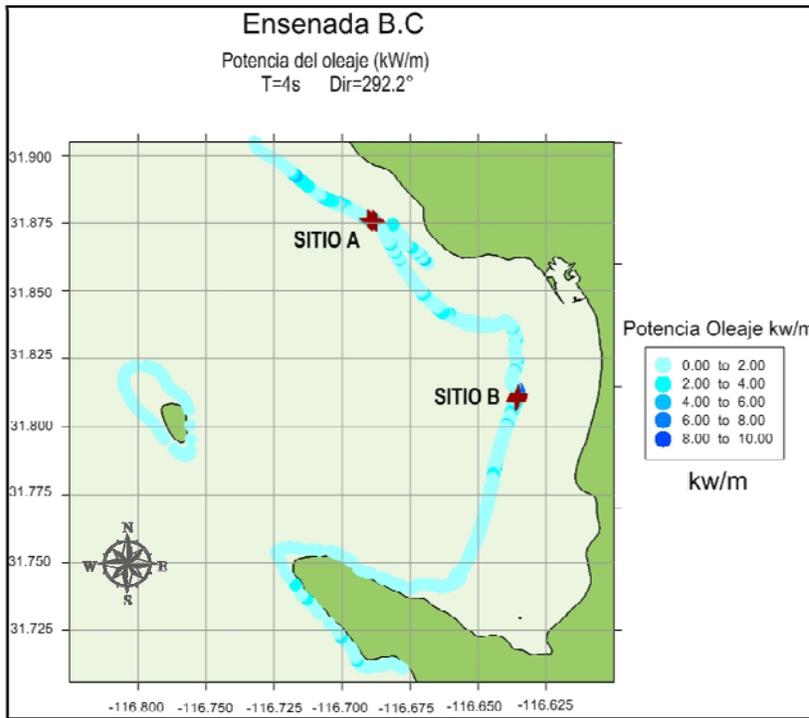


Figura. 53 mapas de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 292°.

Representando solo el caso de Ensenada la altura de ola seleccionada de la gráfica de probabilidad conjunta (Figura. 51) para multiplicarla por la unitaria propagada fue de 0.5m



Los períodos 4 s y 6 s son los valores con mayor probabilidad según la Figura. 51, con base en los mapas que pertenecen a estos períodos se ubicaron dos sitios donde tiene posible energía para su explotación.

En la Figura 54 se pueden observar los 2 sitios seleccionados para profundizar en el análisis del potencial, para lograrlo, se realizaron gráficas de probabilidad acumulada, las que se presentan a continuación:

Figura. 54 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Ensenada B.C

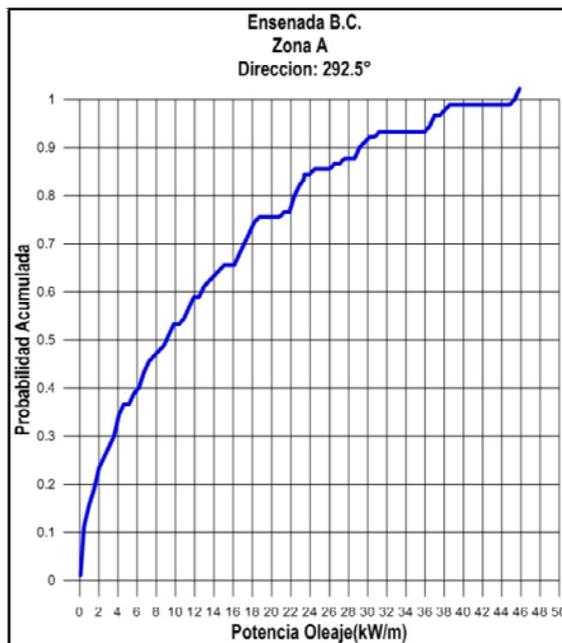


Figura. 55 probabilidad acumulada Zona A

Las primeras celdas analizadas se encuentran en la zona norte de la bahía, estas se eligieron, basándose en los períodos 4 s y 6 s, presentados en la Figura 51 de la probabilidad conjunta.

Para lograr las gráficas de probabilidad acumulada que se muestran en la Figura 55 y Figura 56, se establecieron los rangos de las potencias, limitando el mínimo y el máximo valor presentado en las celdas seleccionadas, con el número de clases, se pueden encapsular las frecuencias y consecuentemente su probabilidad acumulada.

Se observa en la probabilidad de la zona A Figura 54 que se puede presentar una potencia menor o igual a 8 kW/m, con una probabilidad de 0.5, estas para la dirección de propagación de

292.5°.

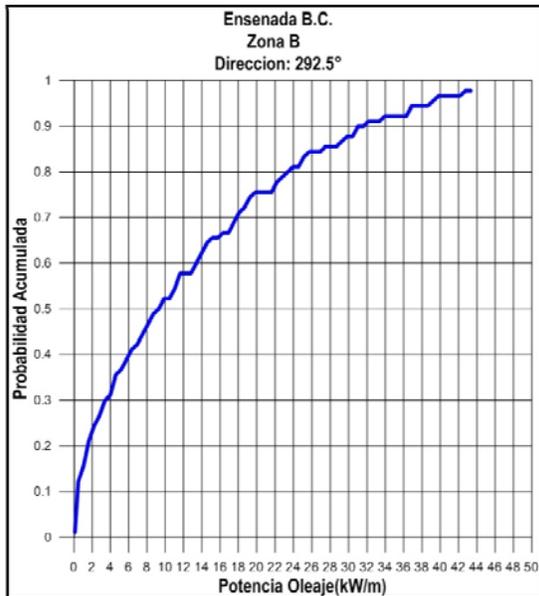


Figura. 56 probabilidad acumulada Zona B

El segundo sitio elegido se ubica en la parte media de la bahía, donde se encuentra mayor potencial en el período de 6s, con menor intensidad en el T=4s. Tomando la Figura 54 de probabilidad acumulada para que se presente una potencia de menor o igual a 10 kW/m se tiene una probabilidad de 0.5.

Es importante recalcar, que los sitios elegidos en este trabajo se basaron en el análisis de la Figura 51 con estados de mar de mayor probabilidad y en las celdas con potenciales resaltantes se presentaron en la bahía.

Para obtener un mejor análisis y elección de sitios con posibilidades de explotación se deben de incluir parámetros socio-económicos de la zona, cuestiones relacionadas con los equipos convertidores de energía, accesibilidad, logística y cuestiones constructivas, que son otro tipo de estudios que complementan la investigación ya realizada.

4.4 CASO DE APLICACIÓN MAZATLÁN SINALOA

4.4.1 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS

El puerto de Mazatlán está situado en la costa occidental de la República Mexicana, muy cerca del Trópico de Cáncer, se localiza en las coordenadas geográficas 23°11'55", latitud norte y 106°25'20" longitud oeste, que están referidas para el faro de dicho puerto en la isla de Reston. El litoral de Mazatlán se caracteriza por presentar promontorios rocosos y costa y acantilada.

De acuerdo con el sistema climático de Köppen, el área de estudio tiene un clima del tipo $Aw_0 (w)(e)$; cálido húmedo con lluvias de verano. La temperatura y la precipitación medias anuales son de 24.1°C y 800 mm respectivamente, existen 2 estaciones climáticas bien definidas, 1) la de lluvia, que corresponde a los meses de junio a noviembre; se encuentra influenciado por la corriente del Golfo de California y por la Norecuatorial, no existen corrientes de surgencia en la zona de estudio.

La marea es de tipo mixto y de poca amplitud, la pleamar media es de 0.452 m y la bajamar media de -0.460 m; la época de las mareas vivas es de octubre a febrero, estas ocurren del mediodía al atardecer.

La orografía la determina las ramificaciones de la Sierra Madre Occidental en la región de la planicie noroccidental teniendo como litoral el Océano Pacífico, donde se levantan los cerros del Vigía, Punta de

Monterén y Monte Silla; este accidente orográfico antes de entrar al municipio de San Ignacio adopta el nombre de sierra de San Juan y de los Frailes.

4.4.2 CARACTERÍSTICAS SOCIALES Y ECONÓMICAS

El turismo y la pesca son las principales industrias de Mazatlán. La ciudad alberga los principales centros turísticos de playa y tiene la segunda mayor flota pesquera en México. La mayoría de los productores del mar procesado en la ciudad es el camarón y el atún. Tiene más de 20 Km de playa son la atracción principal, y la ciudad contiene un gran número de hoteles, restaurantes, bares y tiendas. La ciudad es también el hogar de una cervecería. Una fábrica de café y dos plantas de energía eléctrica.

4.4.3 RESULTADOS

La batimetría de Mazatlán se obtuvo de la misma manera que se describe en la metodología del caso de

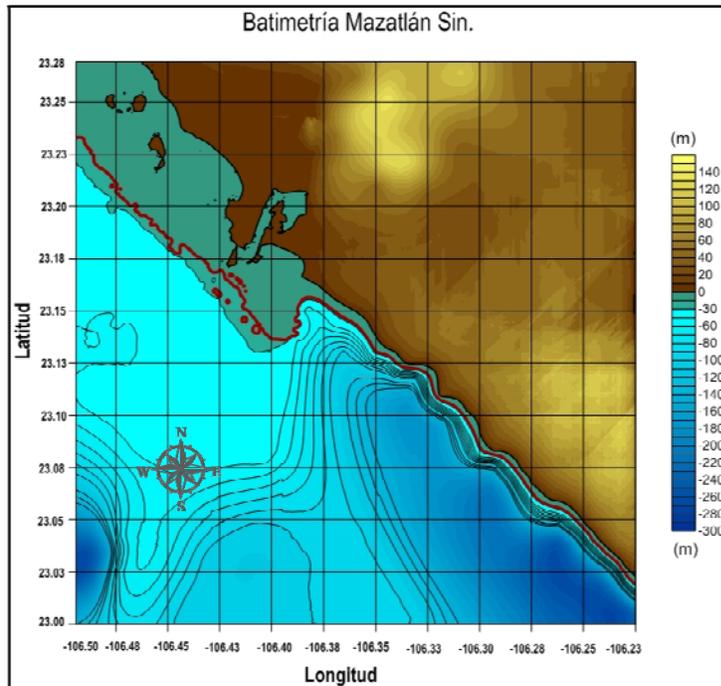


Figura. 57 Batimetría del puerto de Mazatlán Sinaloa

Ensenada B.C., está conformada por un GRD de 1000 X 1000 nodos, con interpolación Kringin cada 30m, se encuentra entre las coordenadas -106.5° - 23° y -106.23° - 23.28° , la Figura 57 muestra la batimetría que resultó de este procedimiento.

