



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTUDIO NUMÉRICO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL SUR-OESTE DE
BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
GEOVANNI GONZÁLEZ RAMÍREZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN
INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA | INSTITUTO DE INGENIERÍA |
| DRA. ALMA DEBORA LITHGOW SERRANO | INSTITUTO DE INGENIERÍA |
| DRA. LILIA REYES CHAVEZ | FACULTAD DE INGENIERÍA |
| DR. RODOLFO SILVA CASARÍN | INSTITUTO DE INGENIERÍA |

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón
Secretario: Dr. Silva Casarín Rodolfo
Vocal: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo
1^{er.} Suplente: Dra. Reyes Chávez Lilia
2^{d o.} Suplente: Dra. Lithgow Serrano Alma Debora

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

FIRMA

Agradecimientos

Al CONACYT, al Instituto de Ingeniería de la UNAM y al Posgrado de Ingeniería Civil de la UNAM.

Al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, por su enseñanza y su paciencia a lo largo de todos estos años de pertenecer en el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Y sobre todo por la valiosa asesoría para la creación de esta tesis.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por su apoyo y ayuda otorgada.

A mis padres y hermano, por su apoyo incondicional y su confianza en mí.

A todas esas personas que siempre me brindaron su ayuda, conocimiento y disposición: Erika Ramírez, Debora Ramírez, José Antonio González. Y por supuestos a mis compañeros y amigos: Ana Gabriel Ríos, Alejandro Alejandro, Manuel Castillo.

A todos mis compañeros del Grupo de Costas y Puertos gracias por compartir momentos y conocimientos en mi formación tanto profesional.

A mis amigos, gracias por su motivación de tantos años.

¡¡¡¡ A todos ustedes, Muchas Gracias¡¡¡¡



RESUMEN

En la zona Suroeste de Baja California Sur, México las actividades económicas y la infraestructura costera giran en torno a la gran demanda turística de sus playas de arena. Los procesos naturales y las intervenciones humanas en las costas pueden modificar su geomorfología y poner en peligro a ecosistemas, vidas humanas y actividades económicas, como la turística que da vida a esta región. Una vía para entender los ciclos y las interrelaciones entre los actores del medio físico es a partir de los patrones de transporte de sedimentos. El conocimiento generado al respecto, puede ser la base para el desarrollo de metodologías y herramientas que permitan mitigar los procesos de erosión y los cambios morfológicos no deseados en la costa. Para ello, este trabajo plantea como punto de partida la identificación de la(s) fuente(s) de sedimentos que suministran arena a la bahía de Cabo San Lucas y a las Cascadas de Arena Submarinas.

Con el objeto de diagnosticar la dinámica sedimentaria, se llevó a cabo un ejercicio de modelación numérica de diversos factores hidrodinámicos que afectan el transporte de sedimentos, utilizando el programa DELFT 3D, con el fin de verificar y comprender el flujo, las fuentes y los sumideros de sedimentos en el área de estudio. Los resultados indican que en la península de Baja California Sur la dirección del transporte de sedimentos es de noroeste a suroeste y que son los efectos de difracción y refracción del oleaje los que propician la movilidad del sedimento de la región. Ante ello, la estabilidad de las playas es muy sensible a la construcción infraestructura turística que eventualmente modifique el balance del sistema costero.





Contenido

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 1 |
| Índice de Figuras | 5 |
| Índice de Tablas..... | 7 |
| Capítulo I | 8 |
| 1.1 Introducción | 8 |
| 1.2 Objetivos | 9 |
| 1.3 Objetivos particulares | 9 |
| 1.4 Organización del Trabajo..... | 10 |
| Capitulo II. Dinámica sedimentaria | 11 |
| 2.1 Transporte de sedimento por agua..... | 11 |
| 2.1.1 Umbral de movimiento de partículas por agua | 11 |
| 2.1.2 Modos de transporte sedimentario por flujos hídricos | 13 |
| 2.1.3 Transporte longitudinal..... | 16 |
| 2.1.4 Transporte transversal | 18 |
| 2.2 Transporte de sedimento eólico | 20 |
| 2.2.1 Perfil de velocidad del viento | 20 |
| 2.2.2 Umbral de movimiento de sedimento por viento | 21 |
| 2.2.3 Modos de transporte sedimentario por viento | 23 |
| Capitulo III. Descripción del sitio de estudio..... | 27 |
| 3.1. Ubicación Geográfica | 27 |
| 3.2. Características Geológicas..... | 28 |
| 3.3. Cuerpos geológicos importantes para la zona de estudio | 29 |
| 3.3.1 Cabo San Lucas | 29 |
| 3.3.2 Cascadas de Arena Submarinas..... | 30 |
| 3.3.3 Cabo Falso | 31 |
| 3.3.4 Punta Ballena | 31 |
| 3.4 Características Hidrológicas | 31 |
| 3.5 Temperatura y Precipitación..... | 32 |
| 3.6 Ciclones Tropicales..... | 34 |
| 3.7 Clima..... | 36 |
| 3.8 Características Sedimentarias | 36 |



| | |
|--|----|
| 3.9 Marea | 37 |
| 3.10 Oleaje | 38 |
| 3.11 Viento | 42 |
| 3.10 Características Socioeconómicas y Población | 44 |
| Capitulo IV. Metodología | 46 |
| 4.1 Modelado Numérico | 46 |
| 4.1.1 Descripción del modelo DELFT 3D..... | 46 |
| 4.2 Obtención de Datos del Sitio de estudio..... | 48 |
| 4.2.1 Estimación de gastos del cauce de ríos..... | 48 |
| 4.3 Parámetros de entrada del modelo | 50 |
| 4.3.1 Batimetría..... | 50 |
| 4.3.2 Mallas | 51 |
| 4.3.3 Fronteras y constantes..... | 52 |
| 4.4 Resolución Numérica..... | 52 |
| 4.4.1 Marea | 52 |
| 4.4.2 Oleaje | 53 |
| Capitulo V. Resultados | 55 |
| 5.1 Gastos de ríos..... | 55 |
| 5.1 Modelación Marea | 56 |
| 5.2 Modelación Oleaje | 58 |
| 5.2.1 Oleaje NW (315°)..... | 58 |
| 5.2.1 Oleaje W (270°) | 62 |
| 5.2.3 Oleaje SW (225°) | 64 |
| 5.3 Modelación Marea-Puntos de Descargas de Ríos..... | 67 |
| 5.3.1 Periodo de retorno de 5 años | 67 |
| 5.3.2 Periodo de retorno 10 años | 69 |
| 5.3.3 Periodo de retorno de 20 y 50 años..... | 71 |
| VI. Discusión | 74 |
| VII. Conclusiones | 76 |
| 7.1 Conclusiones..... | 76 |
| 7.2 Futuras líneas de investigación | 77 |
| Bibliografía | 78 |



Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.- Transporte por fondo. Arrastre, Rodamiento y Saltación..... | 14 |
| Figura 2.- Modo de transporte de sedimento por suspensión | 16 |
| Figura 3.- Transporte transversal y longitudinal | 17 |
| Figura 4.- Perfil de velocidad del viento (tomada de MMA, 2017) | 20 |
| Figura 5.- Modos de transporte por viento..... | 23 |
| Figura 6.- Transporte por saltación | 24 |
| Figura 7.- Zona de estudio. a) Ubicación comunidades límites de la zona de estudio, b) ubicación geográfica, c) Todos Santos, d) Cabo San Lucas (imágenes tomadas de Google Earth) | 27 |
| Figura 8 .- Mapa Geológico de Baja California Sur (Tomado de Schaff, 2000) | 28 |
| Figura 9.- Suelos Dominantes en Cabo San Lucas (Tomado de INEGI, 2009) | 29 |
| Figura 10.- Esquema de las Cascadas de Arena Submarinas (Tomada de https://loscabosmexicoblog.com/sand-falls-los-cabos/)..... | 30 |
| Figura 11.- Ubicación de las Cascadas de arena submarina y de accidentes naturales próximos a Cabo San Lucas (Tomada de DIGAOHM,2012)..... | 30 |
| Figura 12.- Regiones hidrológicas. RH03 a) Ac, b) Ab, c) Aa y d) RH06Aa (Tomadas de INEGI 2017) | 31 |
| Figura 13 Media mensual de precipitación de 1981 – 2010. Superior Todos Santos, inferior Cabo San Lucas | 33 |
| Figura 14.- Media mensual de temperatura para el registro de 1981-2010. Superior Todos Santos, inferior Cabo San Lucas | 34 |
| Figura 15.- Trayectoria de Huracanes en Baja California, izquierda huracán Odile 2014 (tomadas de UNISYS, 2017)..... | 35 |
| Figura 16.- Clima en la región de Cabo San Lucas (tomada de INEGI, 2009) | 36 |
| Figura 17.- Rosa de oleaje de altura significantes anual para le serie (1945-2009) y por estaciones anuales de Cabo San Lucas, BCS..... | 39 |
| Figura 18.- Rosa de oleaje para la serie de oleaje (2005-2017) y por estaciones anuales , a 40 km de la comunidad la Tinaja , entre Todos Santos y Cabo San Lucas, BCS. | 39 |
| Figura 19.- Probabilidad de excedencia de Hs para la serie de oleaje (1945-2009) Cabo San Lucas. | 40 |
| Figura 20.- Probabilidad de excedencia de Hs para la serie de oleaje (2005-2017) a 40 km de la comunidad la Tinaja, entre Todos Santos y Cabo San Lucas, BCS..... | 41 |
| Figura 21.- Rosa de periodo pico anual (Tp) para le serie (1945-2009) de Cabo San Lucas, BCS. | 41 |
| Figura 22.- Rosa de periodo pico (Tp) anual (2005-2017), a 40 km de la comunidad la Tinaja, entre Todos Santos y Cabo San Lucas, BCS..... | 42 |
| Figura 23.- Rosa de viento anual para el periodo de 2013-2017. Cabo San Lucas. | 43 |
| Figura 24.- Rosa de viento anual para el periodo de 2014-2017. Todos Santos..... | 43 |
| Figura 25.- Diagrama de Flujo de módulos DELFT 3D | 48 |
| Figura 26.- Ubicación de ríos analizados, a) rio El salado b) rio San Jacinto, c) rio Migriño, d) rio El Salto de Villa (imágenes tomadas de Google earth pro)..... | 49 |



| | |
|---|----|
| Figura 27.- Isoyetas de intensidad de lluvia (Tomada de SCT)..... | 50 |
| Figura 28.- Topo-batimetría de la zona de estudio..... | 51 |
| Figura 29.- Malla escalonada DELFT 3D (tomada de Deltares, 2014) | 51 |
| Figura 30.- Nivel de marea de Todos Santos..... | 56 |
| Figura 31.- Nivel de marea de Plutarco E. Calles..... | 57 |
| Figura 32.- Nivel de marea de Faro Viejo | 57 |
| Figura 33.- Nivel de marea de Cabo San Lucas | 58 |
| Figura 34.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección NW en puntos de la zona de estudio | 59 |
| Figura 35.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje extremal en dirección NW en puntos de la zona de estudio | 60 |
| Figura 36.- Oleaje NW (Hs=1m, Tp=11s) | 61 |
| Figura 37.- Bahía de Cabo San Lucas, Oleaje NW (Hs=1m, Tp=10s)..... | 61 |
| Figura 38.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección W en puntos de la zona de estudio..... | 62 |
| Figura 39.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección W en puntos de la zona de estudio..... | 63 |
| Figura 40.- Oleaje W (Hs=1m, Tp=12s)..... | 64 |
| Figura 41.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección SW en puntos de la zona de estudio..... | 65 |
| Figura 42.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje extremal en dirección SW en puntos de la zona de estudio | 65 |
| Figura 43.- Oleaje SW (Hs= 1m, Tp=10s)..... | 66 |
| Figura 44.- Oleaje SW, Bahía de Cabo San Lucas | 67 |
| Figura 45.- Nivel de Marea, simulación periodo de retorno de 5 años | 68 |
| Figura 46.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 5 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)..... | 69 |
| Figura 47.- Nivel de marea, simulación periodo de retorno de 10 años..... | 70 |
| Figura 48.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 10 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)..... | 71 |
| Figura 49.- Nivel de marea, simulación con periodo de retorno de 20 años..... | 71 |
| Figura 50.- Nivel de Marea simulación con periodo de retorno de 10 años..... | 72 |
| Figura 51.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 20 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)..... | 73 |
| Figura 52.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 50 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)..... | 73 |



Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Rangos de movimiento y esquemas utilizando el número de Rouse (tomada de CFE,2014) | 14 |
| Tabla 2.- Factores de influencia en la velocidad de inicio de movimiento (tomada de MMA, 2007) | 22 |
| Tabla 3.- Modos de transporte de viento por tamaño de grano | 23 |
| Tabla 4.- Ciclones tropicales que han afectado a Baja California Sur de 1981-2016 (datos tomados de UNISYS, 2017) | 35 |
| Tabla 5.- Rangos de marea astronómica, estación San Carlos (Tomada de DGP, 2010) | 37 |
| Tabla 6.- Rangos de marea astronómica, estación Cabo San Lucas (Tomada de DGP, 2010) | 38 |
| Tabla 7.- Número y nombre de ríos analizados | 48 |
| Tabla 8.- Indicadores del cauce principal de los ríos analizados | 49 |
| Tabla 9.- Simulaciones para oleaje | 54 |
| Tabla 11.- Gasto pico para periodo de retorno de 5 años | 55 |
| Tabla 12.- Gasto pico para periodo de retorno de 10 años | 55 |
| Tabla 13.- Gasto pico para periodo de retorno de 20 años | 55 |
| Tabla 14.- Gasto pico para periodo de retorno 50 años | 56 |



Capítulo I

1.1 Introducción

En la costa Suroeste de Baja California Sur, se encuentran sitios de alta demanda turística, que en años recientes han experimentado un aumento importante en el número de visitantes (INEGI, 2016). El turismo de sol y playa es el más socorrido, por lo que es de trascendente importancia mantener las playas en condiciones saludables. Dado que las playas de esta zona son, predominantemente de arena, es necesario determinar los factores involucrados en el transporte de sedimentos, a fin de ofrecer diagnósticos acertados y evitar efectos negativos en estos ecosistemas.

Uno de los sitios más importantes en esta zona, por su relevancia económica, al igual que por su gran atractivo natural y turístico, es Cabo San Lucas. En este lugar se encuentra uno de los mayores referentes naturales de México, las Cascadas de Arena Submarinas (CAS), únicas en la costa del Océano Pacífico y que se encuentran localizadas dentro del polígono del “Área Natural Protegida de Flora y Fauna de Cabo San Lucas” del gobierno federal. Las CAS han sido nombradas desde 2005 patrimonio natural de la humanidad por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (WHSN, 2005).

Pocas han sido las investigaciones realizadas con el propósito de dar explicación al transporte de sedimento de esta zona de Baja California Sur. Según estudios realizados por Murillo-Jiménez, 2007 sobre las fuentes de sedimentos de algunas de las playas importantes de Baja California Sur, la zona de estudio está influenciada por la dinámica del Océano Pacífico y presenta dominancia de transporte litoral en dirección Sureste.

Ante ello, este trabajo se enfoca en modelar numéricamente las condiciones hidrodinámicas del Suroeste de la península de Baja California como la vía para identificar los patrones de circulación que gobiernan el transporte de sedimentos en la región y así proponer una hipótesis de la dinámica sedimentaria que da lugar a la morfología costera y a las CAS. Los factores hidrodinámicos que fueron analizados, con excepción del transporte eólico, corresponden a aquellos capaces de modificar el transporte de sedimentos, a saber, el oleaje, la marea y la descarga de los arroyos de la región en temporada de tormentas. El software utilizado es de uso libre es el DELFT 3D, en sus módulos FLOW y WAVE (Deltares, 2014).