Se observa con color rojo la línea batimétrica de 20 m donde se analizó el potencial, las características del lecho marino, tiene un importante papel en el comportamiento de la altura de ola, esto se describirá en los resultados de propagación de ola unitaria. Para identificar las características de estados de mar, se ubicó la celda del Atlas que pertenece a la costa de Mazatlán, las características fueron las siguientes (Figura. 58)

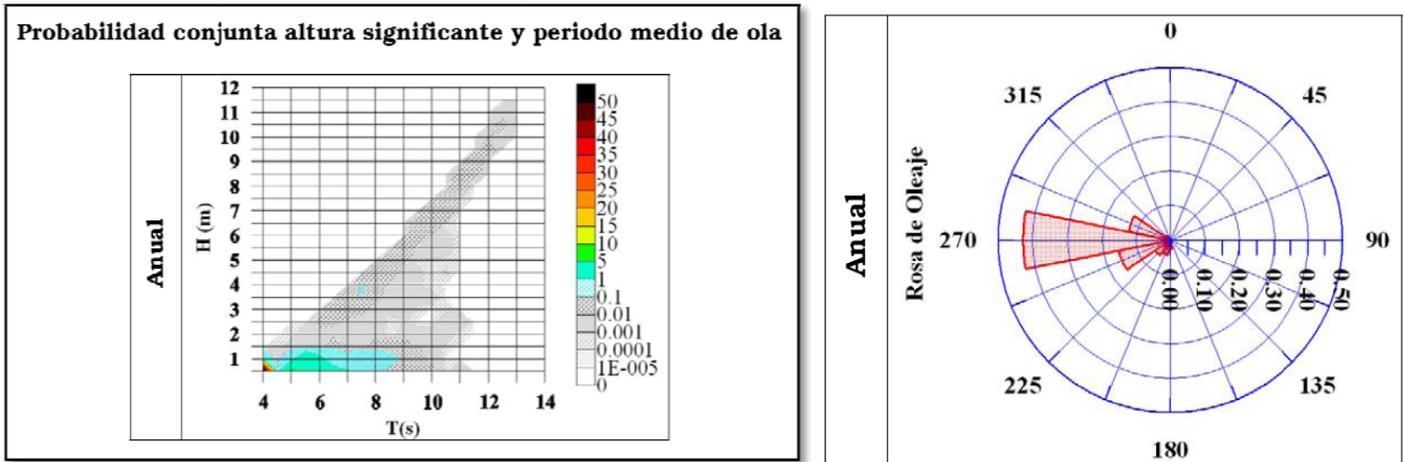


Figura. 58 Rosas de dirección de propagación y de probabilidad conjunta de altura significativa y periodo medio de ola

La dirección predominante es de 270°, tiene un ligero cambio estacional que se examinará con mayor detenimiento. Las alturas de ola que rigen en la zona son menores a 1.5 metros, y períodos con rango desde 4 a 6 segundos (Figura. 58). A pesar de que la altura de ola puede llegar a casi dos metros, se eligió la altura de ola unitaria para su propagación, debido a que la probabilidad es mayor. Los resultados se muestran a continuación:

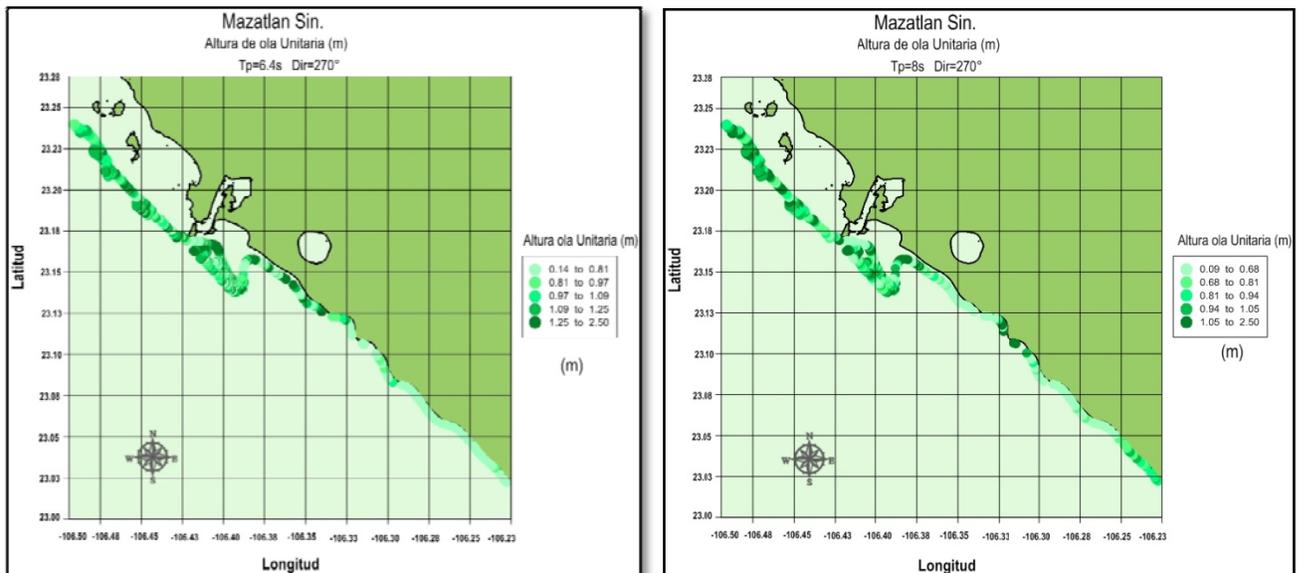


Figura. 59 mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los períodos pico 6.4, 8s, 9.6s, 11.2s en la línea batimétrica de 20m dirección 270°

La batimetría de Mazatlán se divide en dos áreas, la resaltante es al norte del litoral, donde la plataforma continental es más ancha que la configuración de la zona sur, posee una pendiente de fuerte inclinación, las condiciones batimétricas acopladas a la dirección de propagación, crean la combinación para las características del oleaje donde los valores son más altos en la parte norte que la zona sur.

La zona norte reúne factores que son favorables para la explotación energética, el primero es la poca profundidad que existe, llegando a los 30 m, el acceso a esa zona tiene facilidades debido a la cercanía del puerto, añadiendo la dirección de propagación que rige en todo el año, se encuentra un oleaje favorable para la explotación energética (Figura. 59). Este resultado se basó con las condiciones anuales.

Examinando las direcciones estacionales, la propagación cambia en la temporada de verano, se desvía solo 22.5° en dirección Noroeste-Sureste, a pesar de este pequeño cambio, la dirección de 270° tienen una fuerte presencia en la propagación, la importancia de explorar esta combinación de estados de mar se origina con la idea de considerar todas las posibles condiciones en las diferentes épocas del año, ampliando las múltiples posibilidades de explotación energética.

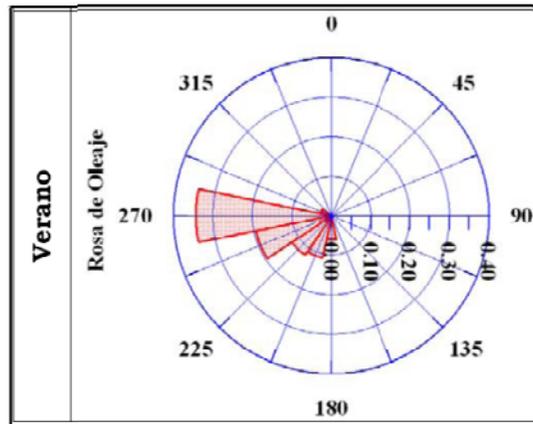


Figura. 60 Rosa de Oleaje de la estación de verano

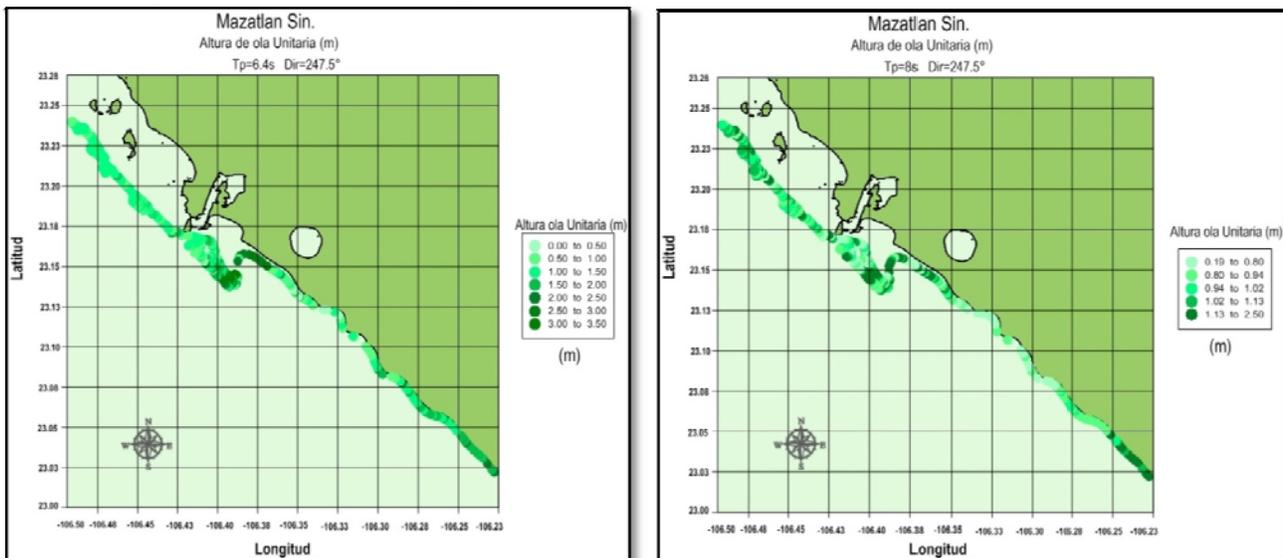


Figura. 61 mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los períodos pico 6.4s , 8s en la línea batimétrica de 20m dirección 247.5°

La dirección que se indaga son los 247.5° Figura 60, que se presenta en los meses de verano los resultados de propagación se muestran en la Figura 61.

A pesar de que el cambio de dirección tiene un ligero desfase, el comportamiento espacial con respecto a la altura de ola cambia drásticamente, teniendo alturas mayores en la zona sur e intermedio del litoral. Un detalle que se debe considerar es en referencia a la combinación de la dirección 247.5° $T_p=6.4s$ (Figura. 61) donde las alturas propagadas se encuentran fuera del rango normal que se han presentado en períodos y direcciones anteriores, esto se analizará con detalle más adelante. Se eligió la altura de ola de un metro, debido a que la Figura. 58 que nos muestra la probabilidad conjunta de estados de mar, no sobrepasa 1m.

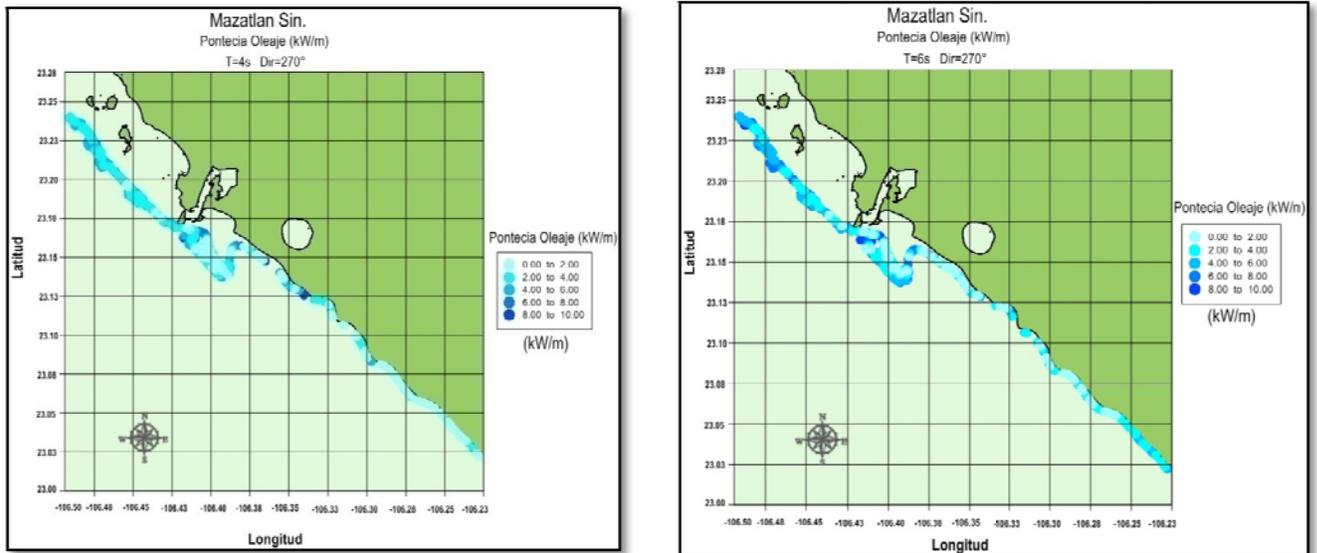


Figura. 62 mapas de distribución espacial de las potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 270° .

Recordando el comportamiento de las alturas unitarias con dirección dominante de 270° , los potenciales tienen una distribución espacial muy similar, con valores más altos en la zona norte y más pequeños en la zona sur, para estos resultados se tomaron los períodos que tienen mayor probabilidad, que se muestra en la Figura 58 (4s y 6s). Los potenciales mayores pueden llegar a sobrepasar los 10kW/m , un valor considerablemente alto comparando la zona sur, donde no exceden los 4kW/m . Detallando los cambios estacionales nos enfocamos a los meses de verano, donde existe un ligero cambio de dirección que influyó en las características de altura de ola y consecuentemente su potencial.

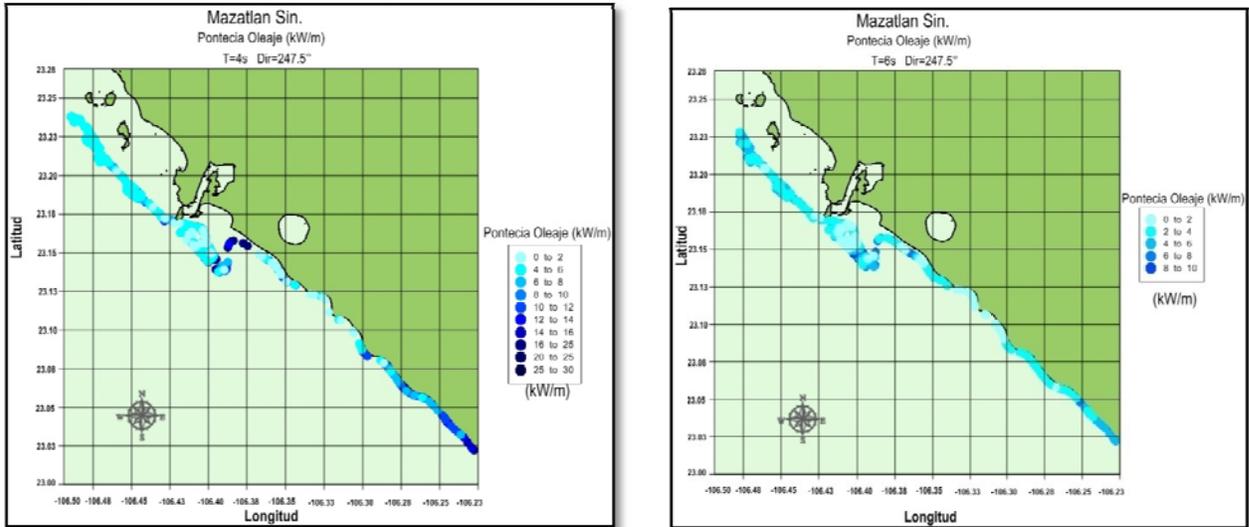


Figura. 63 mapas de distribución espacial de las potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 292°.

los valores unitarios de ola la combinación del período de 4s y 247.5° mostraron un comportamiento fuera de lo normal, arrojando alturas de ola bastante grandes, es nuestro período con mayor incertidumbre, el resultado es indiscutible, ya que una altura de ola que se propaga de 1m es erróneo que llegue a valores de casi 4m.

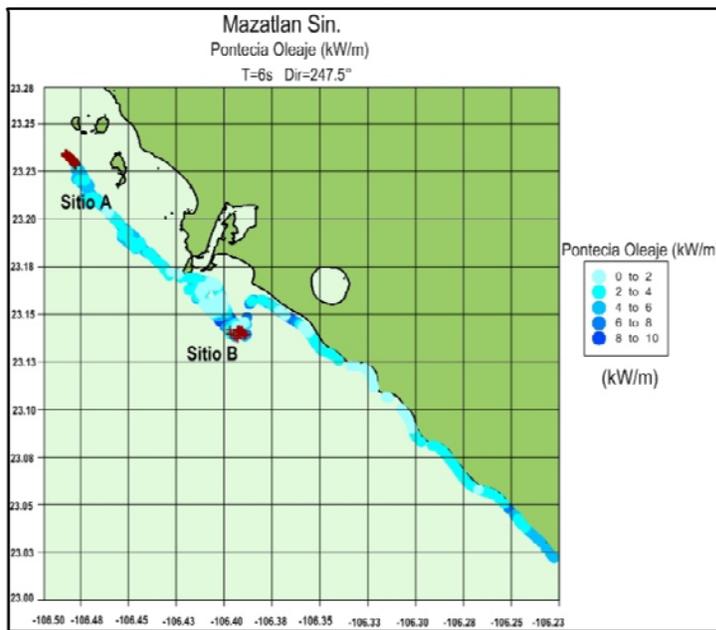


Figura. 64 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Mazatlán Sin

Los potenciales como consecuencia son muy altos, para este caso no se consideraron los valores, debido a las dudosas alturas propagadas. La explicación para que esta combinación de estado de mar tuviera tanta incertidumbre, se puede atribuir a la batimetría y dirección de propagación principalmente. Recordando que unos de los factores a considerar en el modelo REF/DIF, es plantearse una frontera con batimetría uniforme, detallando en la dirección de 247.5° la batimetría es irregular en esa orientación, el modelo no tiene el mismo resultado, provocando incertidumbre. Es importante recalcar que a pesar de que este factor afecta a ciertas direcciones de propagación (en este caso 247.5°)

para el caso de la dirección 270° a pesar de que la batimetría no es tan regular, los resultados evidencian un buen funcionamiento del REF/DIF, por lo que se puede considerar confiable.

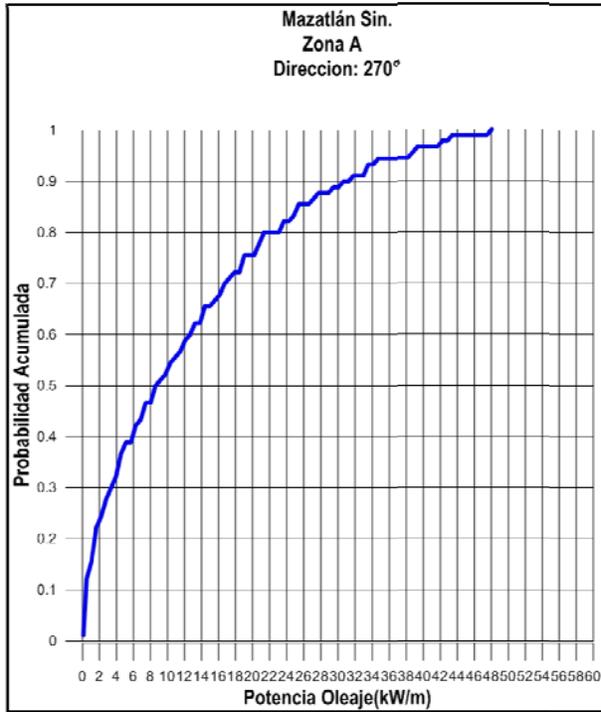


Figura. 65 probabilidad acumulada Zona A dirección 270°

Teniendo localizados los puntos latentes en potencias altas, nos permite ubicar ciertas zonas donde es aprovechable la potencia energética, las diferentes épocas del año, con el cambio de dirección y en el período de 6s, se observa una concentración justo en la parte media del litoral. Los puntos seleccionados en base a estos mapas se muestran en la Figura 64

Para el análisis de los dos sitios, se eligió únicamente la dirección de propagación de 270° esta decisión tomada como consecuencia de las irregularidades explicadas anteriormente, el sitio A se ubicó en la parte norte del litoral, su gráfica de probabilidad acumulada se muestra en la Figura 65.

Si se detalla la Figura. 65 se observa que se puede presentar para la dirección de 270° una potencia menor o igual a 8kW/m, con una probabilidad de 0.5.

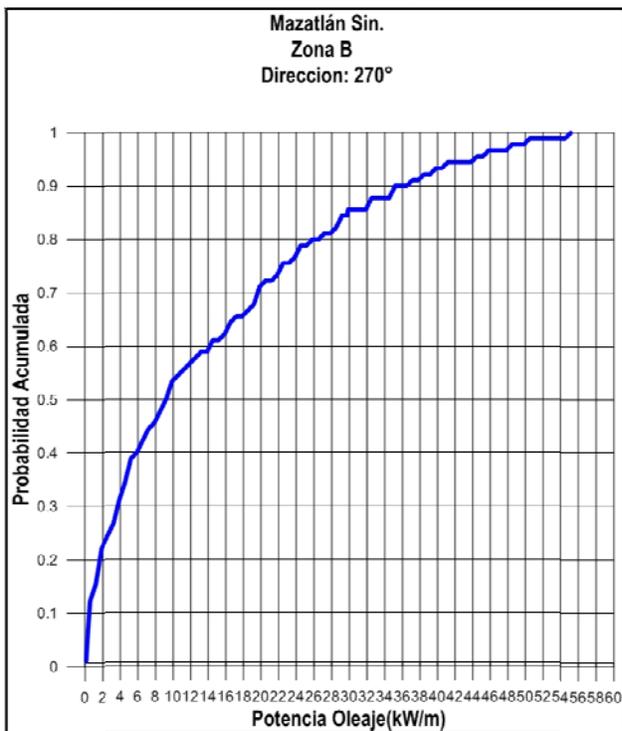


Figura. 66 probabilidad acumulada Zona A dirección 270

El segundo sitio se encuentra en la parte media del litoral, la tendencia de probabilidad acumulada (Figura. 6) tiene un ligero cambio, esto puede indicar que la potencia que se presenta con una probabilidad de 0.5, es menor o igual a 10kW/m, evidencia que estas celdas tienen mayor potencial de explotación

Se limitó el detalle con la estaciones debido a la incertidumbre que se presentó en la dirección de los meses de verano.

4.5 CASO DE APLICACIÓN MANZANILLO COLIMA

4.5.1 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS

La Bahía de Santiago se encuentra localizada entre los 19°07' de latitud norte y 104°22' de longitud oeste; al NW del Puerto de Manzanillo, dentro del litoral del Estado de Colima.

La trinchera Mesoamericana, determina la orientación NW-SE del litoral entre Cabo Corriente y Salina Cruz. También da nacimiento a una fosa marina donde la profundidad alcanza 4,762 m a solamente unos 70km de Manzanillo. La proximidad de esta fosa marina explica la fuerte pendiente del margen continental; en efecto, el zócalo continental es estrecho y su pendiente que varía entre 0°4' y 1° 1' es anormalmente fuerte cuando en general la pendiente de una plataforma continental tiene en promedio 0° 07'.