1.2 Objetivos

A través del modelado numérico, explicar y verificar el flujo de las fuentes y los sumideros de sedimentos en la zona costera del Suroeste de Baja California Sur para la generación de conocimientos útiles que permitan el establecimiento de políticas de conservación y ordenamiento territorial con un uso sostenible de las costas del Suroeste de Baja California Sur.

1.3 Objetivos particulares

- Analizar la respuesta hidrodinámica y morfológica de la zona de estudio, comprendida en las comunidades de Todos Santos a Cabo San Lucas, Baja California Sur.
- Determinar el grado de influencia del oleaje, marea, corrientes y cauces involucrados en el transporte sedimentario en el Suroeste de Baja California Sur.
- Analizar los diferentes factores hidrodinámicos que transportan sedimento a la bahía de Cabo San Lucas, zona donde se encuentran grandes atractivos turísticos de importancia, como son las cascadas de arena submarina.



1.4 Organización del Trabajo

El presente trabajo está constituido por siete capítulos, cuyo contenido se describe a continuación:

*Capítulo 1. **Introducción:*** En este capítulo se muestra un panorama general de la importancia que tiene la zona Suroeste de Baja California Sur, haciendo énfasis en los sitios de importancia turística y la influencia que tienen los factores hidrodinámicos para la estabilidad de playas y el transporte de sedimentos. Finalmente, se presentan los objetivos de la tesis.

*Capítulo 2. **Dinámica sedimentaria:*** Se presentan las condiciones en que ocurre el transporte de sedimentos por agua y viento; se describen los modos de transporte debidos a estos dos agentes y se presentan algunas formulaciones para estimar el transporte transversal y longitudinal por acción del oleaje en la costa.

*Capítulo 3. **Descripción del sitio de estudio:*** En este capítulo se realiza una caracterización de la zona de estudio: su geología, condiciones hidrológicas, temperatura, precipitación, clima y marinas (marea, oleaje y sedimentos). Se presenta una breve descripción de las características socioeconómicas y de población.

*Capítulo 4. **Metodología:*** Se presenta la descripción del software DELFT 3D, así como la metodología para la obtención de los forzamientos de modelado como son gastos de los ríos y características de oleaje, así como la descripción de los parámetros de entrada de cada una de las simulaciones realizadas.

*Capítulo 5. **Resultados:*** En este capítulo se presentan los resultados vía el modelado numérico como son: los gastos pico de ríos y los patrones de oleaje y viento.

*Capítulo 6. **Discusión:*** Se presenta una comparativa y discusión con respecto a los resultados obtenidos en el presente trabajo con la investigación realizada por otros autores.

*Capítulo 7. **Conclusiones:*** En este capítulo se exponen las conclusiones del estudio y las futuras líneas de investigación.



Capítulo II. Dinámica sedimentaria

El sedimento puede ser transportado por diversos agentes como los son el viento, el oleaje, las corrientes y, en última instancia, por la interacción entre ellos. El movimiento de los sedimentos en la zona costera es el factor más importante para su estabilidad (Félix, 2014)

El transporte de sedimentos en las playas es un proceso dinámico generalmente gobernado por las condiciones del oleaje local. Lo anterior significa que se pueden encontrar diferentes direcciones y magnitudes del transporte litoral a lo largo del tiempo. En determinadas condiciones, el transporte puede permitir grandes depósitos de sedimento por épocas de calma (acreción) o la pérdida de sedimento por condiciones extremas (erosión). Lo anterior es función de las condiciones climáticas en diferentes épocas del año en la zona costera (Silva ,2014)

Por su parte, el viento desplaza las partículas sueltas, con mecanismos similares que los flujos hídricos, y como función del tamaño del grano y de la velocidad del fluido. Las partículas más gruesas son transportadas por rodamiento y arrastre sobre la superficie; los granos menos gruesos son capaces de viajar por saltación elevándose hasta alturas de 2 o 3 m en algunos casos; finalmente, las partículas finas (limos y arcillas) pueden desplazarse en suspensión y ser elevadas a grandes alturas por las corrientes ascendentes frecuentes en las regiones cálidas (Silva, 2014).

2.1 Transporte de sedimento por agua

En este apartado se analizan las condiciones que producen el inicio de movimiento de sedimento, los modos de transporte ante un flujo hídrico y los tipos de transporte por acción del oleaje en la costa.

2.1.1 Umbral de movimiento de partículas por agua

El movimiento de una partícula de sedimento es causado por las fuerzas que actúan sobre ella; si estas fuerzas no son lo suficientemente intensas para moverla, permanecerá en el sitio donde se encuentra. Por lo cual, una componente clave en el desarrollo de la teoría de transporte de sedimentos ha sido el concepto de umbral del esfuerzo cortante o velocidad crítica para el inicio de movimiento. Este concepto engloba la idea de que el movimiento de sedimentos se inicia cuando la velocidad orbital o el esfuerzo cortante en el fondo alcanzan cierto valor crítico. El valor de este



esfuerzo depende de muchos factores, como son las propiedades del flujo, las características del grano y el fondo.

La determinación del esfuerzo cortante con el cual se inicia el movimiento de material en el fondo es importante, pues a partir de este valor se puede estimar el transporte de sedimentos. Muchos esfuerzos se han enfocado en la derivación de relaciones entre el fluido y el sedimento para determinar las condiciones de umbral en el inicio del movimiento de material (Pedrozo, 2011).

Para determinar el inicio de movimiento del sedimento, se realiza un análisis considerando al flujo como continuo y oscilatorio. Para conocer en qué momento una partícula empezará a moverse, es necesario considerar tanto la fuerza de arrastre como la de sustentación que actúan sobre la partícula, y a su vez, el peso propio de la partícula. Mediante estos valores y considerando el número de Reynolds, es posible obtener un parámetro que relacione las fuerzas cortantes sobre la partícula con su peso propio. Este parámetro se denomina parámetro de Shields y su expresión es:

$$\psi = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (2.1)$$

Donde:

τ_b Esfuerzo cortante de fondo

$(\rho_s - \rho)gd$ Peso de la partícula

En el peso de la partícula se puede identificar a partir de ρ_s como la densidad de la partícula; ρ es la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y d el diámetro de la partícula. Si ψ es más grande que 0.03, la partícula se moverá.

Madsen y Grant (1976) y Sleath (1984), sugirieron que el parámetro de Shields podía representarse para flujos oscilatorios como:

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} = f_1 \left(\frac{(\rho_s - \rho)gd^3}{\rho v^2} \right) = f_2 \left(\frac{d}{4v} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}} gd \right) = f_3 \left(\sqrt[3]{\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho v^2}} d \right) \quad (2.2)$$

Donde:

τ_c Esfuerzo cortante crítico en el fondo

v Viscosidad cinemática del agua

f_1, f_2 y f_3 Funciones de argumentos dados, en los cuales el segundo y tercer argumento se identifica como la raíz cuadrada y la raíz cubica del primero



Esta nueva forma para la relación crítica de Shields tiene una ventaja sobre la ecuación 2.1, debido a que la ecuación 2.2 no involucra la velocidad cortante que se considera en el número de Reynolds, la cual es una función del tiempo en flujos oscilatorios e involucra un factor de fricción (CFE, 2014).

2.1.2 Modos de transporte sedimentario por flujos hídricos

En el transporte de sedimento, existen cuatro procesos que harán que las partículas se desplacen junto con el flujo:

- La presión que el agua ejerce sobre el suelo
- Los posibles levantamientos verticales del fondo o lecho
- La turbulencia
- La colisión entre partículas

Los procesos mencionados generan cuatro modos de transporte: arrastre, suspensión, saltación o reptación y rodamiento. Entre los parámetros para estimar la condición a partir de la cual se movilizan las partículas conforme a los modos de transporte, es el parámetro de Rouse determinado por la siguiente expresión (CFE, 2014)

$$Rouse = \frac{\omega_f}{\gamma_d(u_*^*)k} \quad (2.3)$$

Donde:

γ_d Es un factor aproximado con 1, obtenido de la diferencia entre la difusión del fluido donde se encuentra la partícula

k La constante de von Karmán, 0.4 para agua limpia

ω_f Velocidad de caída de la partícula en m/s

En la tabla 1 se muestran los rangos de movimiento con el parámetro de Rouse, asociado a los modos de transporte de sedimento.



Tabla 1 Rangos de movimiento y esquemas utilizando el número de Rouse (tomada de CFE,2014)

| Número de Rouse | Movimiento | |
|---------------------|---------------------------|--|
| $Rouse < 0.8$ | Suspensión sin transporte | |
| $0.8 < Rouse < 2.5$ | A) Suspensión | |
| $2.5 < Rouse < 7.5$ | B) Saltación | |
| $Rouse > 7.5$ | C) Arrastre | |

2.1.2.1 Transporte por fondo

Es el transporte que se presenta cuando los granos ruedan, saltan o se deslizan a lo largo del fondo marino, en respuesta a la fuerza de fricción ejercida en el fondo y, en los casos de fondos con pendiente, por la gravedad. Éste es el modo dominante de transporte para flujos con velocidades bajas y/o granos gruesos.

En este modo de transporte, el movimiento de los granos se mantiene por el contacto constante entre el grano y el fondo (tracción), o por el contacto intermitente entre el grano y el fondo (saltos). En el caso de la tracción, los granos ruedan o se deslizan sobre el fondo marino, permaneciendo en contacto con este en todo momento. Por lo cual se puede subdividir el transporte por fondo, mediante tres modos, por arrastre, saltación y rodamiento (Pedrozo,2011) (Figura 1) cada uno se describe a continuación:

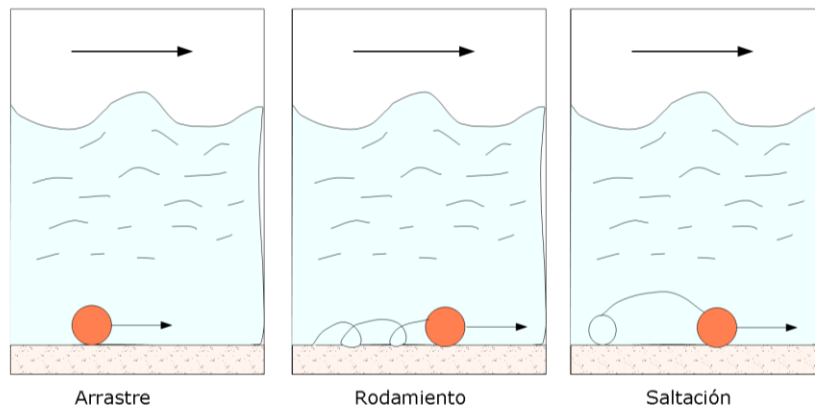


Figura 1.- Transporte por fondo. Arrastre, Rodamiento y Saltación



2.1.2.1. Arrastre

El arrastre se puede definir como el empuje que el agua realiza sobre los materiales gruesos, resultado de ello es que el material viaja cerca del fondo y al encontrarse con materiales más pequeños chocan entre sí, dando lugar a los procesos de abrasión por rodamiento.

2.1.2.1.2. Saltación

La saltación afecta a las partículas que, por ser de mayor tamaño, no pueden ir suspendidas en el agua, sino que suben y bajan de nuevo al fondo.

2.1.2.1.3. Rodamiento

El rodamiento existe cuando la forma del material ha sido transformada a una forma casi esférica, debido al arrastre, facilitándose el desplazamiento ya que sus puntos de apoyo o encaje, van alisándose conforme la partícula va moviéndose (CFE,2014).

El transporte por fondo es relativamente lento, y es típico cuando una corriente lenta transporta arena o cuando se arrastran gravas por una corriente intensa. El transporte en pequeños saltos se presenta cuando corrientes moderadas transportan arenas o cuando corrientes intensas transportan gravas. Evidentemente, este es el modo de transporte principal para sedimentos gruesos.

De manera general todas las expresiones existentes para estimar el transporte de sedimentos por fondo en ambientes costeros se derivan del trabajo propuesto por Meyer-Peter y Müller (1948). Estos autores plantean que el transporte de sedimentos en una ola está relacionado con alguna potencia de la velocidad horizontal del flujo a una elevación justo arriba de la capa límite. La forma general de este tipo de expresiones es:

$$q_b = C (\tau_b - \tau_c)^{1.5} \quad (2.4)$$

Donde τ_b representa al esfuerzo cortante en el fondo, τ_c es el esfuerzo cortante crítico necesario para el inicio de movimiento y C es una constante de proporcionalidad que depende de las propiedades del sedimento (igual a 8 en el trabajo original de Meyer-Peter y Müller, 1948)

2.1.2.2 Transporte por suspensión

Si el flujo es lo suficientemente rápido (o las olas lo suficientemente grandes) y los granos son finos, el sedimento será puesto en suspensión hasta por varios metros de altura sobre el fondo, para ser transportado por las corrientes (Figura 2). Este modo de transporte, también conocido como transporte en suspensión, es con frecuencia más grande que el transporte por fondo. En condiciones marinas y estuarinas los modos de transporte se clasifican de acuerdo al tamaño de los granos, es



decir, granos de diámetro mayores a 2 mm se consideran transportados por fondo, mientras que granos alrededor de 0.2 mm y más finos serán transportados por suspensión.

El transporte por suspensión se mantiene gracias a la turbulencia generada en el fluido. En este caso, los granos pueden hacer contacto intermitente entre ellos, pero la mayor parte del tiempo están en suspensión. Las trayectorias de transporte se distinguen de los saltos (por fondo) debido a su irregularidad, que es consecuencia de la acción de los remolinos de turbulencia generados en la corriente. Este modo de transporte es típico cuando las corrientes moderadas transportan limos o las corrientes intensas transportan arenas.

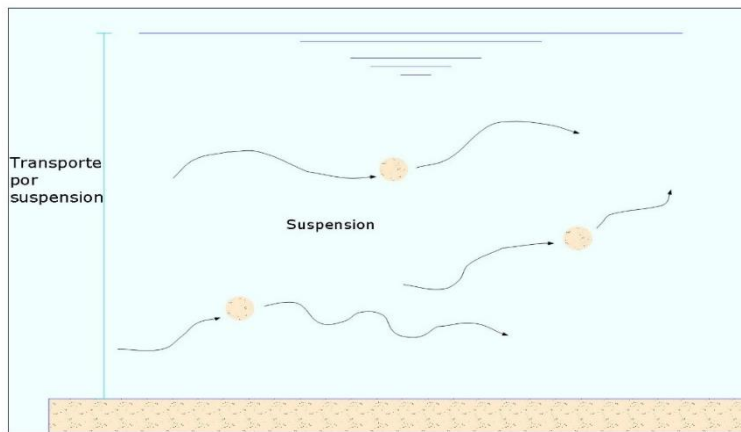


Figura 2.- Modo de transporte de sedimento por suspensión

Bagnold (1966) estableció que los granos pueden permanecer en suspensión solo si su velocidad de caída (W_s) es menor a la componente ascendente de la velocidad de la turbulencia, la cual puede ser representada por la intensidad vertical de la turbulencia y está relacionada con la velocidad asociada al esfuerzo cortante que experimentan los granos en el fondo debido a la fricción entre ellos y el flujo (u_*^s). De esta manera, se puede determinar un criterio de umbral de suspensión quedando determinado como:

$$u_*^s = W_s \quad (2.5)$$

2.1.3 Transporte longitudinal

El transporte longitudinal es el movimiento de partículas a lo largo de la línea de costa (Figura 3). El oleaje rompiente combinado con patrones de corrientes horizontales y verticales genera dicho movimiento de partículas, el cual puede producir desde un simple reacomodo de material entre valles y crestas hasta la formación de pequeñas cúspides rítmicas a lo largo de la costa (cusps). En el extremo, puede generarse transporte de manera que miles de metros cúbicos de arena sean removidos de su sitio original (CFE, 2014).



En la mayoría de los casos, el transporte longitudinal es en un sentido durante una época del año y en otro el resto del año; por ello, el transporte neto debe calcularse como la diferencia entre ambos (CFE, 2014).

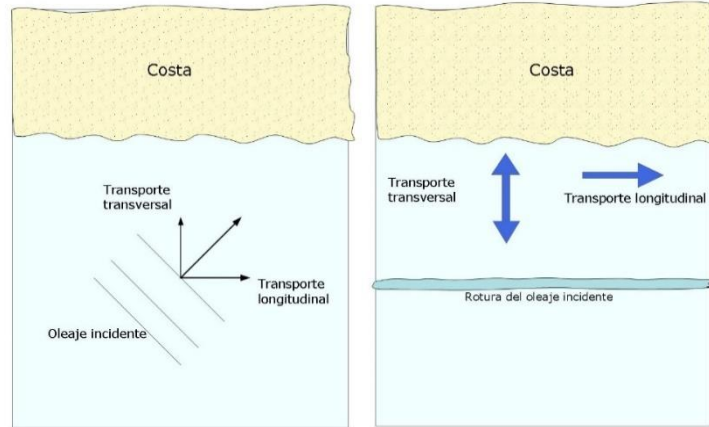


Figura 3.- Transporte transversal y longitudinal

A continuación, se muestran algunas expresiones que han sido desarrolladas para la estimación potencial de este tipo de transporte.

Iwagaki y Noda (1962):

$$Q_s = 1.97H_0\sqrt{sgd^3}\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{-2/3}\left(\frac{H_0}{sd}\right)^2k_{sb}^{11/3}\tan\beta^{4/3}(\text{sen}\alpha_b)^{4/3}\text{cos}\alpha_b \quad (2.6)$$

Esta ecuación fue desarrollada para diámetros representativos del sedimento de 1.23 a 11.4 mm, densidad relativa del material de 2.65, alturas de ola entre 0.5 y 2.2 m, incidencia del oleaje entre 0 y 30 ° y pendientes del fondo de 9/100 a 12/100.

Kraus *et al* (1982)

$$Q_s = 3.8 \times 10^{-4} \frac{H_b^2 V}{h_b \tan \beta} \quad (2.7)$$

Donde

Q_s Transporte de sedimentos longitudinal

H_b altura de ola significativa en la zona de rompientes

h_b profundidad en la que se presenta la rompiente del oleaje

V velocidad de la corriente



β ángulo de la pendiente del fondo

Este modelo es válido para diámetros representativos del sedimento entre 0.18 y 0.59 mm, densidad relativa del material de 2.65, altura de ola entre 0.63 y 1.61 m, incidencia del oleaje entre 2 y 8 °, pendientes del fondo de 1.4/100 – 10/100 y periodos entre 4.9 y 10.2 s (USACE, 2002)

$$Q_1 = K \sqrt{\frac{g}{K} \left(\frac{\rho H_b^{5/2}}{16s(1-n)} \right)} \text{sen} 2\alpha_b \quad (2.8)$$

$$K = 0.05 + 2.6 \text{sen}^2(2\alpha_b) + 0.007 \frac{u_{mb}}{\omega_f} \quad (2.9)$$

$$u_{mb} = \frac{k}{2} \sqrt{gh_b} \quad (2.10)$$

Es una de las ecuaciones más utilizadas actualmente.

Donde:

g aceleración debida a la fuerza de gravedad

Q_1 potencial volumétrico del transporte longitudinal

K coeficiente de proporcionalidad del sedimento de la playa

h_b altura de ola significante en la zona de rompientes

H_b profundidad en la que se presenta la rompiente del oleaje

U_{mb} velocidad máxima del fluido en el fondo

α_b ángulo que forma la playa con las olas en la zona de rompiente

n porosidad

ω_f velocidad de caída del sedimento

ρ densidad del fluido

2.1.4 Transporte transversal

El transporte transversal a la línea de costa incluye tanto al acarreo de partículas fuera de la playa, como sucede en tormentas, como hacia la playa, que es el que se presenta en condiciones normales de oleaje durante la mayor parte del año (Figura 3). El transporte en ambas direcciones difiere,



principalmente, en la escala temporal, esto es, mientras que el transporte hacia afuera es más simple y rápido, el acarreo hacia la playa se produce en paquetes individuales de arena que generan ondulaciones en el fondo, estas a su vez causan muy lento ensanchamiento de la playa seca (CFE, 2014).

El transporte perpendicular a la línea de costa es determinante en diferentes procesos costeros, como la respuesta de las playas y las dunas ante la ocurrencia de tormentas, el llenado artificial de playas con pendientes mayores a la de equilibrio, la respuesta de la línea de costa ante modificaciones del nivel medio del mar, cambios en la posición de la línea de costa y la socavación al pie de estructura (CFE, 2014). A continuación, se muestran algunas de las expresiones utilizadas para cuantificar este tipo de transporte.

Madsen y Grant (1976):

$$\frac{q}{\omega_f d} = 12.5 \Psi_m^3 \quad (2.11)$$

La ecuación anterior fue validada con los siguientes datos: diámetro representativo del sedimento de 0.15 a 2.82 mm, densidad relativa del material de 2.23 a 2.65 y amplitud del parámetro de Shields de 0.04 a 0.6 en una superficie de fondo horizontal.

Sleath (1978):

$$\frac{q}{\sigma d^2} = 47(\Psi_m - \Psi_c)^{1.5} \quad (2.12)$$

La ecuación 2.12 fue desarrollada utilizando un diámetro representativo del sedimento de 0.2 mm, una densidad relativa del material de 2.65, para profundidades de 10 a 14 cm, alturas de ola de 4.6 a 7.4 cm y periodos entre 0.84 y 1.14 sobre un fondo horizontal.

Sunamura y Takeda, (1984):

$$\frac{q_{net}}{\omega_f d} = 2 \times 10^{-11} \left(\frac{H_b}{d} \right)^3 \quad (2.13)$$

Válida solo para aguas someras. Fue desarrollada con diámetros representativos de sedimento de 0.26 a 0.76 mm y densidad relativa del material de entorno de 2.65, altura de la ola media de rompiente entre 110 y 150 cm en una superficie del fondo horizontal.

Donde para las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13, las variables son las siguientes:

d diámetro representativo del material

g aceleración debida a la fuerza de gravedad

H_b altura de ola significativa en la zona de rompientes



q transporte medio de sedimento transversal por unidad de ancho

q_{net} transporte de sedimento transversal neto por unidad de ancho

ω_f velocidad de caída del sedimento

Ψ_c valor crítico del parámetro de Shields para inicio de arrastre

Ψ_m amplitud del parámetro de Shields

σ frecuencia angular del movimiento del fluido

2.2 Transporte de sedimento eólico

En este apartado se explican los agentes que provocan inicio de movimiento de sedimento por viento y los modos de transporte eólico.

2.2.1 Perfil de velocidad del viento

La circulación del aire es casi siempre turbulenta y consiste en remolinos de varias escalas que se mueven con diferentes velocidades y direcciones. Dichos remolinos turbulentos transfieren cantidad de movimiento por medio de procesos de mezcla turbulenta entre las diferentes capas del fluido, de manera que cada capa tiene diferente dirección y velocidad media. Debido a la fricción con la superficie, la velocidad en las proximidades de esta disminuye (Figura 4) cuando la superficie tiene una rugosidad superior a $80 \mu\text{m}$ se considera aerodinámicamente rugosa. En estas condiciones se forma, en las proximidades de la superficie, una subcapa viscosa cuyo perfil no está bien descrito en la actualidad. En condiciones de estabilidad atmosférica, el perfil de velocidad por encima de esta subcapa viscosa de las superficies aerodinámicamente rugosa (MMA, 2007) viene dado por la ecuación 2.14 de Prandtl-von Karman:

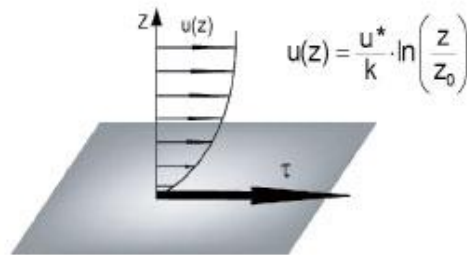


Figura 4.- Perfil de velocidad del viento (tomada de MMA, 2017)

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.14)$$

Donde:

u : velocidad media del viento a la altura z



z_0 : Longitud de rugosidad superficial

k : constante de von Karman ≈ 0.4

u^* : velocidad de cortante o fricción, es proporcional a la pendiente del perfil vertical de velocidad en una escala logarítmica estando relacionada con la tensión por cortante τ en la superficie y con la densidad del aire, ρ_a mediante la expresión:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} \quad (2.15)$$

Estas relaciones son representativas del perfil de velocidad para condiciones atmosféricas neutras, si es inestable, el gradiente vertical de velocidad varía ligeramente con la altura, por lo que se incrementa la tensión de cortante en la superficie. En condiciones estables, la tensión a cortante en la superficie disminuye. Las variaciones topográficas también producen efectos importantes en los perfiles de velocidad del viento (MMA, 2007)

2.2.2 Umbral de movimiento de sedimento por viento

El sedimento fino, por ejemplo, granos de arena, comenzarán a tener movimiento cuando las fuerzas ejercidas (arrastre y sustentación) por un fluido como el viento, superen el efecto del peso y de la trabazón entre partículas, que son dependientes del tipo de sedimento relacionados con las propiedades físicas de los mismos, como el tamaño, densidad, mineralogía, forma, contenido de humedad, entre otras propiedades (MMA, 2007).

Cuando la velocidad de cortante sobre la partícula aumenta, las fuerzas de sustentación y arrastre sobre la partícula también lo hacen hasta que se alcanza un umbral a partir del cual se inicia el movimiento del grano de sedimento. Dicho umbral se denomina umbral de inicio de movimiento u_{*t} (Bagnold, 1941):

$$u_{*t} = A \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} \cdot g \cdot D} \quad (2.16)$$

Donde:

A : Coeficiente empírico que depende de las características del grano($A \approx 1$ para partículas del tamaño de las arenas)

D : Dímetro de las partículas

ρ_s : Densidad del sedimento

ρ_a : Densidad del agua

g : Gravedad



Bagnold (1941) sugirió que una vez alcanzado el umbral de inicio de movimiento, los granos de arena comenzarán a rodar o a deslizarse sobre la superficie por la presión directa del viento. Una vez que las partículas adquieran velocidad, empezarán a saltar sobre la superficie quedando expuestas a la acción del viento iniciándose el proceso de saltación. Aunque no es necesario que los granos empiecen a rodar o a deslizarse para que produzcan la saltación, sino que las diferencias de presión en la superficie, actuando como fuerza de sustentación, son suficientes para levantar directamente los granos de arena. En la tabla 2, se presentan los factores que determinan la velocidad de cortante de inicio de movimiento por viento de sedimentos como las arenas (MMA (2007)).

Tabla 2.- Factores de influencia en la velocidad de inicio de movimiento (tomada de MMA, 2007)

| Factores que influyen en la velocidad de cortante de inicio de movimiento | |
|--|--|
| Efectos del tamaño | Las arenas de mayor tamaño dan lugar a una superficie aerodinámicamente más lisa, al encajarse los granos pequeños entre los grandes. El resultado es un aumento del valor del coeficiente A. |
| Efecto de la pendiente local de la superficie | <p>Las pendientes ascendentes aumentan ligeramente el valor de u_{*t}, las pendientes descendentes disminuyen notablemente el valor de u_{*t}.</p> <p>Figura: Relación entre la velocidad de cortante umbral de inicio de movimiento (u_{*t}) y la pendiente de la superficie. Círculos: medidas de campo; línea continua: relación teórica determinada por Dyer (1986). u_{*tb}/u_{*to} es la relación entre la velocidad de fricción umbral de inicio de movimiento en la pendiente u_{*tb} y en superficie horizontal, u_{*to}. Hardisty and Whitehose (1998)</p> |
| Efecto del contenido de humedad | <p>Las fuerzas capilares entre los contactos de los granos con contenido de humedad aumentan la cohesión de la arena u_{*t}</p> <p>$W=0.6\%$ $u_{*tw}=2u_{*to}$ en arenas de tamaño medio $w \geq 5\%$ arena inamovible por la mayoría de los vientos naturales</p> <p>Belly(1964): $u_{*tw} = u_{*t} \cdot (1.8 + 0.6 \log w)$</p> |
| Efecto de sustancias adhesivas y superficiales | <p>Agentes adhesivos: lodos, arcillas, materia orgánica o sales solubles precipitadas.</p> <p>Pequeñas cantidades de sales solubles (especialmente cloruro sódico).</p> <p>El impacto de gotas de lluvia, algas y hongos pueden formar costras superficiales</p> |
| Efecto de la rugosidad de la superficie | <p>Vegetación, gravas, etc. absorben una porción de la tensión de cortante, protegiendo la superficie erosionable que queda debajo. El grado de protección = f (tamaño, geometría y espaciado horizontal). Si el espaciado horizontal es elevado, u_{*t} disminuye debido a</p> |



que se forman vórtices alrededor de las partículas que favorecen el despegue de los granos menores. Por el contrario, si el espaciado horizontal e los elementos de rugosidad es pequeño, la u_{*t} aumenta debido a la protección que ofrecen los elementos mayores de rugosidad.

2.2.3 Modos de transporte sedimentario por viento

El viento desplaza las partículas de sedimentos con los mismos mecanismos que los de flujos de agua. Donde para el viento se pueden distinguir tres tipos de diferentes de modos de transporte: saltación, suspensión y deslizamiento (Figura 5). El que se presente alguno o combinación de estos modos de transporte depende principalmente del tamaño de grano del sedimento, como se presenta en la Tabla 3 y que se describe de manera más detallada más adelante.

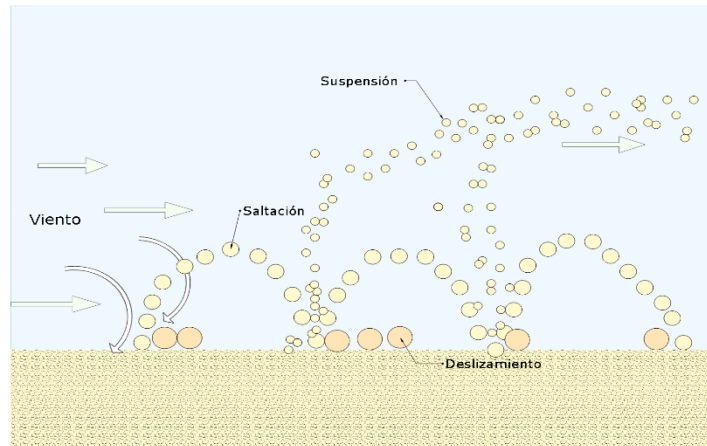


Figura 5.- Modos de transporte por viento

Tabla 3.- Modos de transporte de viento por tamaño de grano

| Modos de transporte por viento | | |
|--------------------------------|-------------|---------------------------|
| Material | Tamaño (µm) | Modo de transporte eólico |
| Polvo | < 60 - 70 | Suspensión |
| Arena fina media | 60 - 500 | Saltación y reptación |
| Arena gruesa | > 500 | Deslizamiento |

2.2.3.1 Suspensión

Este mecanismo de transporte afecta a los granos más finos como se describe en la (Tabla 3) y tiene lugar cuando éstos son elevados y transportados por el viento sin caer al suelo. Puede asemejarse al movimiento de partículas arrastradas por una corriente de agua (Figura 5).



2.2.3.2 Saltación

La acción del viento sobre una superficie arenosa, provoca que los granos individuales de sedimento se muevan en una serie de brincos dando como resultado un fenómeno conocido como saltación, este modo de transporte es dominante en los sistemas dunares.