La pendiente abrupta juega un papel apreciable dentro de las condiciones de la morfogénesis del litoral, ya que afecta el aporte de sedimentos desde el mar. Las corrientes de transferencia, no han podido ser más que longitudinales. El desarrollo importante de las costas de relleno en el litoral de Colima es una prueba de la existencia de dichas corrientes SE-NW, como lo muestra la orientación del cordón de Laguna de Cuyutlán y la del cabo San Francisco. Al nivel de las dos amplias bahías gemelas de Manzanillo y Santiago, las isobatas forman un gancho hacia la costa; este aumento de los fondos bloquea el desarrollo del cordón de Cuyutlán.

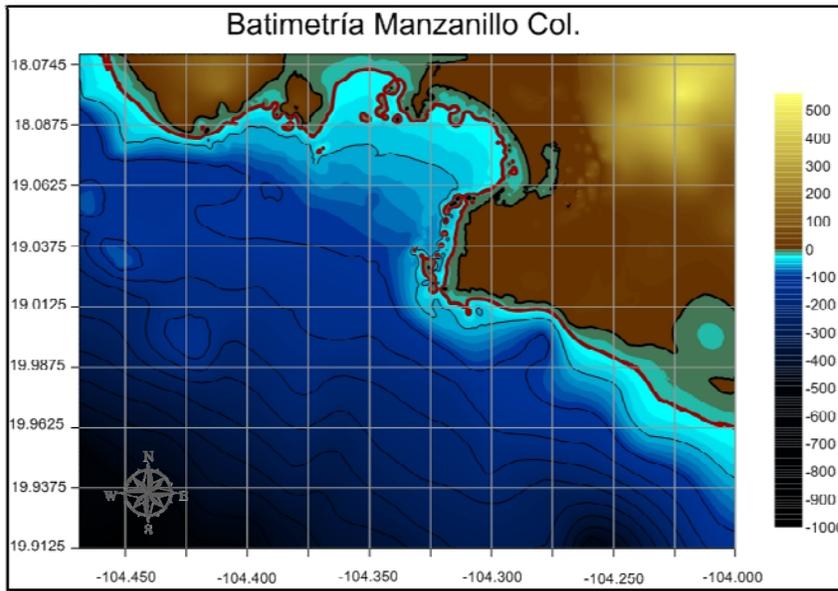
4.5.2 CARACTERÍSTICAS SOCIALES Y ECONÓMICAS

El puerto de Manzanillo posee una infraestructura con tecnología de punta que permite el movimiento de millones de contenedores anualmente. Es uno de los puertos que forman parte del engraje del comercio exterior internacional, en los cuales se encuentran consideradas todas las naciones asiáticas, de Sudamérica, de la propia república mexicana, de la costa del Pacífico de U.S.A y Canadá. En la actualidad representa el principal ingreso de la economía en el estado de Colima.

El comercio exterior es la principal actividad del puerto, que genera divisas muy por encima del turismo, del comercio local y de los servicios. Es conveniente además tomar en cuenta las inversiones por parte de capital extranjeros. Es importante mencionar la creación reciente de la gasificadora de Manzanillo, la cual tuvo un costo de inversión de más de tres mil millones de dólares por el actual gobierno de la república.

4.5.3 RESULTADOS

La batimetría está conformada por 999 X 759 nodos, con una interpolación tipo Kringin cada 30m, se encuentra ubicada entre las coordenadas -104.5° y 19.9°, se mejoró la malla en base a datos de campo y digitalización (Figura 67).



Detallando la batimetría observamos que la profundidad aumenta rápidamente desde la costa sobre todo cerca de las puntas rocosas y al Norte-Noreste de la bahía. Las isobatas 5 y 10m son cerradas y muy cercanas entre ellas, la pendiente va declinando con suavidad conforme la profundidad aumenta, este hecho influye en las condiciones dinámicas. (Figura. 67)

Figura. 67 Batimetría del puerto de Mazatlán Sinaloa

Lo que resalta en la batimetría, es la geomorfología que tiene la línea de costa, nos da la primera impresión para plantear la hipótesis que estos dos factores son los que dominan el comportamiento del oleaje. Las características de estados de mar se basaron en los datos del Atlas de la celda coincidente con Manzanillo, con coordenadas 104.5W y 18.5N. (Figura. 68)

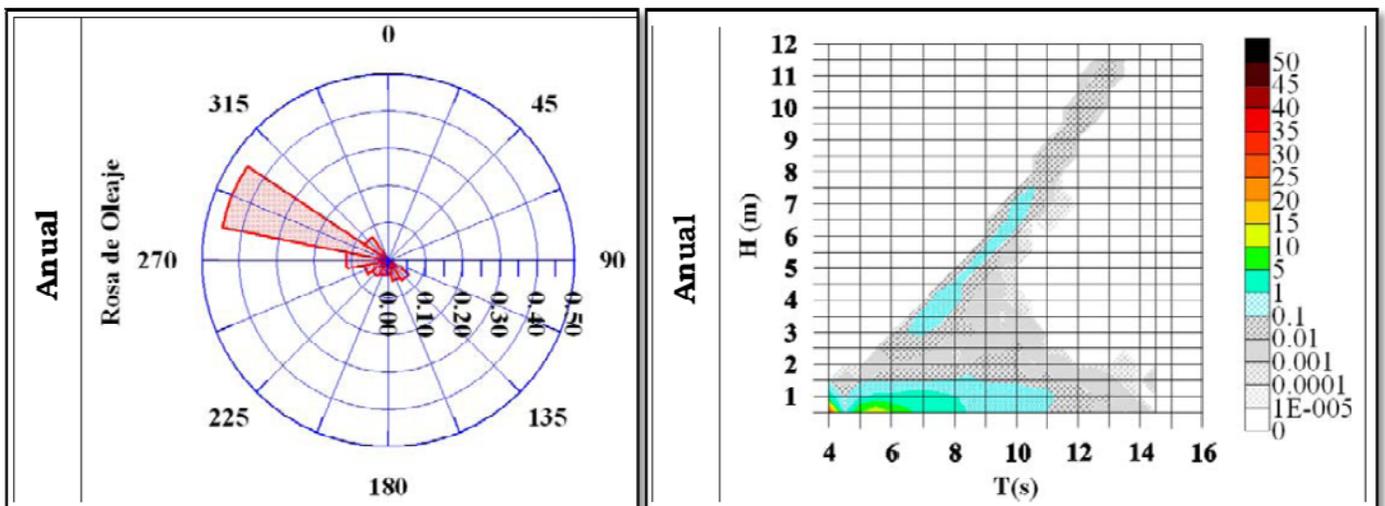


Figura. 68 Características del estado de mar en la celda con coordenadas 104.5W y 18.5N.

La rosa de oleaje nos indica que la dirección predominante anual tiene dirección 292.5°, no hay cambios estacionales significativos, por lo que se analiza únicamente la dirección anual, el oleaje que se presenta tiene valores muy pequeños su máximo no excede el 1.5m, con mayor probabilidad en intervalos menores a 1m, por lo que se tomó como oleaje incidente de 0.5m esto basándose en la gráfica de probabilidad conjunta (Figura. 68)

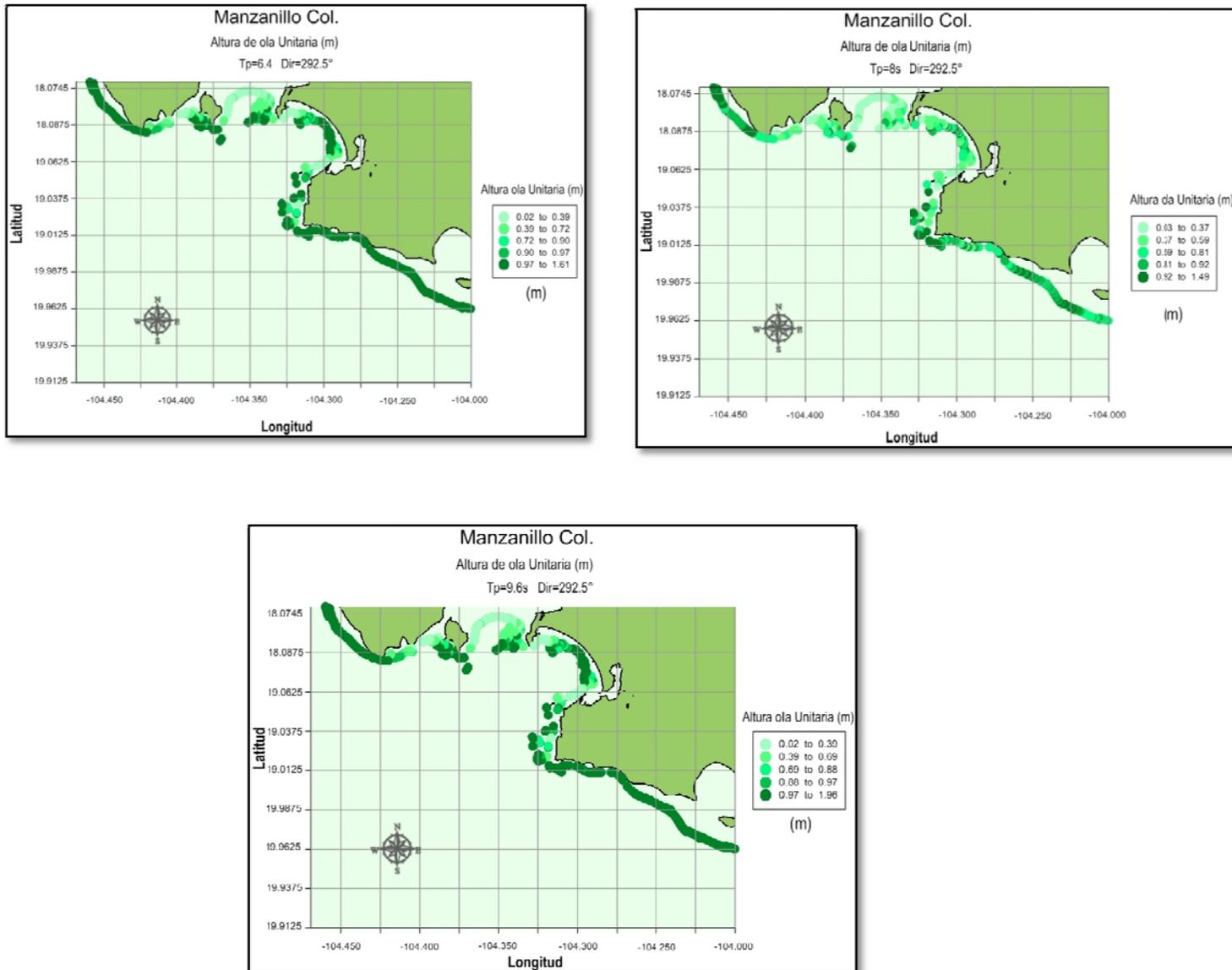


Figura. 69 Mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los periodos pico 8s, 6.4s en la línea batimétrica de 20m dirección 292.5

La hipótesis de que la batimetría y geomorfología, son factores que tienen efecto en la configuración de la altura de ola, se confirmó en la propagación de valores unitarios, se encontraron valores menores en el resguardo de las playas de bolsillo y mayores en las salientes del litoral, la conducta del oleaje nos demuestra que el potencial es mayor en los dos extremos de la costa de Manzanillo.

El período más corto de los tres propagados (Figura. 56), es el que demostró la altura más alta, aun en la zona resguardada de playas de bolsillo, la explicación de esto circunda con la relación de peralte de la ola (H/L), teniendo un período pequeño, la longitud de onda es

más corta, en este cociente H/L la longitud es inversamente proporcional al peralte de la ola, por lo que a menor longitud mayor valor. En la Figura. 70 se muestran los mapas con potenciales de los mismos períodos.

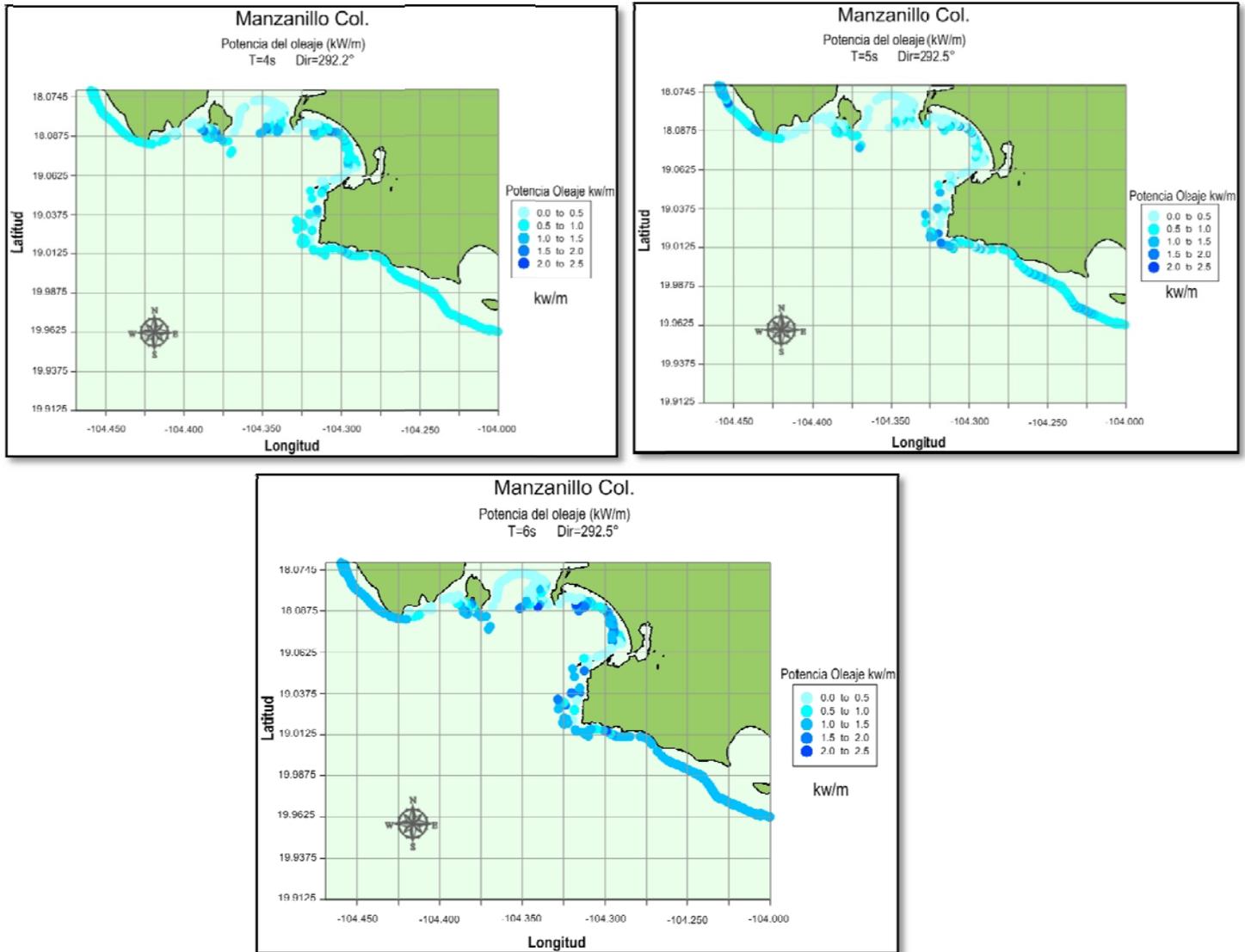
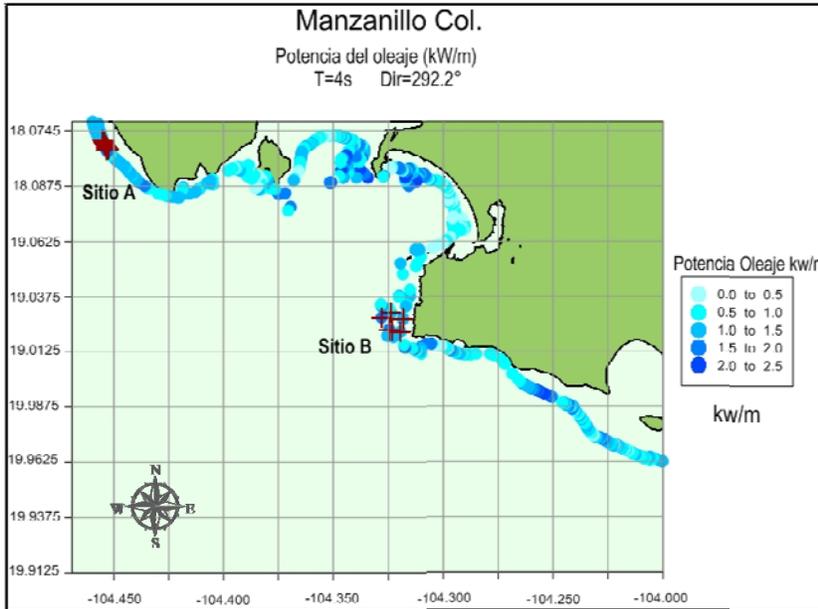


Figura. 70 mapas de distribución espacial de las potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 292.2°.

La potencia presentada en Manzanillo, tiene valores bajos que no exceden los 2.5kW/m, confirmando con el análisis en aguas profundas de las Figuras 18 y 19 de la primera parte de este capítulo, se confirma que el Pacífico es una zona con poca posibilidad de explotación energética.

Si consideramos que la zona del Pacífico Mexicano tiene un área de generación muy grande (*Fetch*), las olas incrementan su altura y longitud, se sospecharía que la potencia energética sería alta, recordando el fenómeno de someramiento, donde la ola se amortigua cuando la profundidad del agua es inferior a la mitad de su longitud de onda, cuan mayor sea la longitud de onda a mayor profundidad comienza el proceso de

someramiento, lo que provoca oleaje con menor intensidad. Dada la orientación del litoral de Manzanillo y su configuración costera, el oleaje en las zonas protegidas evidentemente es más bajo debido al resguardo natural, exponiendo las salientes al oleaje, la dirección de propagación también juega un papel importante en esta distribución.



Se ubicaron dos sitios para ampliar el análisis, el primero se encuentra en la saliente sur del litoral y la segunda en la parte norte de Manzanillo, se muestran en la Figura 71 La elección de estos sitios se tomó con base al análisis de los mapas de potencia Figura 70, donde estos dos puntos muestran una constancia en los tres periodos propagados.

Figura. 71 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Mazatlán Sin

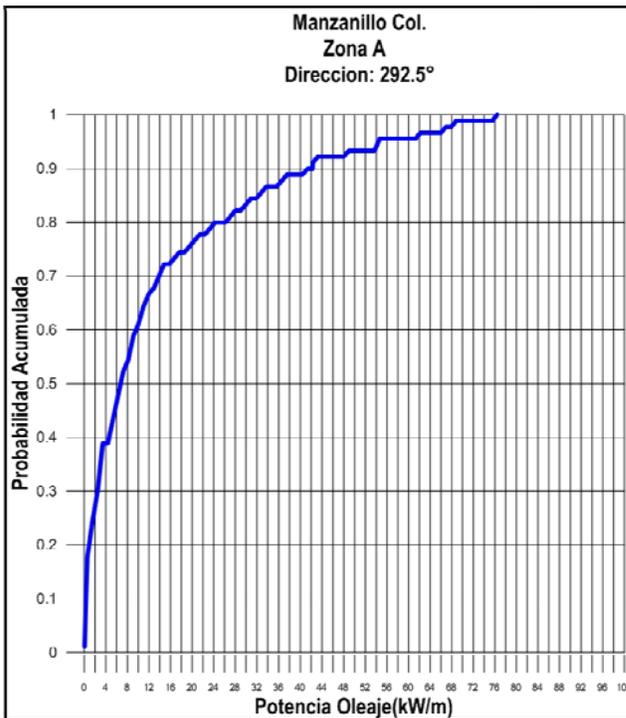


Figura. 72 probabilidad acumulada Zona A dirección 292.5

En el primer caso, la zona A, fue seleccionada con la observación de que en los tres periodos existe un potencial que resalta del resto de la línea batimétrica, indicativo de una zona constante. A pesar de que los valores son pequeños pueden llegar a los 2.5kW/m, según los mapas de las Figuras 70. A

Según en la gráfica de probabilidad acumulada (Figura. 72) que pertenece al sitio A, para que se presente un potencial de 8kW/m con la dirección 292.5° se tiene una probabilidad de 0.5.

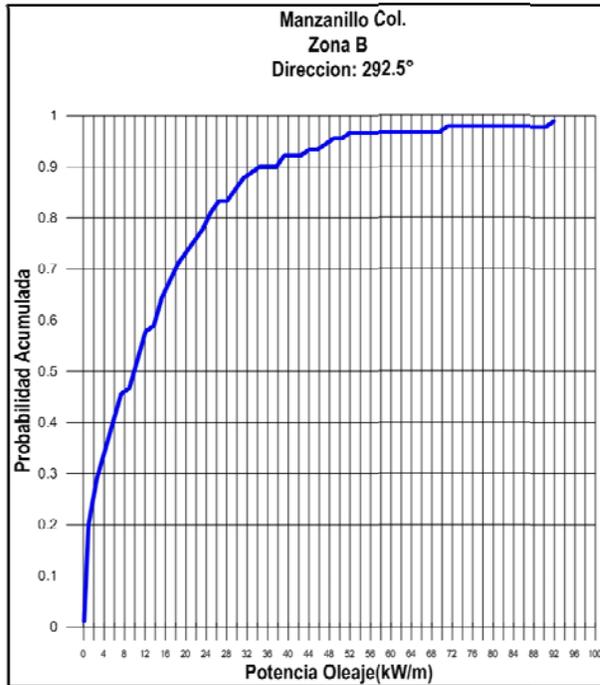


Figura. 73 probabilidad acumulada Zona B dirección 292.5°

El segundo punto seleccionado (Zona B), se basó en la evidencia de que los valores presentados en la punta sur, resaltan del resto de la línea de costa, además de presentar constancia con respecto al cambio de los períodos presentados.

En la Figura. 73 de probabilidad acumulada, se presenta que para una potencia menor o igual a 10kW/m existe una probabilidad de 0.5, está ligeramente mayor que la zona 2.