Durante la saltación, una vez que los granos de arena están en el aire, describen una curva con un ángulo mayor al inicio y menor al final, volviendo a caer al suelo; pero con un impacto tal que rebotan y son lanzados al aire nuevamente (Figura 6). El impacto de este rebote provoca que otros granos de arena también sean lanzados al aire, de manera que, en realidad, más arena se puede poner en movimiento que la que el viento es capaz de levantar desde la superficie. Conforme más granos de arena son impactados por los granos previamente en movimiento, más granos son lanzados hacia el aire, hasta que en poco tiempo toda la superficie de la arena está en movimiento (Martínez, 2009).

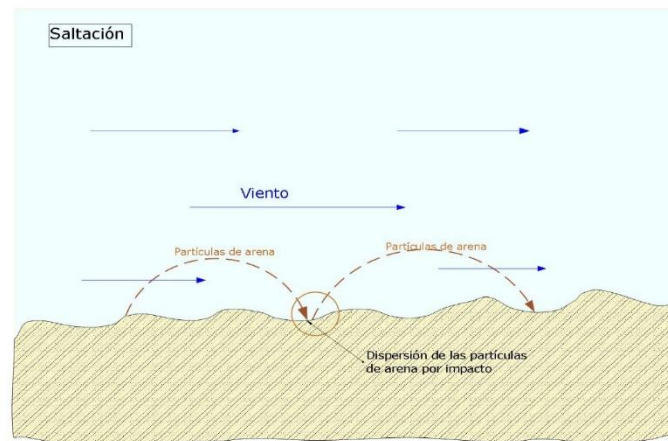


Figura 6.- Transporte por saltación

Respecto de las fuerzas que provocan la saltación de las partículas de arena, MMA (2007) describe que la trayectoria de los granos que saltan depende de cuatro fuerzas: 1) gravedad, 2) arrastre hidrodinámico, 3) efecto Magnus, debido a la rotación de los granos y 4) fuerza de sustentación. Los ángulos de despegue son de alrededor de 50° respecto a la horizontal, como el gradiente vertical del viento en las proximidades de la superficie es fuerte, cuanto más arriba salta la partícula, mayor es la velocidad a la que será transportada por el viento, dando lugar a trayectorias de recorrido largas. Una vez que la partícula alcanza su máxima altura, descienden en forma parabólica muy lineal, provocando el impacto en la superficie con un ángulo promedio entre 4° y 28° respecto a la horizontal.



El que se presente este modo de transporte del viento en sedimentos, depende del tamaño de grano como se dijo antes y de la velocidad del viento. Esta última entre mayor sea, mayor será la distancia a la que viajarán los granos de sedimento.

2.2.3.3 Suspensión

Este mecanismo de transporte afecta a los granos más finos como se describe en la (Tabla 3) y tiene lugar cuando son elevados y transportados por el viento sin caer al suelo. Puede asemejarse al movimiento de partículas arrastradas por una corriente de agua (Figura 5).

2.2.3.4 Deslizamiento

Se presenta cuando las partículas son demasiado pesadas para saltar, y por ello se mueven por deslizamiento o rodadura (Figura 5) sobre la superficie debido al impacto de otros granos en saltación (MMA, 2007).





Capítulo III. Descripción del sitio de estudio

A continuación, se describen las características del sitio de estudio con relación a sus factores geológicos, hidrológicos, marítimos y socioeconómicos.

3.1. Ubicación Geográfica

La zona de estudio se localiza al Suroeste de Baja California Sur, México. Compreendida desde la localidad de Todos Santos hasta Cabo San Lucas. Ubicada entre las coordenadas $23^{\circ}26'49.42''$ y $22^{\circ}53'30.05''$ de latitud norte, y las coordenadas $110^{\circ}13'35.72''$ y $109^{\circ}55'01.19''$ de longitud oeste. Limita al Oeste y Sur por el Océano Pacífico, al Este por el Golfo de California y al Norte por Baja California Norte. El área de estudio cuenta con una longitud costera de aproximadamente 70 km (Figura 7).

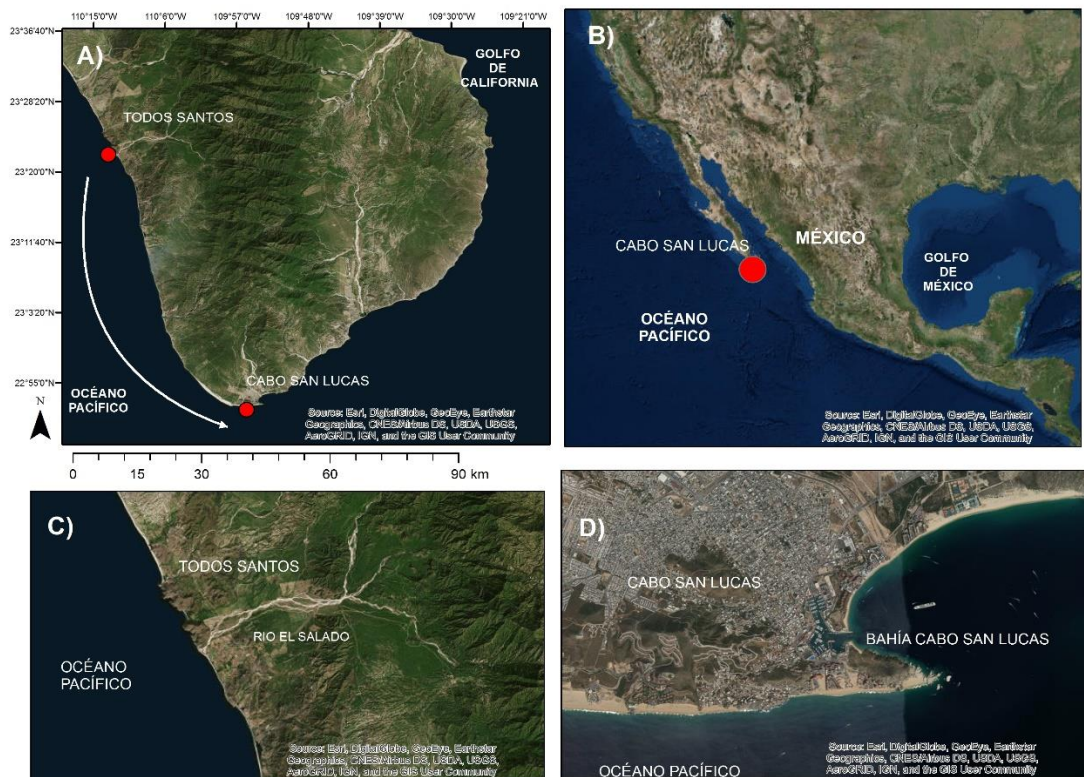


Figura 7.- Zona de estudio. a) Ubicación comunidades límites de la zona de estudio, b) ubicación geográfica, c) Todos Santos, d) Cabo San Lucas (imágenes tomadas de Google Earth)

En la figura 7a, se puede observar la ubicación geográfica de la zona de estudio y la longitud de ella, mientras que en la figura 7c y d, respectivamente se presentan las comunidades límites del suroeste que se localizan en nuestra zona de estudio Todos Santos y la bahía Cabo San Lucas.



3.2. Características Geológicas

Según estudios realizados por Schaaf (2000), las rocas más abundantes en la zona son rocas intrusivas no deformadas con composiciones graníticas a tonalíticas (Figura 8), que se encuentran principalmente en la parte centro sur de la península de Baja California Sur, incluida la zona de alrededor de Cabo San Lucas. Los principales minerales formadores de roca en la zona son la plagioclasa (oligoclasa), cuarzo, feldespato alcalino, biotita.

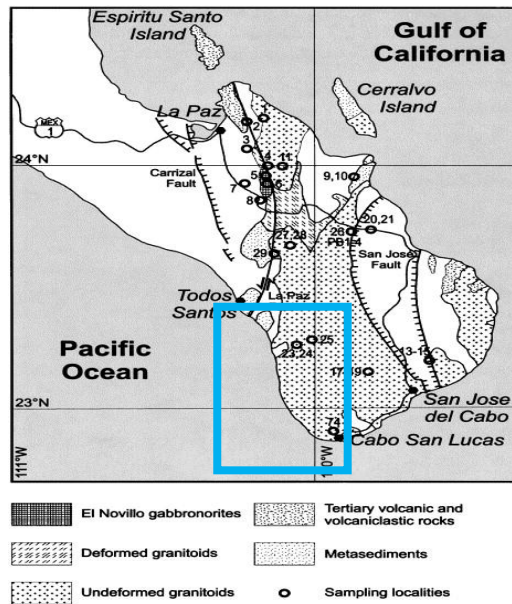


Figura 8. - Mapa Geológico de Baja California Sur (Tomado de Schaff, 2000)

En la zona cercana a Todos Santos, se pueden encontrar rocas como la anfibolita, dacita, diorita y lutita, mientras que en la parte central, entre la comunidad de Todos Santos a Cabo San Lucas, se encuentra granito y en Cabo San Lucas se pueden hallar en mayor proporción granodiorita y granito (INEGI, 2009).

Entre las características edafológicas, se puede destacar que en el sitio de estudio predomina a un 85% un suelo Regosol, Leptosol 10% y Fluvisol 5%, como se puede ver en la figura 9. El relieve predominante en la región de estudio es el lomerío con uso de suelo y vegetación es en gran porcentaje, matorral, por lo que en un 75% la tierra no es apta para agricultura.

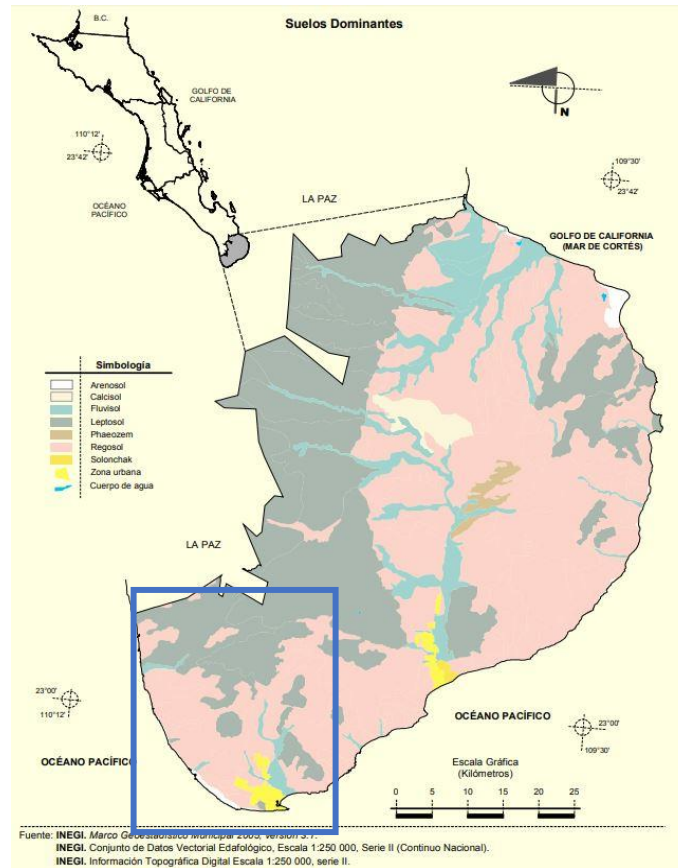


Figura 9.- Suelos Dominantes en Cabo San Lucas (Tomado de INEGI, 2009)

3.3. Cuerpos geológicos importantes para la zona de estudio

La zona de estudio incluye diversos cuerpos geológicos, entre los más importantes se encuentran los cabos, las cascadas de arena submarina y una punta rocosa, Dichos elementos se describen a continuación.

3.3.1 Cabo San Lucas

Es un cabo que alcanza 88 m de altura, cuenta con una franja de playa arenosa. Al Oeste del cabo se presenta un arco rocoso con paredes verticales de hasta 67 m de altura; hacia el Este es de 30m. Se localiza un promontorio rocoso de 2.6 m de altura. Cerca del cabo se tiene la presencia de cañones submarinos. Las playas cercanas de la zona de Cabo San Lucas son una sucesión de playas de arena y farallones rocosos sin vegetación. Las playas se encuentran respaldadas por colinas áridas que van de los 60 hasta los 240 m de altura. Al Oeste de Cabo se encuentra una franja de playa de arena que se une a la costa del Pacífico (Playa del Divorcio) y está conectada con la Bahía de Cabo (Playa de los Enamorados) a través de un paso entre Cabo y el cerro del Vigía.



3.3.2 Cascadas de Arena Submarinas

Las Cascadas de Arena Submarinas (Figura 10). Están formadas por un cañón dentro de la bahía de Cabo San Lucas, que inicia desde una profundidad de 10 a 15 m y corre paralelo a la costa sur, sale de la bahía y desemboca a la porción central de lado Oeste de la boca del Golfo de California. En la figura 11 se muestra la ubicación de algunas de las Cascadas de Arena Submarinas cerca de la línea de costa de Cabo San Lucas conforme al establecimiento de diferentes sitios de buceo de la zona.

En 2005, la UNESCO declaró a las Cascadas de Arena Submarinas, como patrimonio natural de la humanidad. Esta declaratoria, señala la presencia única en el mundo, que son descritas con altura de 100 m al interior de dos cañones submarinos que se extienden desde los 15 hasta los 2000 m de profundidad (cañón de Cabo San Lucas y los Frailes) y con transparencia del agua hasta los 35-40 m (WHSN, 2005).



Figura 10.- Esquema de las Cascadas de Arena Submarinas (Tomada de <https://loscabosmexicoblog.com/sand-falls-los-cabos/>)



Figura 11.- Ubicación de las Cascadas de arena submarina y de accidentes naturales próximos a Cabo San Lucas (Tomada de DIGAOHM, 2012)



3.3.3 Cabo Falso

Localizado en las coordenadas 22°52'N, 109° 58' W, este cuerpo geomorfológico está constituido por un farallón rocoso de 15 m de altura y numerosas rocas separadas que se hallan cerca de la costa que da hacia el Océano Pacífico (DIGAOHM, 2012).

3.3.4 Punta Ballena

Es una punta rocosa que se eleva verticalmente hasta una altura de 57 m. Esta punta representa el límite Oeste de la bahía de Cabo San Lucas (DIGAOHM, 2012).

3.4 Características Hidrológicas

La zona de estudio se localiza dentro de dos Regiones Hidrológicas (RH), la RH número 3 (RH03Ac, RH03Ab, RH03Aa) y la RH número 6 (RH06Aa). Siendo esta primera la de mayor superficie. Dichas redes se presentan en la figura 12, obtenidas de la Red Hidrográfica Baja California Suroeste de INEGI (2017).

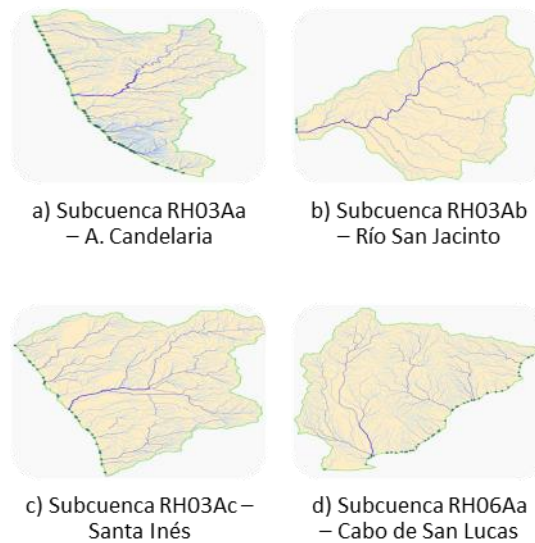


Figura 12.- Regiones hidrológicas. RH03 a) Ac, b) Ab, c) Aa y d) RH06Aa (Tomadas de INEGI 2017)

En la red hidrológica RH03Ac y RH03Ab (Figura 12a y 12b) se localizan las subcuencas hidrológicas del río San Jacinto y de Santa Inés, ambas, dominadas por lomeríos y planicies. Las características del cauce principal de la cuenca del río San Jacinto son: pendiente media de 5.5 %, tiempo de concentración de 166.7 min, elevación máxima de 1,680 m y elevación media de 840 m y un área drenada de 225 km². Mientras que las características del río principal de la cuenca Santa Inés son: pendiente media 4.86 %, tiempo de concentración de 174.9 min, elevación máxima de 1,474 m, elevación media de 737 m y área drenada de 321 km² (SIATL, 2015).