4.6 CASO DE APLICACION ALTAMIRA TAMAULIPAS

4.6.1 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS, GEOMORFOLÓGICAS

El estado de Tamaulipas está situado en la parte noroeste de la República Mexicana, entre los 22° 12' 31'', y los 27° 40' 52'' de latitud norte y los 97° 08' 38'' y los 100° con los Estados Unidos de América, al sur con los estados de Veracruz y San Luis Potosí, al oeste con Nuevo León y al oriente con el Golfo de México. Está dividido casi a la mitad por el Trópico de Cáncer.

El clima es de tipo cálido subhúmedo, con una temperatura media anual mayor a 22°C con amplias oscilaciones de temperatura de entre 7 y 14 °C. Los vientos reinantes son de este-sureste y los dominantes del este-noroeste. Durante los meses de junio a octubre, los ciclones llegan a producir grandes daños por la intensidad de sus vientos y precipitaciones, que pueden superar los 200km/h y 90 mm/día, respectivamente. La temporada de lluvias es de junio a octubre, con precipitación promedio mensual de 158 mm. En invierno hay precipitaciones por influencia de los "nortes".

En el estado de Tamaulipas, el sitio piloto comprende los municipios conurbados de Tampico, Ciudad Madero y Altamira, La zona conurbada de estos tres municipios surgió por el desarrollo de la industria petrolera y la importancia que cobraron las actividades portuarias ahí realizadas. Sin embargo, las actividades agropecuarias y de pesca se consideran igualmente relevantes. Últimamente el sector turístico ha registrado un crecimiento significativo en la región, del rango de 8%, en el período de 1999 a 2004.

El auge del turismo se debe, en parte, al crecimiento de la actividad industrial en la zona. La producción del sector secundario ha crecido a una tasa sorprendente de 19% anual entre 1999 y 2004, debido a la instalación de maquiladoras en el área metropolitana, gracias a esto, el empleo se ha incrementado en 1.4% anual en el mismo período. Los sectores que han experimentado un decremento en su producción son el agrícola y el pesquero, ambos con una disminución del 6% en ese mismo lapso; sus activos se redujeron 23%.

4.6.2 RESULTADOS

La batimetría está compuesta por 758 X 999 nodos, la interpolación es tipo kringin cada 30m, fue mejorada con datos del puerto de Altamira, se resalta con línea roja la batimétrica de 20m. El gran espaciamiento que tienen entre ellas de cada 10m, son indicadores de una pendiente suave, limitando la malla para correr el modelo a un grd de menos de mil nodos, se alcanzó una profundidad máxima de 45m, esto debido a la configuración de la pendiente con poca inclinación (Figura 74). Los extremos de nuestra malla están compuestos por un sistema lagunar que provoca una línea de costa sin definir, a pesar de esto nos enfocamos en la profundidad de 20m por lo que esta irregularidad no afecta a nuestra zona de estudio.

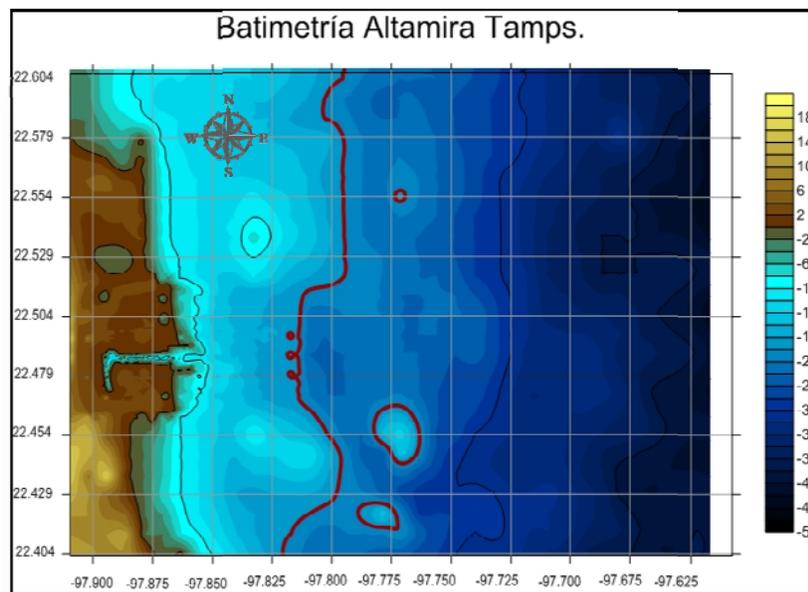


Figura. 74 Batimetría del Puerto de Altamira Tamaulipas

La selección de estados de mar se basaron en las siguientes rosas de dirección de propagación y probabilidad conjunta (Hs-Tm)

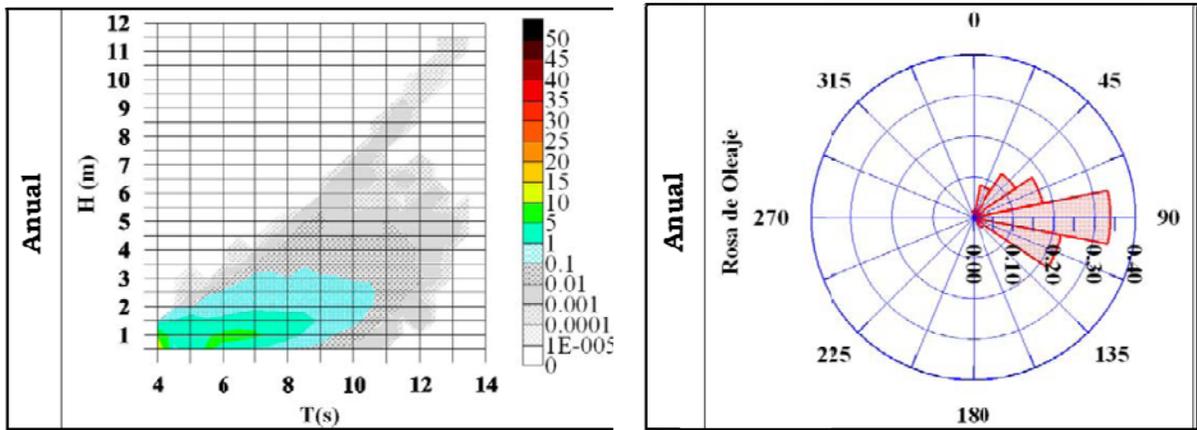


Figura. 75 Características del estado de mar en la celda con coordenadas 97.5W y 22.5N

El promedio anual en la dirección de propagación es de 90° , existen cambios estacionales, que se examinarán en la segunda parte de este análisis, las alturas de oleaje son más altas, pueden llegar hasta los 3m, aun con poca probabilidad(Figura. 62), el umbral de oleaje se limitó a 1m de altura y períodos de 4s, 5s y 6s.

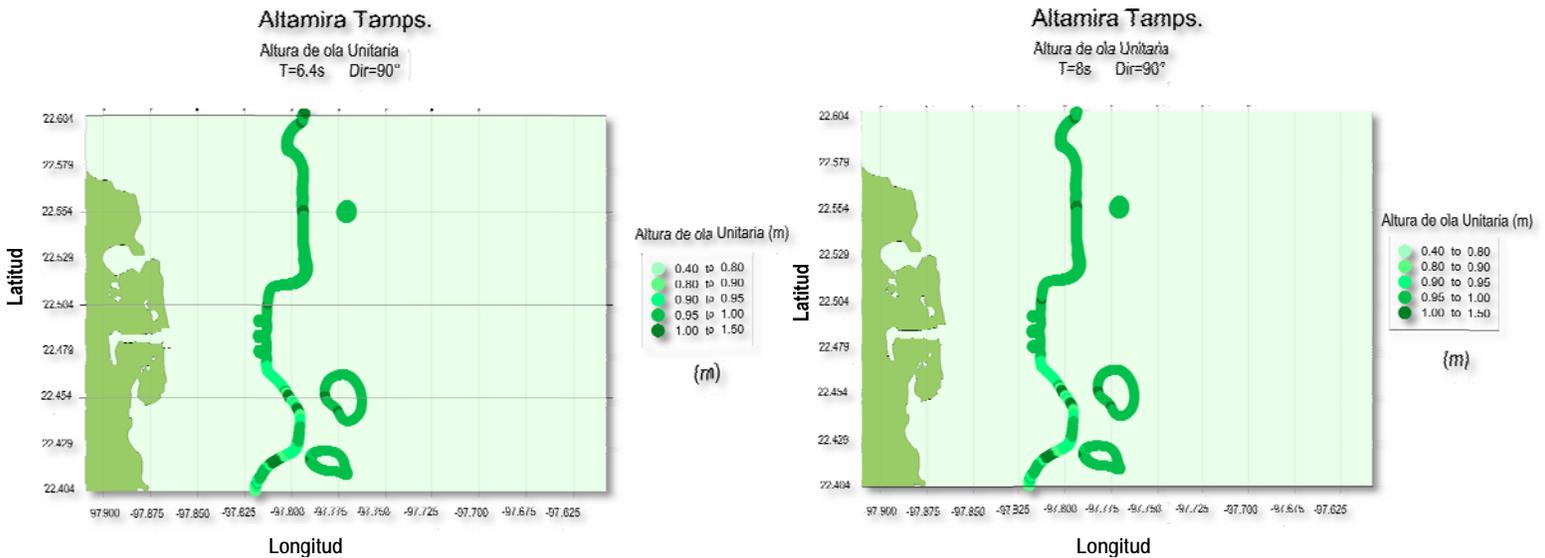


Figura. 76 Mapas de las propagaciones de alturas unitarias de los períodos pico 8s, 6.4 y 9.6 s en la línea batimétrica de 20m dirección 90° .

La dirección predominante de 90° , tiene un comportamiento muy similar en los períodos de $T_p=6.4s$ y $T_p=8s$, mostrando alturas de ola pequeñas en el extremo sur del litoral y mayores alturas en el extremo norte, el $T_p=9.6s$ tiene un cambio ligero con respecto a las intensidades, a pesar de esto, la región con menores alturas sigue perteneciendo a la parte sur de la costa de Altamira, el origen de esta distribución tiene lugar en la configuración batimétrica, mostrando irregularidades en el extremo inferior. El cambio de pendiente en esta parte de litoral deriva oleaje con menor altura y mayor variabilidad, demostrando que el norte de Altamira presenta mayor estabilidad, indicador de área con potencial de explotación.

La propagación muestra un comportamiento estacional con mucha variabilidad, por lo que se analizaron las direcciones en diferentes temporadas del año, debido al cambio tan constante, se optó por elegir la dirección de mayor frecuencia seguida de los 90°. En la Figura. 77 se muestran las rosas de propagación desglosadas en todo el año:

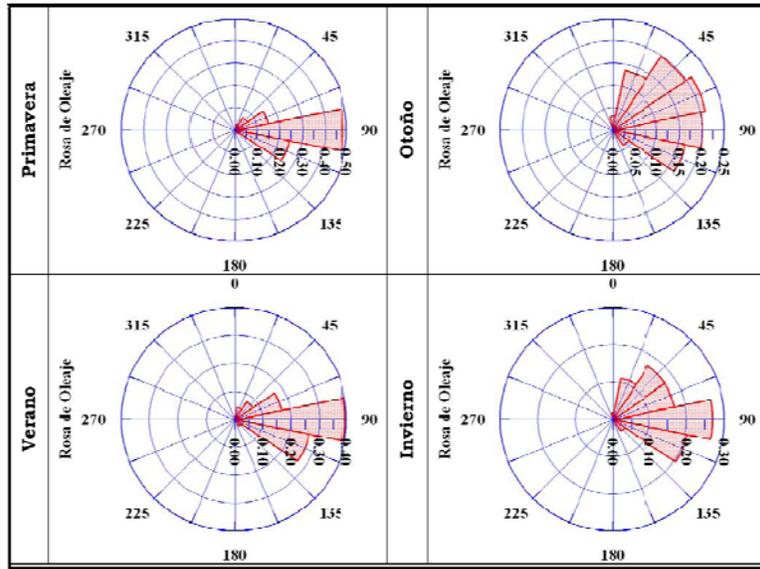


Figura. 77 Rosa de propagación de oleaje de las cuatro estaciones

La dirección seleccionada fue 112.5°, fue la de mayor constancia en las cuatro estaciones, por lo que se eligió como segunda trayectoria a propagar.

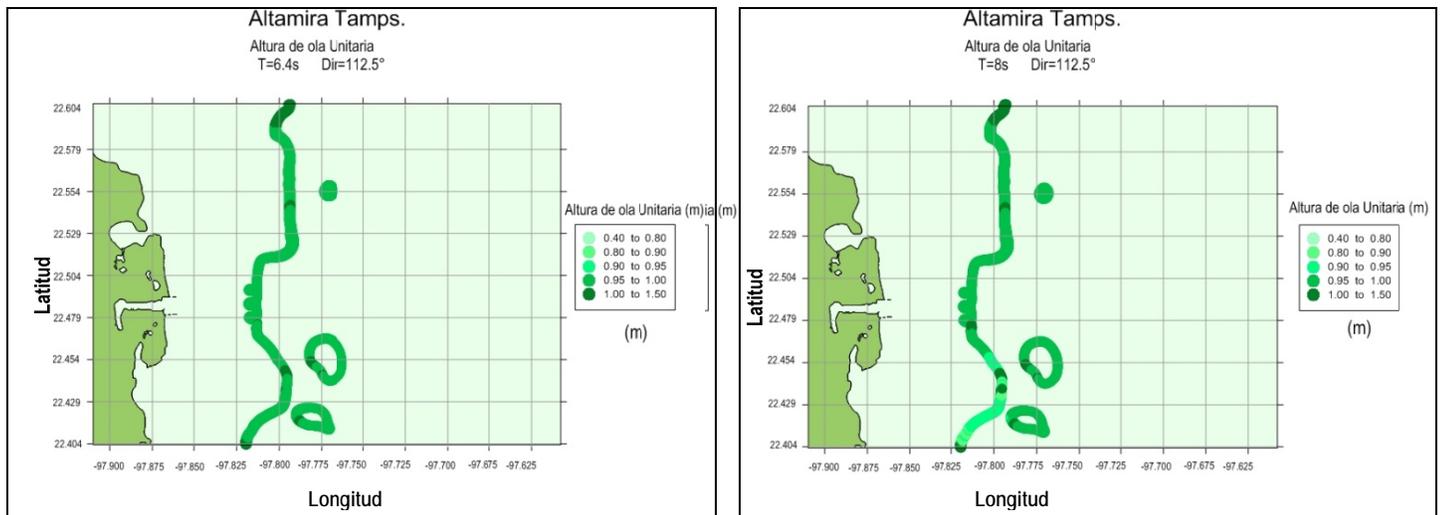


Figura. 78 mapas de distribución espacial de las potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 112.5°.

A pesar del ligero cambio en la dirección, la distribución espacial e intensidades de las alturas tienen valores marcados a lo largo de la línea batimétrica, la zona sur sigue teniendo los valores más pequeños, comparando la parte norte donde las alturas tienen mayor intensidad (Figura 78).

Existe una marcada diferencia con las intensidades entre períodos, a pesar de que las alturas unitarias difieren por poco (Figura. 66), en potencia hay cambios importantes en lo que respecta a intensidades, esto se deriva en buena parte a la ecuación utilizada de Pierson-Moskowitz, donde el período tiene una influencia directa en el producto, siendo este el que rige sobre las intensidades. La zona sur debido a las irregularidades de la batimetría tiende hacia valores más pequeños.

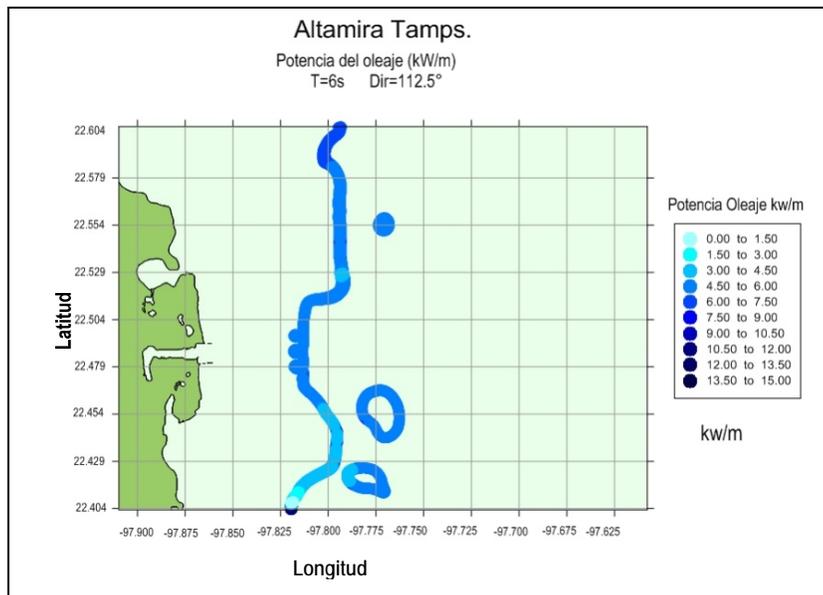


Figura. 79 Mapa de distribución espacial de la potencias en la línea batimétrica de 20m dirección 112.5°.

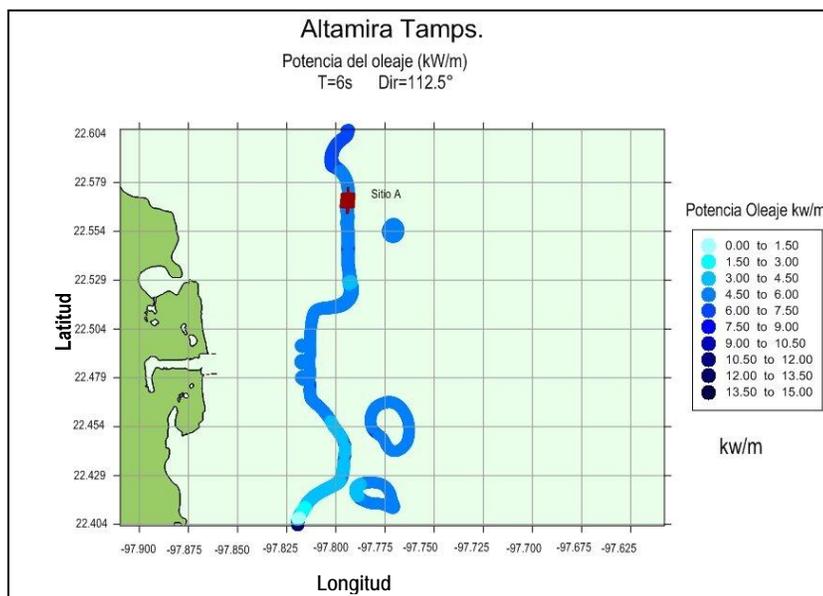
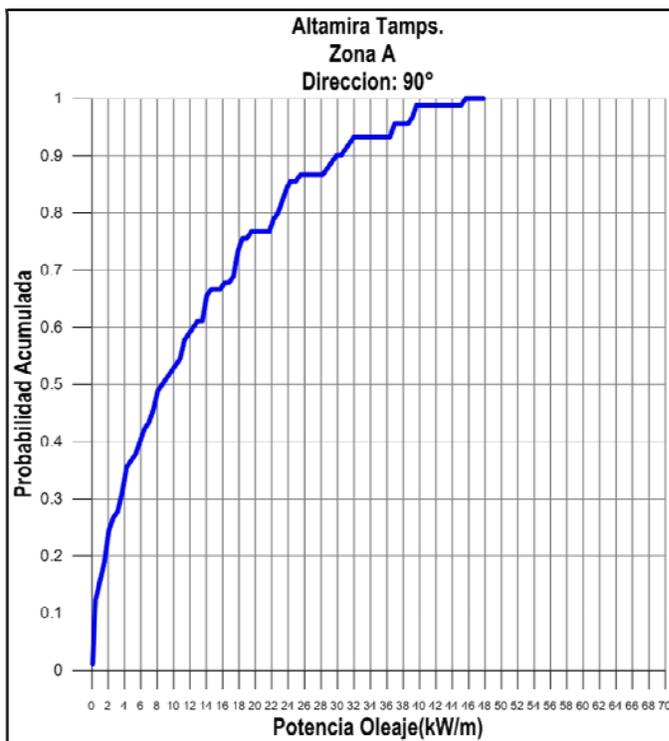


Figura. 80 Ubicación de sitios posibles para explotación energética en Altamira Tamps.

Al modificar ligeramente el ángulo de propagación, la distribución espacial tiene el mismo comportamiento teniendo mayor potencial en la parte norte y menores en la zona sur, si detallamos en los resultados el potencial encontrado en la zona norte no sobrepasa los 10kW/m, los valores más grandes hasta el momento, nuevamente existe evidencias de que el período rige a la potencia. El ángulo juega también un papel importante con el aumento en las intensidades y distribución espacial, tanto en las alturas de ola propagadas y potencia, existen valores más altos en el ángulo de 112.5°. Resumiendo y en base a lo anterior se eligió la zona a detallar, fue seleccionado solo un punto debido a que toda la zona norte tiene distribución uniforme. Con solo una pequeña sección existe la posibilidad de representar esta parte de la línea batimétrica.



Se enfocaron los nodos para el análisis estadístico, en la parte norte de la línea de costa de Altamira, su distribución de probabilidad acumulada, muestra que para que una potencia de aproximadamente 9kW/m se presente se una probabilidad de 0.5.(Figura.81)

Con esto se asegura que la potencia de la región se encuentra en valores menores a 9kW/m. en cualquier época del año

Figura. 81 probabilidad acumulada Zona A dirección 90°

5 CONCLUSIONES

Un aspecto que vale la pena resaltar en el análisis de aguas profundas es el comportamiento espacio-temporal a lo largo de todo el litoral del país en el que existen diferencias muy marcadas en los estados de mar. El origen de estos contrastes, se rige principalmente en la ubicación del país, que se encuentra en medio de dos océanos que tienen características oceanográficas y atmosféricas muy diferentes, influenciados por procesos a nivel global.

Esta condición geográfica, y a la luz del trabajo aquí desarrollado, permite dividir al país en tres regiones donde la energía disponible pudiera ser aceptable en términos de aprovechamiento y dos que tienen niveles propiamente despreciables para tales fines. Es de notar que se detectaron cambios estacionales, sin embargo en términos generales, la distribución de dichas regiones se mantuvo constante.