En la red hidrológica RH03Aa y la RH06Aa (Figura 12c y 12d) se localizan las cuencas hidrológicas Migriño y El Salto, ubicadas en el extremo sur de la península de Baja California. Estas cuencas son pequeñas, cubren áreas de 202.6 y 199.1 km², respectivamente y son de forma asimétrica. Las corrientes fluviales que se presentan en ellas son efímeras debido a que conducen agua solamente durante temporal de lluvias o hasta unas pocas horas o días después de éstas. Los arroyos principales de las cuencas Migriño y el Salto son de quinto orden. Los patrones de drenaje dominantes en estas cuencas son de tipo paralelo y subparalelo.

En la cuenca Migriño dominan las sierras y cauces en cañones con disección profunda y, en menor medida, lomeríos y planicies asociadas a valles intramontanos. La pendiente del terreno en esta cuenca es de fuertemente inclinada a muy inclinada. En las laderas de cerros y en cauces de arroyos con paredes rocosas las pendientes son de 15 ° a 35 ° y en algunos casos mayores a 35 °.

En la cuenca El Salto dominan los lomeríos y planicies. La pendiente del terreno en esta zona es de plana (< 2 °) a fuertemente inclinada (5 ° a 15 °) y está asociada al valle fluvial de los arroyos Salto Seco y El Salto y a los depósitos de piedemonte que se han desarrollado en la base de la sierra en el flanco oriental de la cuenca (Navarro, 2012).

3.5 Temperatura y Precipitación

Para la estimación de temperatura y precipitación de la zona de estudio se usaron datos de las estaciones climatológicas 3066 Todos Santos y 3005 Cabo San Lucas, de la red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016), ubicadas en las coordenadas 22.88 N -109.91 W y 23.44 N -110.22 W, respectivamente. De ellas se obtuvieron los promedios mensuales y temperaturas mínimas, media y máximas para el periodo de 1981-2010. La media anual de precipitación se estimó de 260 mm. El periodo precipitación abarca de los meses julio a octubre, teniendo mayor precipitación en el mes de septiembre representando más del 80 % de precipitación media anual en ambas estaciones climatológicas. A su vez, la máxima precipitación que ha presentado fue en el mes de septiembre, según estos registros fue de 382 mm para Todos Santos y 361 mm para Cabo San Lucas, ambas en el año 2001. La precipitación normal para dicho mes es de aproximadamente 115 mm en ambas regiones (Figura 13).

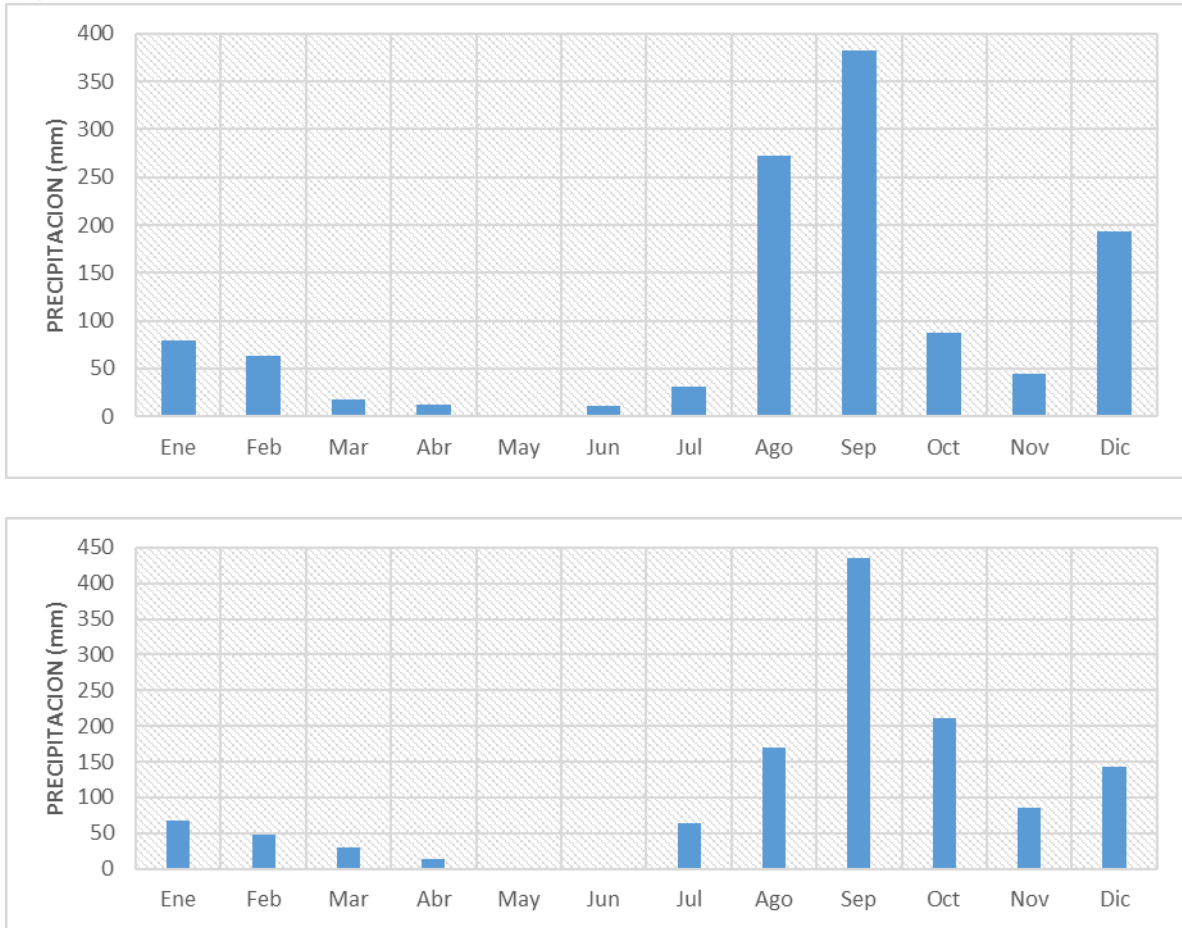


Figura 13 Media mensual de precipitación de 1981 – 2010. Superior Todos Santos, inferior Cabo San Lucas

Para el caso de la temperatura, se obtuvo una temperatura mínima normal para este periodo de tiempo 1981-2010 de 15 °C y una mínima extremal de 11 °C en ambas regiones, la temperatura media anual es de 23.7 °C y la máxima extrema de 34 °C presentada en el mes de septiembre, la media máxima es de 32 °C, en ambas regiones (Figura 14).

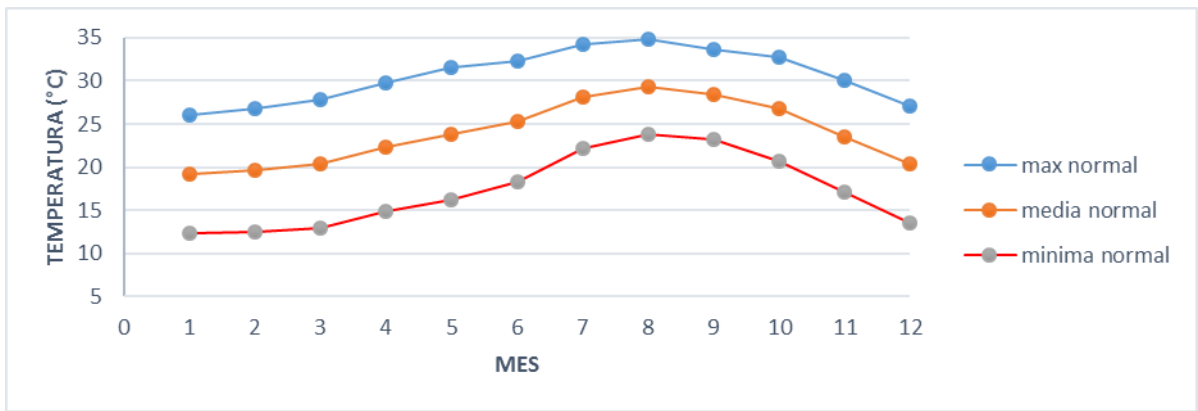
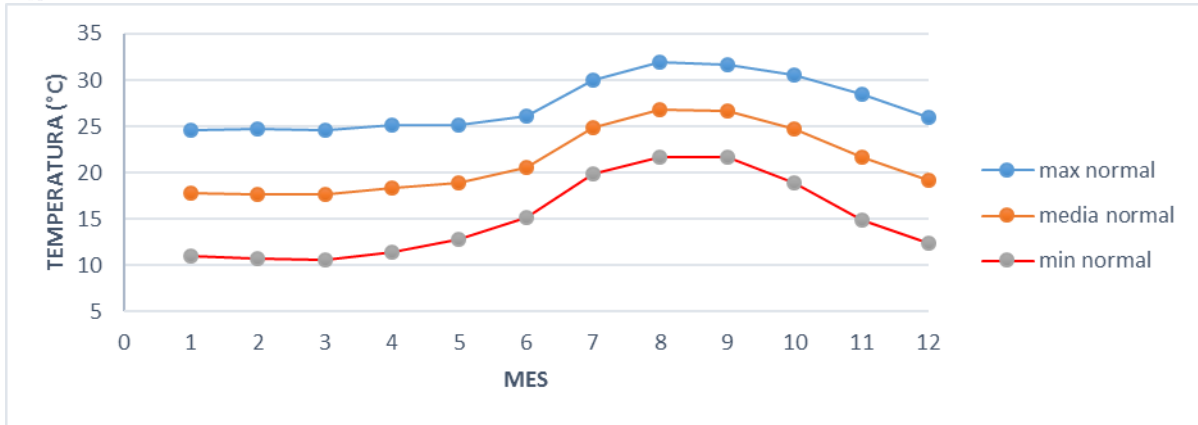


Figura 14.- Media mensual de temperatura para el registro de 1981-2010. Superior Todos Santos, inferior Cabo San Lucas

3.6 Ciclones Tropicales

Baja California Sur es una de las regiones del Pacífico Noroeste mexicano más vulnerables al impacto de ciclones tropicales, un ciclón tropical cada dos años. De 1966 a 2006, 31 ciclones tropicales, siendo el mes de septiembre el de mayor incidencia (PDU, 2013), como se puede verificar al comparar con las gráficas de precipitación mostradas en la Figura 13. En la tabla 4 se muestran los ciclones tropicales que han afectado a Baja California Sur desde 1981 a 2016. El último huracán de categoría 4, Odile, dejó grandes estragos en prácticamente todo el estado, impactando del 10 al 17 de septiembre de 2014 (Figura 15). Cabe mencionar que durante el tránsito de tormentas tropicales o de huracanes ocurren lluvias extraordinarias en la región.



Tabla 4.- Ciclones tropicales que han afectado a Baja California Sur de 1981-2016 (datos tomados de UNISYS, 2017)

| Fecha | Nombre | Categoría |
|-----------------|-----------|----------------------------------|
| Octubre 1981 | Lidia | TT |
| Septiembre 1982 | Paul | H2 |
| Julio 1984 | Genevieve | H2 |
| Sept – Oct 1985 | Polo | DT |
| Septiembre 1987 | Norma | DT Todos Santos |
| Agosto 1989 | Kiko | H3 |
| Sept-Oct 1989 | Raymond | TT |
| Junio 1990 | Douglas | TT |
| Sept- Oct. 1990 | Rachel | TT Entro cerca de Cabo San Lucas |
| Noviembre 1991 | Nora | H1 |
| Agosto 1992 | Lester | H1 |
| Julio 1993 | Calvin | H2 |
| Septiembre 1995 | Henriette | H2 Cabo San Lucas |
| Septiembre 1966 | Fausto | H1 Todos Santos |
| Septiembre 1997 | Nora | H1 |
| Agosto 1998 | Frank | TT |
| Septiembre 1998 | Isis | H1 Cabo San Lucas |
| Sept-Oct 2001 | Juliette | H1 |
| Agosto 2003 | Ignacio | H2 |
| Septiembre 2003 | Marty | H2 Noroeste de San José del Cabo |
| Septiembre 2004 | Javier | DT |
| Septiembre 2006 | John | H2 |
| Septiembre 2007 | Henrriete | H1 Cabo San Lucas |
| Septiembre 2008 | Lowell | TP Cabo San Lucas |
| Septiembre 2010 | Georgette | Tp Cabo San Lucas |
| Agosto 2013 | Juliette | TP franja Cabos – Todos Santos |
| Septiembre 2014 | Odile | H4 franja Cabos-Todos Santos |
| Septiembre 2016 | Newton | H1 franja Cabos – Todos Santos |

TT= tormenta, Tp= tormenta tropical, DT= Depresión tropical, H1= Huracán categoría 1, H2= Huracán categoría 2, H3= Huracán categoría 3, H4=Huracán categoría 4. (categoría Saffir-Simpson)

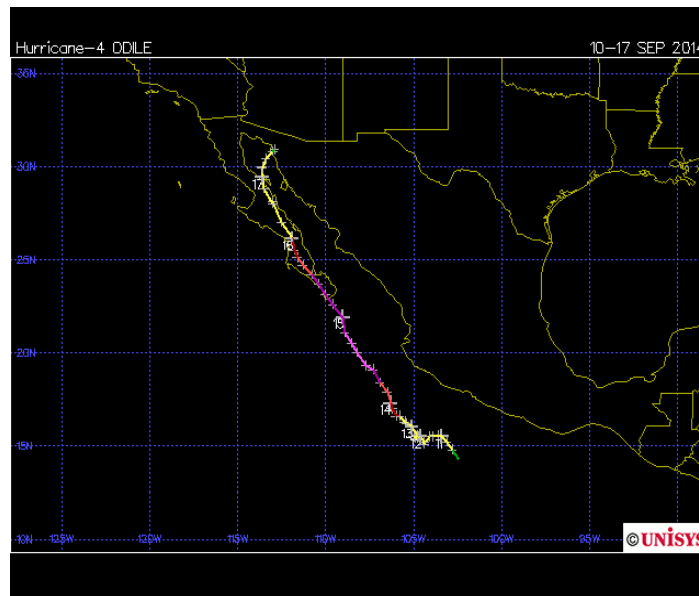


Figura 15.- Trayectoria de Huracanes en Baja California, izquierda huracán Odile 2014 (tomadas de UNISYS, 2017)



3.7 Clima

El clima en la región de estudio es muy seco y cálido (figura 4), especialmente en verano de (julio a septiembre) aunque es templado en invierno (enero y febrero).