La primera región se encuentra en la península de Yucatán representando al Caribe Mexicano, donde el potencial permaneció alto en cualquier época del año, aun filtrando las tormentas, estas intensidades altas se deben principalmente a los vientos alisios que tienen origen en África y golpean directamente a la península de Yucatán, las magnitudes de potencia disponible permanecieron constantes y la más pequeña fue de 5 kW/m. En el Golfo de México, la costa frente a Tamaulipas es la de mayor potencial energético disponible. El valor más bajo en todo el año se encuentra en los meses de verano con un umbral de 3kW/m. La tercera región con potenciales de posible interés se localiza en la Península de Baja California, en este caso los valores más bajos se presentan en invierno.

Al realizar el análisis más riguroso en las celdas de aplicación, la variabilidad anual y la probabilidad conjunta, muestran valores más pequeños que en los promedios interpolados en el resto del litoral del país, este enfoque fue muy importante para determinar el verdadero valor del potencial disponible. En promedio, las celdas analizadas presentan un potencial en aguas profundas que no sobrepasa los 2 kW/m.

Respecto de la potencia eólica disponible, el comportamiento espacio-temporal, fue exactamente el mismo que del oleaje, esto tiene lógica si recordamos que el viento es la fuerza generadora del oleaje.

Comparando los resultados en aguas someras, la potencia se duplicó con respecto a aguas profundas, esto es consecuencia principal de la celeridad de grupo, C_g , factor que evalúa la velocidad de la energía asociada al movimiento oscilatorio, recordando el origen de la ecuación utilizada para el cálculo de la potencia en aguas someras, la celeridad de grupo juega un papel importante en el origen de la potencia teniendo igualdad con la Celeridad, en el caso de las aguas profundas la $C_g=C/2$ lo que causa una reducción de casi la mitad de los valores en grandes profundidades.

En los casos de aplicación, la distribución espacial, se vio afectada principalmente por la batimetría y la morfología de la línea de costa. Un punto importante a resaltar es que en todos los sitios de aplicación se presentó una dirección predominante en todo el año, lo cual es benéfico en términos de aprovechamiento pues facilita el diseño y operación de cualquier dispositivo.

El período medio también tiene una influencia en las intensidades de la potencia, esto debido a que el tiempo de exposición tiene mayor impacto que el valor de la altura de ola, esta hipótesis quedó evidenciada en el

caso de Altamira, donde la altura de ola con la propagación de diferentes períodos eran similares en cuanto a magnitud, en cambio las intensidades de la potencia aumentaron proporcionales al período, es decir, a mayor período, mayor potencia.

El potencial en aguas someras a pesar de tener mayor intensidad, presenta valores entre los 8-10 kW/m y los intervalos con mayor frecuencia se concentran en los rangos pequeños. Comparando los resultados de las celdas estudiadas en México con países que poseen potencias muy altas, tomando el ejemplo de Chile donde los valores pueden llegar hasta 100 kW/m en aguas profundas y 80 kW/m en someras, los resultados de México parecen bajos, sin embargo, el uso de estructuras multipropósito y de sistemas híbridos se prevé como una posibilidad real.

La elección de los sitios en aguas someras para generar la probabilidad acumulada, se basó principalmente en la distribución espacial, es importante mencionar, que para localizar zonas potenciales de aprovechamiento, es necesario un estudio detallado, donde se engloben aspectos constructivos y de instalación, así como cuestiones referentes a logística y aspectos físicos que puedan provocar complicaciones para la instalación de dichos equipos.

En términos generales, México no tiene combinaciones de estados de mar, favorables para la explotación energética masiva del oleaje, si solo se consideran valores medios y filtrados de tormentas. Es interesante señalar, sin embargo, que muchas de las condiciones que en México son consideradas tormentas, en otras latitudes no lo son, por lo que realizar un estudio enfocado a condiciones de tormenta que no sean tan extremas puede ofrecer resultado más alentadores. Es obvio pensar, entonces, que si sea de captar la energía de tormentas, que lleva implícita una alta aleatoriedad de ocurrencia, se requerirán dispositivos capaces de almacenar energía o en su defecto, de generar combustibles secundarios.

6 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El estudio se realizó con base a simulaciones de modelos de generación y propagación de oleaje, el trabajo computacional fue un factor dominante en la metodología, lo que podría llegar a provocar incertidumbres propias de la naturaleza de los modelos numéricos, estos métodos son aplicados a razón de la principal limitante, obtener datos de campo con una serie de tiempo lo suficientemente grande para conseguir una estadística confiable es un factor que restringe avances con alto grado de confiabilidad. Para reforzar los resultados es necesario nutrirlos con datos medidos y asegurar mayor confiabilidad.

Debido a las condiciones medias y filtradas de tormentas que tienen los estados de mar en las costas de México, aparentemente no existen escenarios favorables para el aprovechamiento energético, por lo que sería significativo realizar un análisis extremal, para encapsular la energía que se encuentra dentro de estas condiciones.

Implementar una metodología englobando aspectos socio-económicos y factores técnicos en maniobra y construcción para la colocación de terminales, así como profundizar en las características de los dispositivos que se encuentran disponibles en la actualidad, ya que de estos depende el máximo rendimiento y aprovechamiento energético.

El presente trabajo se limitó a evaluar el potencial disponible, sin embargo y dependiendo de los dispositivos que se utilicen, el potencial energético aprovechable puede ser muy diferente. Esto principalmente se debe a las características propias de cada dispositivo y al hecho que normalmente existe un umbral mínimo y máximo de aprovechamiento fuera de los cuales el viento y el oleaje no pueden ser utilizados.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, H. (2008). Evaluation of the potential of wave energy in Chile. *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Portugal: 1-9.
- Bandan, A., C.E., D., M.A., M., & C.D. W. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 16877-16896.
- Battjes, J. (1994). Shallow water wave modelling. *The international Symposium on waves-Physical and Numerical Modelling*, (págs. 1-23).
- Bernhoff, H. (2006). Wave energy resources in sheltered sea areas: A case study of the Baltic Sea. *Renewable Energy*, 2164-2170.
- Betancourt, B. (2012). Determinación de clima marítimo en zonas costeras. *Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México*.
- Bolaños, R. (2004). Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Bonet, R. (1999). Condición absorbente discreta no-local (DNL) en elementos finitos para modelos de propagación de ondas en el mar. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol 15*, 5-20.
- Castro, R. (2011). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento. *Facultad de Ciencias Marinas, UABC*.

- Clement, A., Mccullen, P., Falcao, A., Florentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K. L., y otros. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 405-431.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London: Springer.
- Creus, A. (2004). *Energías Renovables*. Ceysa.
- Daily, W., Dean, R., & Darlymple, R. (1985). Wave Height Variation Across Beaches of Arbitrary Profile. *Geophysical Reserch* , 11917-11927.
- Dingemans, M. O. (1997). Water wave propagation over uneven bottoms. *World Scientific* .
- EEC. (2010). Renewable Energy in Europe, Markets, Trends and technologies. *European Renewable Energy Council* .
- Fernandez, J. (2008). Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. *Informe fin de carrera de la Universidad Politecnica de Madrid* .
- Fernandez, P. (2004). Técnica para aprovechar la energía de las olas. *Departamento de ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria* .
- Galparsoro, I. (2008). Atlas de energía del oleaje en la costa vasca. La planificación espacial marina como herramienta en la selección de zonas adecuadas para la instalación de captadores. *Revista de Investigación Marina* , 1-9.
- Gil, G. (2008). Crisis del petróleo en México. *Foro Consultivo Científico y Tecnológico* .
- Goda, Y. (1983). Analysis of wave grouping and spectra of long-traveled swell. *Rep. Port and Harbor Res, Vol.22, No.1* , 2955-2973.
- Group, W. (1988). The WAM model-A third generation ocean wave prediction model. *Journal Phys. of Geophysical Reserch* , 1775-1810.
- Guedes, S., & Scotto, M. (2004). Application of the r-largest-order statistic for long-term predictions of significant wave height. *Coastal engineering* , 387-394.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. USA: Cambridge University Press.
- I.J., L. (1996). 3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwater. *Coastal Engineering Elsevier Vol 28.* , 229-248.
- I.R, Y. (2006). Directional spectra of hurricane wind waves . *Journal of Geophysical reserch Vol.111* , 1-14.
- Kirby, J. (1989). A note on parabolic radiation boundary condition for elliptic wave calculation. *Coastal Engineering* , 211-218.

- Kirby, J., & Dalrymple, R. (1983). A Parabolic Equation for the combined Refraction-Diffraction of Stokes waves by mildly varying Topography. *J. of Fluid Mechanics* , 453-466.
- Kirby, T., & Dalrymple, R. (1994). Combined Refraction/Diffraction Model, REF/DIF1, Documentation and User's Manual. *Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering* , 163.
- Kotense, J., K.L. M., Dingemans, M. A., & P., V. d. (1986). Wave energy dissipation in arbitrarily shaped harbours of variable depth. *Coastal Engineering* , 2002-20016.
- Lancin, M. (1976). Estudio geomorfológico de la bahía y de la playa de Santiago en Manzanillo, Colima. *Revista mexicana de ciencias geológicas* , 43-66.
- Lizarraga-Arciniega, J. (1976). Variación estacionales de la playa en la Bahía de Todos Santos, Baja California. *Ciencias Marinas, Vol. 3, No.1* .
- Manwell, J. (2006). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Massachusetts, USA: WILEY.
- Martínez, E. (2004). Modelo lineal elíptico de transformación del oleaje. *Tesis de Maestría UNAM* .
- Massel, S. (1996). Ocean Surface Waves; Their Physics and Predictions. *Advanced Series On Ocean Engineering* , 491.
- Mei, C. (1983). The applied dynamics of ocean surface waves. *New York Wiley* .
- Mera, F. (2005). Análisis del oleaje como recurso energético en la costa vasca.
- Odériz, I. (2012). Dispositivo WEC:OWC. Síntesis y posible implementación en el clima marino Mexicano. *Congreso Nacional de hidráulica 2012* .
- Ortega, S. (2010). Estudio de aprovechamiento de la energía del oleaje en isla fuerte (Caribe Colombiano). *Tesis de Maestría Universidad Nacional de Colombia* , 85.
- Peregrine, D. (1967). Long waves on a beach. *Journal of Fluid Mechanics* , 815-882.
- Pérez, D., Bolaños, R., & Silva, R. (2008). Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas mexicanas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México* .
- Pontes, M. (1998). Assessing the European wave energy resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the ASME* , 226-231.
- Pontes, M. T., & G.A., A. (1996). An atlas of the wave-energy resource in Europe. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* , 307-311.
- Pontes, M. T., Aguiar, R., & Piries, O. (2005). Nearshore wave energy atlas for Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* , 249-255.

Rivillas, G. (2008). Reanálisis de oleaje para Mexico:1948-2007. *Tesis de Maestria Universidad Autónoma de México* .

Secretaria de Energia www.sener.gob.mx. (s.f.).

Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Mexico DF: Serie Doncencia 49., Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Silva, R., Diaz, G., Contreras, A., Bautista, G., & Sanchez, C. (2000). Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast. *6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting* , 137-151.

T.K, T., & P.L., L. (1983). A finite element model for wave refraction and diffraction. *Appl. Ocean Res Vol. 5* , 30-37.

Ulloa, M. (1989). Refraccion lineal del oleaje en el puerto de Ensenada. *Tesis de licenciatura, Universidad Autonoma de Baja California* , 48.

Vidal, C., & Medina, R. L. (2004). Wave Height parameter for damege description of rubbles breakwater. *Coastal Engineering* , 387-394.

8 ANEXOS