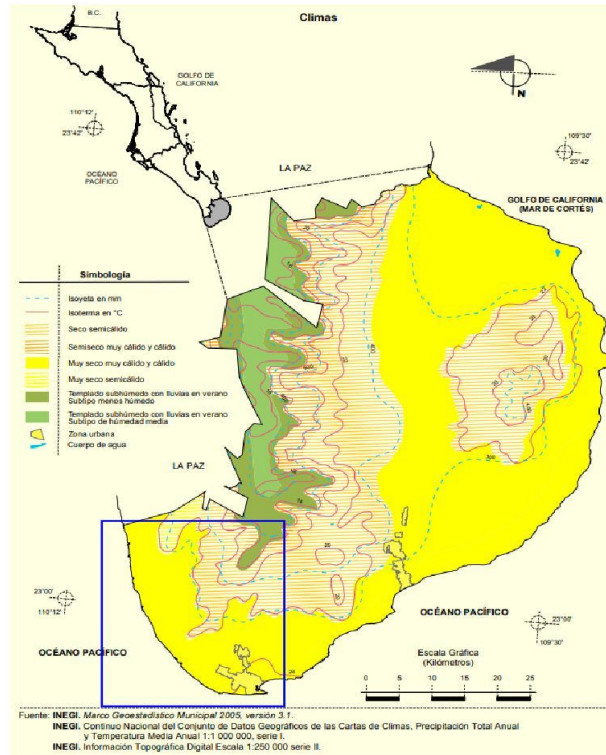


Figura 16.- Clima en la región de Cabo San Lucas (tomada de INEGI, 2009)

3.8 Características Sedimentarias

La caracterización de sedimento corresponde al estudio realizado por Silva (2015), quien analizó muestras entre Faro viejo y la bahía de Cabo San Lucas: El autor reporta un tamaño promedio de grano (D_{50}) de 1.249 mm. Aproximadamente el 64 % de las muestras que se recolectaron en el estudio posee un tamaño de sedimento entre 0.8 y 1.4 mm, y el restante 21 % concentran entre tamaños entre 1 y 1.2 mm. El máximo D_{50} registrado fue de 3.349 mm, correspondiente a la zona de la playa del cauce del Arroyo el Salto y el tamaño más pequeño fue de 0.635 mm que se localiza en la zona de dunas del lado Oeste de Faro viejo. Por lo tanto, se puede diagnosticar que la zona sur del área de estudio de esta tesis está compuesta por arenas gruesas y muy gruesas (0.635-1.995 mm).

En el estudio antes mencionado, resalta que el tamaño del sedimento es mayor en la zona de litoral del Pacífico y menor al interior de la Bahía de Cabo San Lucas.



La densidad promedio del sedimento es de 2541 kg/m^3 y las arenas de mayor densidad se localizan en la cercanía de las Cascadas de Arena con valores que van de 2594 a 2603 kg/m^3 .

El valor de la velocidad de caída promedio del sedimento de las playas es de 0.103 m/s , mientras que la velocidad de caída promedio de las partículas de sedimento de las cascadas de arena es de 0.0871 m/s .

Respecto a los parámetros de forma y texturales de la partícula, el factor de forma promedio es de 0.682 lo que indica que los granos de sedimento de la zona de muestreo tienen forma de elipsoide ligeramente achatado y alargado. La esfericidad promedio mostrada es de 0.836 , valor típico de material de origen terrígeno proveniente del desgaste de rocas. El valor de porosidad promedio del material es de 0.362 .

Considerando las características del sedimento, y la clasificación del SUCS, la arena de esta zona de Cabo San Lucas se puede catalogar como SP, arenas limpias con tendencia a un tamaño de sedimento determinado con nulo contenido de material fino (arcillas o limos) con nulo contenido de gravas.

3.9 Marea

Las tablas 5 y 6 presentan los niveles de marea astronómica reportados por la Dirección General de Puertos (2010). La zona de estudio es zona número IV (San Carlos) y X (Cabo San Lucas). Mayores detalles y datos puntuales sobre la marea y oleaje del sitio de estudio se pueden encontrar en el Capítulo V.

Tabla 5.- Rangos de marea astronómica, estación San Carlos (Tomada de DGP, 2010)

| Estación: San Carlos | | Altura (m) |
|---------------------------------|-----------|-------------|
| Pleamar Máxima Registrada | (P.M.R) | 1.563 |
| Nivel de Pleamar Media Superior | (N.P.M.S) | 0.833 |
| Nivel de Pleamar Media | (N.P.M) | 0.656 |
| Nivel Medio del Mar | (N.M.M) | 0.000 |
| Nivel de Media Marea | (N.M.M) | -0.007 |
| Nivel de Bajamar Media | (N.B.M) | -0.672 |
| Nivel de Bajamar Media Inferior | (N.B.M.I) | -0.868 |
| Bajamar Mínima Registrada | (B.M.R) | -2.003 |



Tabla 6.- Rangos de marea astronómica, estación Cabo San Lucas (Tomada de DGP, 2010)

| Estación: Cabo San Lucas | | (Altura en m) |
|---------------------------------|-----------|---------------|
| Pleamar Máxima Registrada | (P.M.R) | 1.095 |
| Nivel de Pleamar Media Superior | (N.P.M.S) | 0.585 |
| Nivel de Pleamar Media | (N.P.M) | 0.457 |
| Nivel Medio del Mar | (N.M.M) | 0.000 |
| Nivel de Media Marea | (N.M.M) | -0.001 |
| Nivel de Bajamar Media | (N.B.M) | -0.460 |
| Nivel de Bajamar Media Inferior | (N.B.M.I) | -0.609 |
| Bajamar Mínima Registrada | (B.M.R) | -1.099 |

3.10 Oleaje

El oleaje es uno de los principales agentes modificadores de la línea de costa, algunos de sus efectos son: suspensión de sedimento en la columna de agua por la rotura y corrientes que pueden transportar grandes cantidades de sedimento en dirección longitudinal y transversal (ver Capítulo II). Por tal motivo es importante conocer los parámetros del oleaje: dirección de propagación, altura significativa (H_s), periodo pico (T_p) y probabilidad de excedencia de altura de oleaje que se presenta en el sitio de estudio. Para ello se descargaron los datos de Cabo San Lucas del 1 de enero 1945 a 31 de diciembre 2009 del nodo (22.47,-109.50) y para la zona del Pacífico entre Cabo San Lucas y Todos Santos (40 km aproximadamente al Norte de la comunidad La Tinaja), del 1 de enero de 2005 al 31 de diciembre 2017 del nodo (23.00,-110.50) de la malla de oleaje del modelo WAVEWATCH III (WWIII).

Con los datos obtenidos se realizaron las rosas de oleaje, anual y por cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno), que se presentan a continuación:

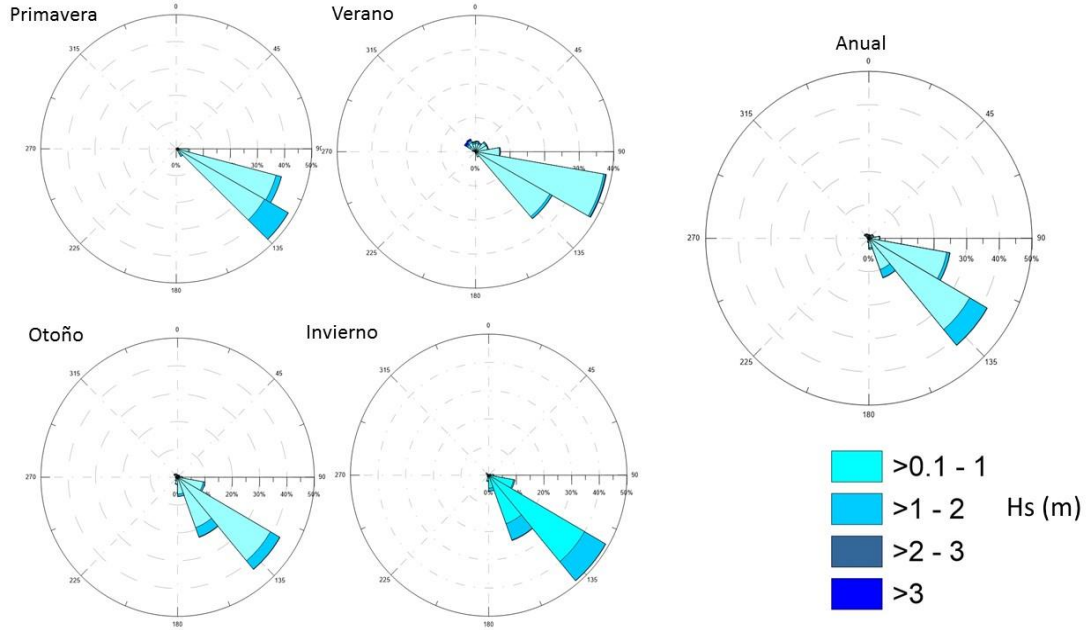


Figura 17.- Rosa de oleaje de altura significantes anual para le serie (1945-2009) y por estaciones anuales de Cabo San Lucas, BCS.

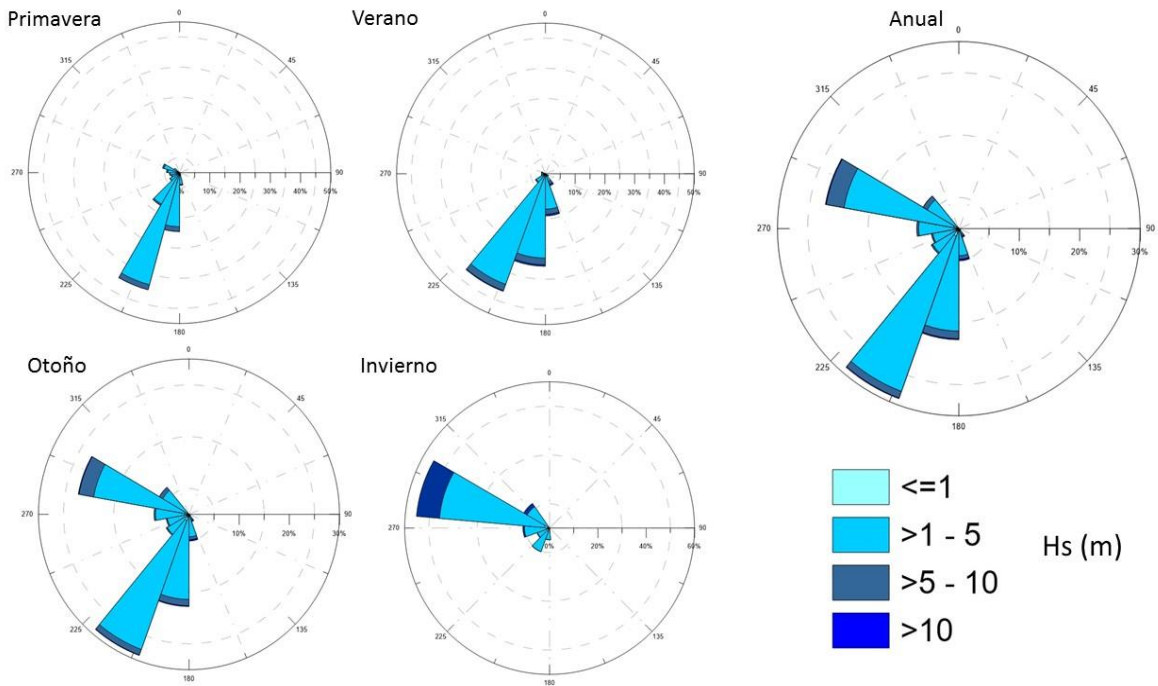


Figura 18.- Rosa de oleaje para la serie de oleaje (2005-2017) y por estaciones anuales , a 40 km de la comunidad la Tinaja , entre Todos Santos y Cabo San Lucas, BCS.



El oleaje reinante en la zona de Cabo San Lucas tiene H_s entre 0.5 y 1 m presentándose con mayor frecuencia una altura de 0.8 m; la dirección del oleaje que predomina en todas las estaciones del año es 135° SE (figura 17).

El oleaje reinante en la zona del Pacífico entre Todos Santos y Cabo San Lucas tiene H_s entre 1 y 3 m. la dirección del oleaje depende de la estación del año, en primavera-verano se presenta un oleaje en dirección 202° SSW, en otoño se presenta oleaje tanto del NW y SW siendo este último más energético, que es la estación en donde se presentan mayores ciclones tropicales como se describió en párrafos anteriores, y en invierno se presenta oleaje en dirección 290° WNW (figura 18).

La probabilidad de excedencia cuantifica la posibilidad que se presente un evento de ciertas características; en la figura 19 y 20 se presenta dicha probabilidad para H_s con escala de cero a uno. Comprendida de igual manera anual y por estaciones climatológicas.

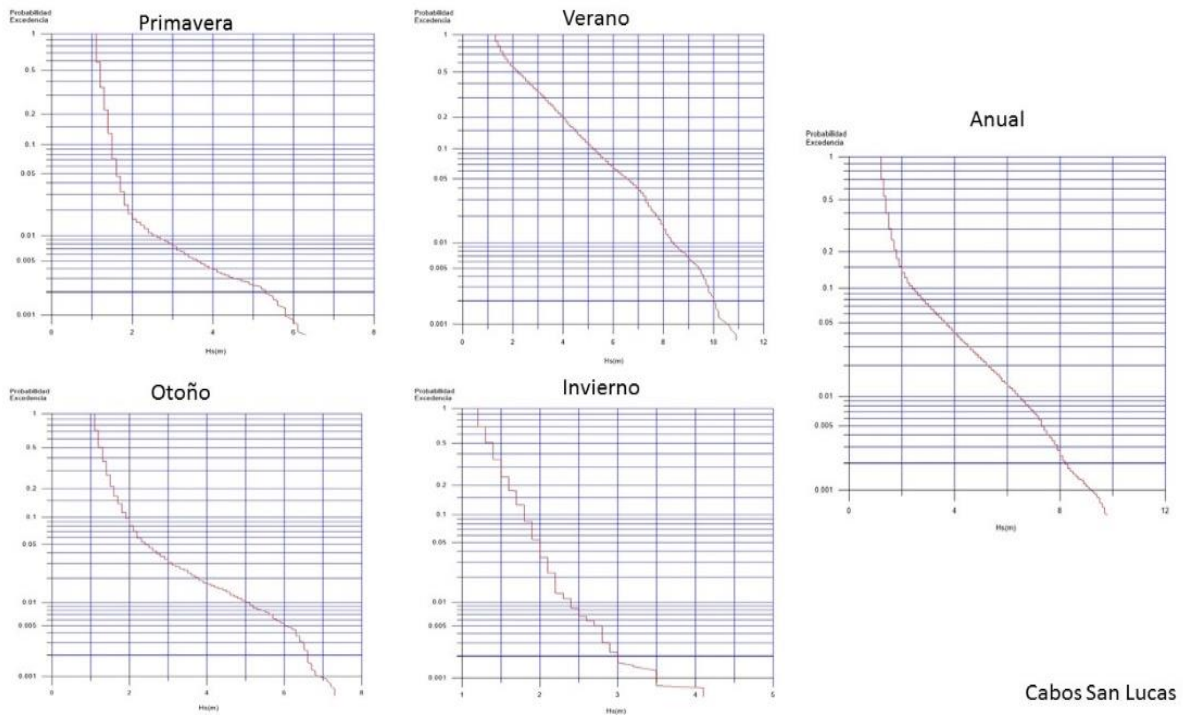


Figura 19.- Probabilidad de excedencia de H_s para la serie de oleaje (1945-2009) Cabo San Lucas.

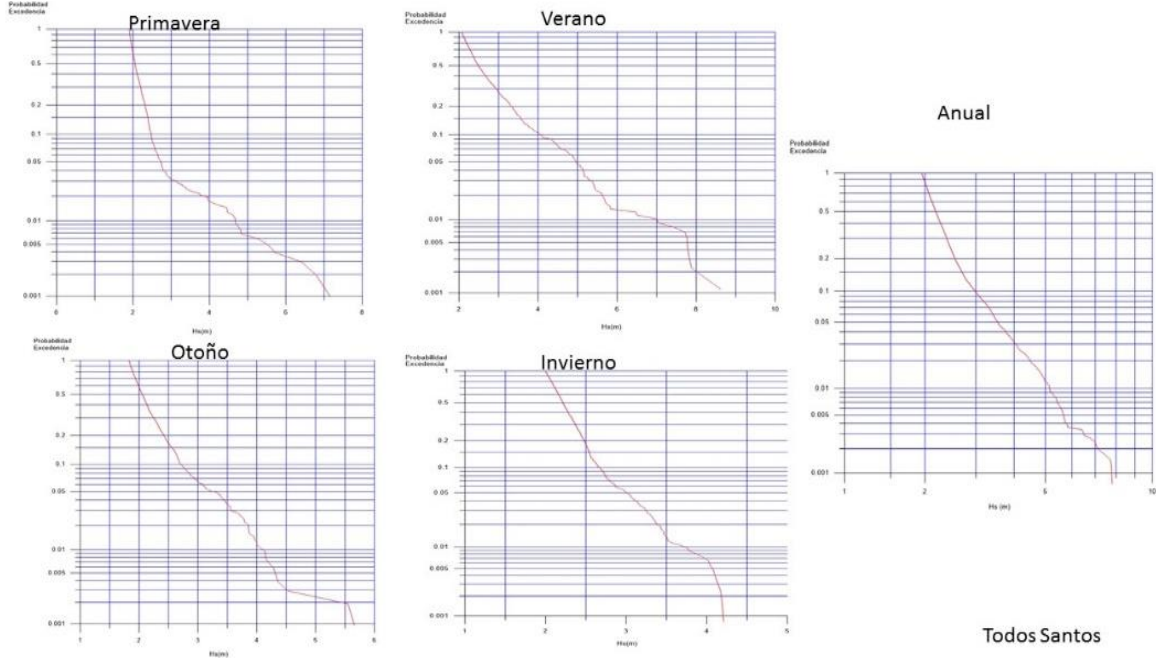


Figura 20.- Probabilidad de excedencia de H_s para la serie de oleaje (2005-2017) a 40 km de la comunidad la Tinaja, entre Todos Santos y Cabo San Lucas, BCS.

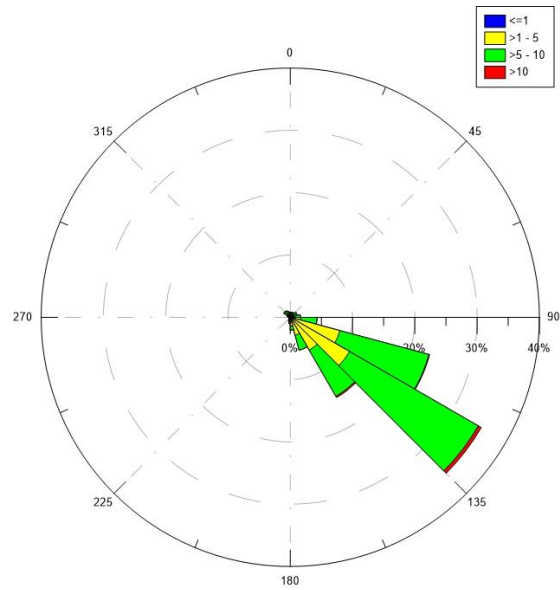


Figura 21.- Rosa de periodo pico anual (T_p) para le serie (1945-2009) de Cabo San Lucas, BCS.

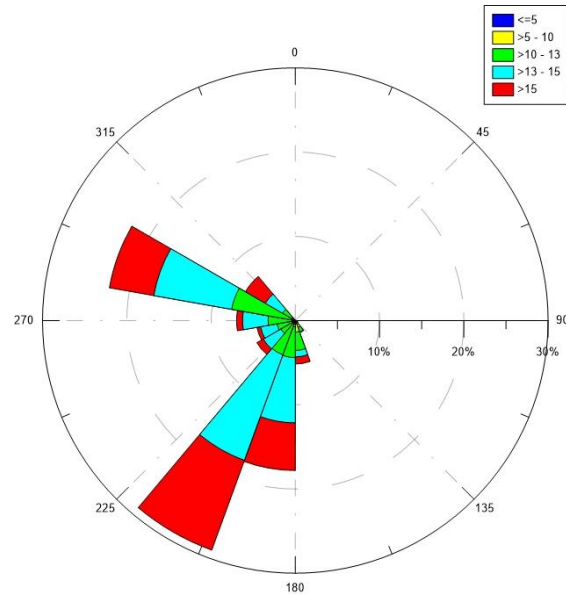


Figura 22.- Rosa de periodo pico (T_p) anual (2005-2017), a 40 km de la comunidad la Tinaja, entre Todos Santos y Cabo San Lucas, BCS.

En la figura 21 y figura 22, se presenta la rosa del periodo pico T_p de oleaje anual para Cabo San Lucas y Todos Santos - Cabo San Lucas, de la misma serie de tiempo que la de Hs. De la cual se puede resaltar que para Cabo San Lucas se presenta un T_p reinante entre 5-10 s, mientras que para la zona Todos Santos-Cabo San Lucas se presenta un T_p entre 13-15 s, pero también en ocasiones se presenta un T_p mayor de 15 s.

3.11 Viento

El esfuerzo cortante producido por el viento contribuye a la generación y propagación de oleaje, al transporte de material terrígeno y sedimentario asociado a la erosión. Los datos para la modelación se obtuvieron de la estación meteorológica autónoma de Cabo San Lucas ubicada en las coordenadas (22.881,-109.926) con un periodo de registro de 2013 a 2017 y de la red de estaciones climatológicas de Todos Santos de la CONAGUA (CONAGUA, 2016) ubicada en las coordenadas (23.26,-110.13) con un periodo de registro de 2011 a 2014.

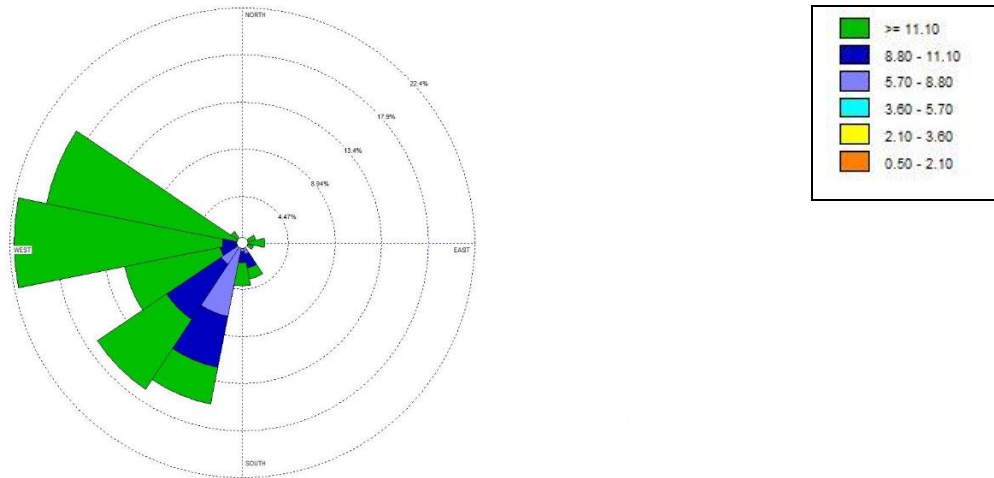


Figura 23.- Rosa de viento anual para el periodo de 2013-2017. Cabo San Lucas.

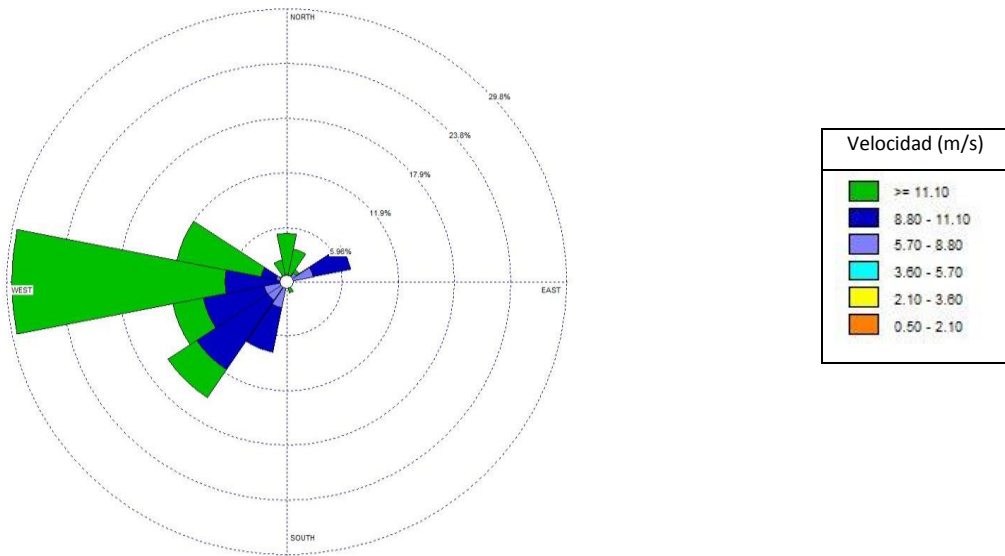


Figura 24.- Rosa de viento anual para el periodo de 2014-2017. Todos Santos.

En la figura 23 se muestra la rosa de viento anual de Cabo San Lucas, donde el viento promedio es de 16.2 m/s. Se presentan el 69.3 % vientos mayores a 11 m/s, el 18.4 % vientos entre 8.80 - 11.10 y el 12.1 % vientos entre 5.70-8.80. La dirección del viento predominante es W 22 % y el 15 % SW, el restante en muy menor porcentaje son direcciones WNW, WSW.

En la figura 24 se muestran la rosa de viento anual de Todos Santos, el viento promedio es de 13.14 m/s. se presenta el 50.2 % vientos mayores a 11 m/s, el 34.2 % vientos entre 8.80-11.10 y el 15.2 %



vientos entre 5.70-8.80 %. La dirección del viento predominante es W con el 30 % y SW con el 13 %.

3.10 Características Socioeconómicas y Población

El Estado de Baja California Sur (BCS), es uno de los atractivos turísticos más importantes del país, por las diferentes actividades que se pueden realizar, y un referente de ellos son sus playas. Dentro de los lugares más visitados por el turismo, se cuentan La Paz y Cabo San Lucas, siendo este último uno de los destinos turísticos más importantes de México, debido a sus riquezas atractivas, como sus playas y sus paisajes (SETUES, 2017).

En el Baja California Sur se encuentra la comunidad de Todos Santos, que es catalogado como pueblo mágico por la secretaria de turismo federal. Su atractivo turístico son sus playas a mar abierto, por lo que a esta región la catalogan como “Ventana al Pacífico”. Sus principales playas son San Pedrito, Los Cerritos, La Poza, entre otras. La mayoría de ellas con fuerte oleaje, razón por la cual son muy visitadas durante todo el año por surfistas (SETUES, 2017).

La actividad turística es importante para BCS, debido al incremento de turistas extranjeros en los últimos años. Lo anterior se ve reflejado en la derrama económica presentada en 2016 de 625.8 millones de dólares (SDEMARN, 2017).

Debido a la demanda turística, Cabo San Lucas tiene un total de 152 establecimientos de hospedaje, superior a La Paz con 110. Y los indicadores de ocupación hotelera denotan que, en 2016, la llegada de turistas a Cabo San Lucas fue de 865,645 personas de los cuales 128,298 fueron residentes del país y 737,347 extranjeros; muy superior al presentado en La Paz con 323,757 personas. (DATATUR, 2017). Por lo tanto, los visitantes extranjeros representan el 61.1 % del total, concentrándose principalmente en la zona de Los Cabos.

De acuerdo con cifras de INEGI, el Producto Interno Bruto (PIB) de Baja California Sur en el año 2016 fue de 133,350 millones de pesos con mejoramiento al presentado el año 2015, debido en gran porcentaje al turismo y comercio lo que lo posiciono al estado de BCS entre los primeros 6 estados del país de aporte al PIB.

La economía de BCS descansa primordialmente en el sector de servicios, ya que, de acuerdo con la distribución del PIB, las actividades primarias aportan el 3.7 %, las secundarias el 22.9 % y las terciarias el 73.4 %, teniendo como principales ramas el comercio con el 18.2 %, restaurantes y hoteles el 16.7 %, la construcción el 12.2 %, y el demás porcentaje se distribuye en otras actividades terciarias (SDEMARN, 2017).



La población en la región de BCS se concentra en los municipios de Los Cabos y La Paz, que representan el 40 % y 38 % del total estatal, que para el año 2015 la población total era de 287,671 y 272,711 habitantes respectivamente. Y el incremento demográfico ha ido en aumento en los últimos años.

En las comunidades de Todos Santos y Cabo San Lucas, que se encuentran en los límites de la zona de estudio, la población registrada en el 2015 fue de 6,485 y 81,111 habitantes, siendo Cabo San Lucas con mayor número de habitantes.



Capítulo IV. Metodología

En este capítulo se presenta una descripción breve del software y módulos de DELFT 3D, así como los parámetros y condiciones con que se realizaron las simulaciones numéricas.

4.1 Modelado Numérico

Las simulaciones que se presentan en este trabajo se realizaron con el software libre DELFT 3D, el consiste en una serie de modelos numéricos que pueden ser acoplados para la simulación de flujos hidrodinámicos, generación y propagación de oleaje, cambios morfológicos, entre otros fenómenos que se pueden modelar. Los módulos pueden ser ejecutados de manera independiente o encadenados con otros (Deltares, 2014).

4.1.1 Descripción del modelo DELFT 3D

Utilizando los módulos de manera concatenada, la información calculada es intercambiada automáticamente a través de archivos de comunicación que permiten la interacción de los diferentes procesos (Aragón, 2014). En este estudio se realizaron modelaciones acopladas de oleaje e hidrodinámica.

4.1.1.1 Modelo de oleaje. DELFT 3D-WAVE

El modulo desarrollado para la simulación de oleaje dentro de la paquetería de DELFT 3D, es DELFT 3D-WAVE. Este módulo es utilizado para simular la evolución del oleaje, tanto el generado por el viento localmente, como el alimentado en las fronteras del modelo, de forma tal que calcula la propagación de oleaje, generación de oleaje por viento, disipación e interacciones no lineales con base en los parámetros de batimetría, campos de viento, nivel de agua y campos de corrientes. El modelo base es el modelo de oleaje SWAN de tercera generación (Aragón, 2014). El modelo de oleaje SWAN se basa en la ecuación 4.1, calculando la evolución del oleaje aleatorio de crestas cortas en regiones costeras con poca profundidad intermedia y somera; que puede tomar en cuenta el efecto de corrientes. Es capaz de representar el proceso de generación de oleaje por viento, disipación por *whitecapping*, fricción con el fondo y rompimiento inducido por la profundidad y las interacciones no lineales entre las olas (Deltares, 2014).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\delta}{\delta y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\delta}{\delta \theta} (c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4.1)$$

En la ecuación 4.1, el primer término $\frac{\partial N}{\partial t}$ representa la tasa de cambio local de la densidad de acción en el tiempo, el segundo y tercer término $\frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\delta}{\delta y} (c_y N)$ representan la propagación de acción



en el espacio geográfico, el cuarto término $\frac{\partial}{\partial \sigma}(c_{\sigma}N)$ representa los cambios en la frecuencia relativa debido a las variaciones en la profundidad y corrientes. El quinto término $\frac{\delta}{\delta \theta}(c_{\theta}N)$ la refracción inducida por la profundidad y la corriente. Los términos a la derecha de la ecuación $\frac{S_{tot}}{\sigma}$ son los términos fuente, que representan los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales entre las olas. En aguas profundas, tres componentes son significativos en la expresión del término fuente total y corresponden a las contribuciones atmosféricas, disipación por *whitecapping* e interacciones no lineales. Además de estos tres términos, en aguas someras, términos fuente adicionales inducidos por efectos de batimetría juegan un papel importante, los cuales son la fricción con el fondo, rompimiento de la ola inducido por el fondo e interacciones no-lineales (Aragón, 2014).

4.1.1.2 Modelo hidrodinámico. DELFT 3D-FLOW

El módulo Delft 3D-Flow, realiza simulación hidrodinámica multidimensional que calcula el flujo no estacionario y el fenómeno de transporte resultantes de distintos forzamientos dentro de una malla rectilínea o curvilínea con fronteras establecidas. El módulo hidrodinámico tiene la capacidad de acoplarse simultáneamente con flujos atmosféricos de agua y de calor; de igual manera incorpora los cálculos simultáneos del transporte de sedimentos y cambios morfológicos obtenidos en el módulo de morfodinámico (Aragón, 2014).

El módulo Delft3D-Flow resuelve las ecuaciones de movimiento en dos o tres dimensiones. El sistema de ecuaciones consiste de: ecuaciones de movimiento horizontal, de continuidad, de transporte para constituyentes conservativos y el modelo de cierre de la turbulencia. La ecuación de momento vertical contempla la aproximación hidrostática, es decir que las aceleraciones verticales se asumen como pequeñas en relación a la aceleración gravitatoria y pueden ser despreciadas. El conjunto de ecuaciones diferenciales en combinación con el conjunto de condiciones iniciales de frontera es resuelto mediante el esquema de diferencias finitas (Aragón, 2014).

4.1.1.3 Diagrama de Flujo de módulos DELFT 3D

En la Figura 25 se describe la interacción de los diferentes módulos utilizados en el sitio de estudio y las condiciones iniciales necesarias, así como los resultados que arrojan los módulos.

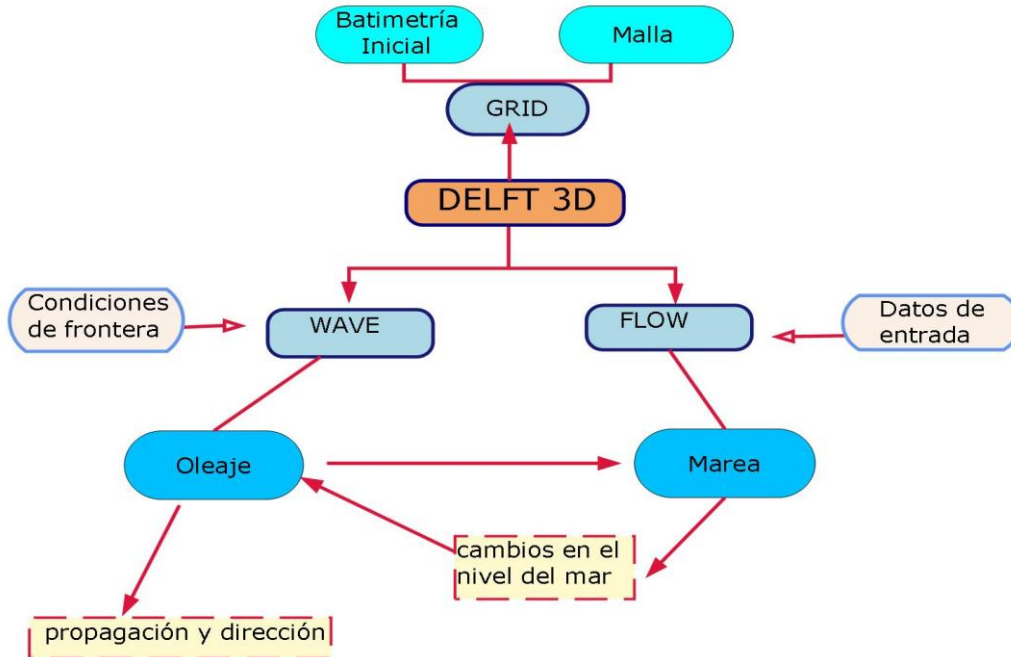


Figura 25.- Diagrama de Flujo de módulos DELFT 3D

4.2 Obtención de Datos del Sitio de estudio

4.2.1 Estimación de gastos del cauce de ríos

Como se mencionó en el capítulo III, son cuatro las cuencas hidrológicas que abarcan el sitio de estudio. Para cada una, se localizaron los ríos principales que transitan un mayor flujo de agua en temporada de lluvias; la mayoría de ellos son de quinto orden. Para cada río se modeló el gasto que es descargado hacia el mar.

Los ríos analizados, por su ubicación en la red hidrológica del INEGI, son cuatro y se presentan en la tabla 7 y en la figura 26.

Tabla 7.- Número y nombre de ríos analizados

| Subcuenca | Nombre del Río | Numero de Río |
|-----------|-------------------|---------------|
| RH03Aa | El Salado | 1 |
| RH03Ab | San Jacinto | 2 |
| RH03Ac | Migriño | 3 |
| RH06Aa | El Salto de Villa | 4 |

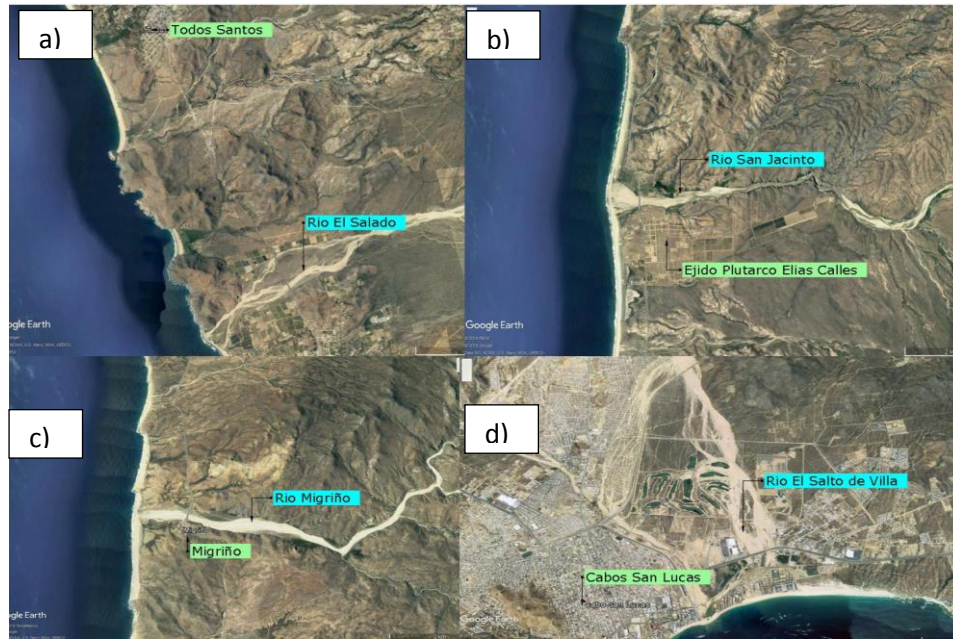


Figura 26.- Ubicación de ríos analizados, a) rio El salado b) rio San Jacinto, c) rio Migriño, d) rio El Salto de Villa (imágenes tomadas de Google earth pro)

El procedimiento para la obtención de los gastos se utilizó el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas SIATL (2015) del INEGI, donde se realizó el cálculo del gasto con datos presentados en la plataforma SIATL y precipitación que se presentan a continuación.

Los indicadores del cauce principal son: área drenada, longitud, elevaciones, tiempo de concentración y pendiente del cauce, de cada una de las cuencas y ríos principales (tabla 8). El coeficiente de escurrimiento en porcentaje se obtuvo del estudio hidrológico del estado de Baja California Sur (2000). Los anteriores se consideraron para obtener el cálculo de gastos que pasa por cada rio en épocas de lluvias.

Tabla 8.- Indicadores del cauce principal de los ríos analizados

| Indicadores del cauce principal | | | | | |
|---------------------------------|--------|--------|---------|--------|-----------------|
| Rio | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| Elevación máxima | 1474 | 1680 | 1218 | 893 | m |
| Elevación media | 737 | 840 | 609 | 446 | m |
| Elevación mínima | 1 | 30532 | 1 | 0 | m |
| Longitud | 30333 | 5.5024 | 34596 | 30162 | m |
| Pendiente media | 4.86 | 5.5024 | 3.54177 | 2.9606 | % |
| Tiempo de concentración | 174.91 | 166.69 | 218.06 | 211.62 | min |
| Área Drenada | 320.9 | 224.9 | 201.43 | 190.19 | km ² |
| Coficiente de escurrimiento | 7.6 | 7.6 | 5.3 | 4.4 | % |



Se consideraron cuatro periodos de retorno, 5, 10, 20 y 50 años, que son algunos de los años para los que la SCT – DGST (2010) presenta mapa de isoyetas. De ahí se obtuvo información respecto de la intensidad de lluvia en mm/hr de una tormenta asociadas a un periodo de retorno y duración. Cabe mencionar que la duración de la tormenta de todos los cálculos fue de 20 min.

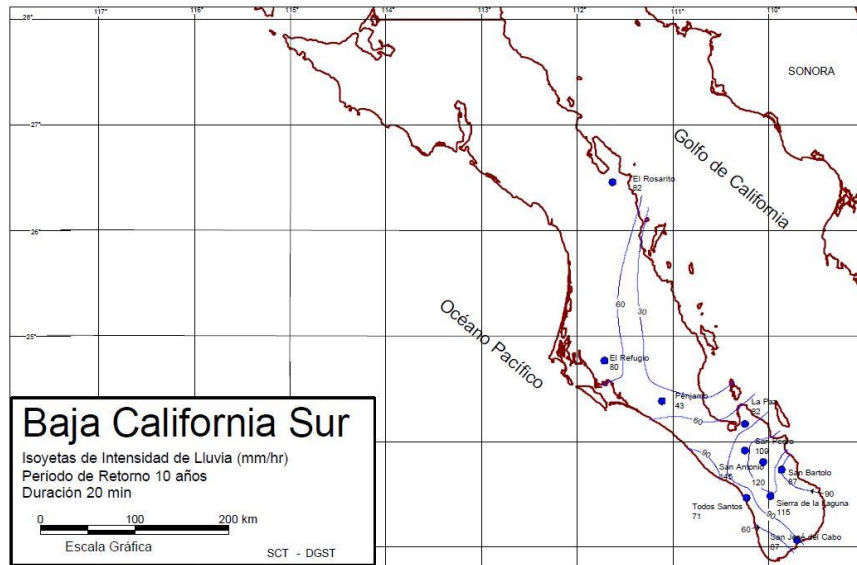


Figura 27.- Isoyetas de intensidad de lluvia (Tomada de SCT)

4.3 Parámetros de entrada del modelo

4.3.1 Batimetría

El dominio de cálculo del modelo es la topo-batimetría extraída de la carta náutica de la región (Agency Hydrographic, 1980), la cual fue georreferenciada empleando el software ArcGis (Esri,2017). Se obtuvieron las líneas batimétricas y posteriormente la base de puntos por medio de AutoCAD, para posteriormente generar un archivo GRD, de donde se extrajeron los puntos X,Y,Z con ayuda del programa dx2fxyz (Guthrie CAD/GIS, 2017), figura 28.

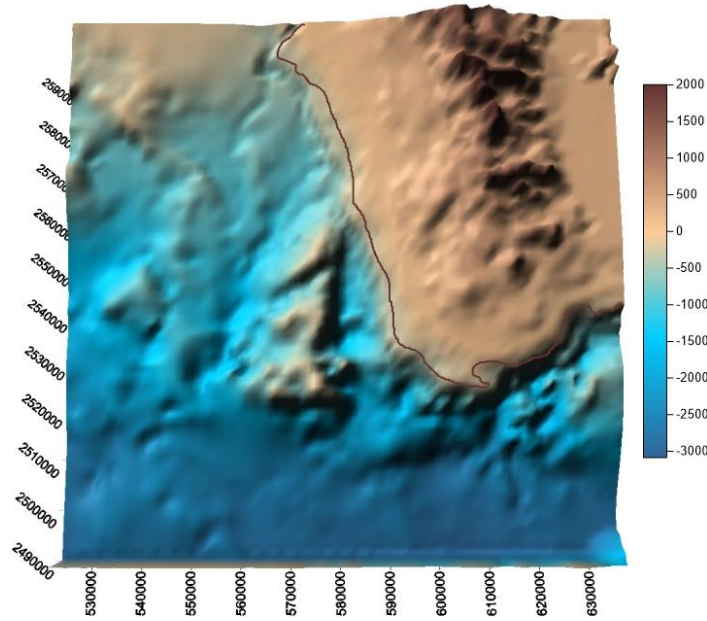


Figura 28.- Topo-batimetría de la zona de estudio

4.3.2 Mallas

El método numérico implementado en DELFT 3D está basado en un esquema de diferencias finitas. Para discretizar en el espacio, el área a modelar es establecida por una malla que puede ser rectangular, esférica o curvilínea. La malla debe ser ortogonal y bien estructurada, para la discretización, las variables son ordenadas en un patrón llamado Arakawa c-grid o malla escalonada, ver figura 29 (Aragón,2014). Donde los puntos del nivel de agua (puntos de presión) están definidos en el centro de una celda y los componentes de la velocidad son perpendiculares a la cara de la celda de la malla donde están situados, la profundidad está definida en las esquinas (Deltares, 2014).

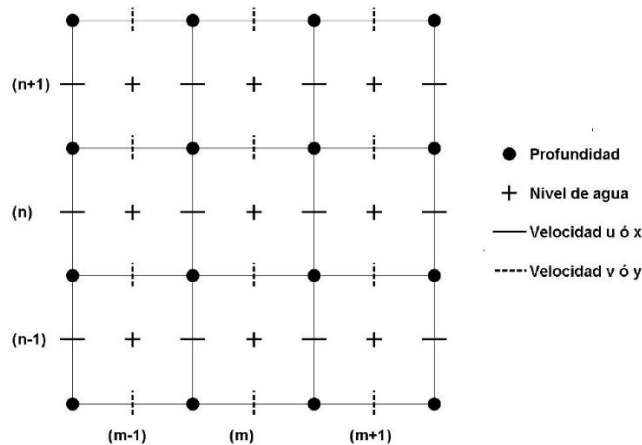


Figura 29.- Malla escalonada DELFT 3D (tomada de Deltares, 2014)



Aragón (2014) sugiere algunos criterios para la construcción de las mallas:

- Debe cubrir toda el agua y abarcar un poco más allá de la frontera en tierra.
- Debe ser ortogonal: las líneas de la malla deben intersectarse perpendicularmente.
- El espaciamiento de la malla debe variar suavemente sobre el área computacional para minimizar los errores de inexactitud en los operadores de las diferencias finitas.

Para este estudio se usaron mallas rectangulares con las siguientes características: para oleaje la resolución espacial fue de 200x200 m; para la marea 200x400 m girada a 30 ° y para el análisis con puntos de descarga la malla fue de 100x100 m. Todas las mallas fueron generadas por la herramienta RGRGRID de DELFT 3D. Para el módulo WAVE en el que se requiere más recurso computacional, se acortó la zona de tierra hasta la línea topográfica de 200 m. Posteriormente se unieron la malla con la topo-batimetría por medio de QUICKIN de la sección GRID del DELFT 3D y se realiza una interpolación espacial, para lograr la máxima correlación entre la batimetría numérica y los puntos de datos batimétricos conocidos.

4.3.3 Fronteras y constantes

Para el módulo FLOW (modelo de marea y descargas) se emplearon 3 fronteras abiertas al Norte, Sur, Este, empleando fronteras Water level con pendiente cero, de lado oeste no se asignó ninguna frontera ya que es frontera de tierra. Como constantes para el módulo FLOW se usó: la rugosidad de Manning de 0.023, nivel de agua y velocidades cero. Como constantes, la gravedad de 9.81 m/s² y densidad de 1025 kg/m³.

Mientras que para el modelo de oleaje en el módulo WAVE se usaron 4 fronteras abiertas, Norte, Este, Sur y Oeste con los estados de mar, que fueron alimentadas con las características de oleaje a propagar: altura de ola significativa (Hs), periodo pico (Tp) y dirección del oleaje en grados. Las características de oleaje de los distintos escenarios se asignaron uniformemente en todas las fronteras y a lo largo de ellas. Se seleccionó el espectro de la forma JONSWAP.

4.4 Resolución Numérica

Con la información descrita en párrafos anteriores de la zona de estudio y obtenidas la batimetría, mallas, fronteras y constantes, se generaron los casos de simulación, que fueron ejecutados en los módulos WAVE y FLOW del DELFT 3D, para así representar de mejor manera las condiciones hidrodinámicas y meteorológicas que se presenta en el sitio de estudio.

4.4.1 Marea

Para la simulación de marea astronómica, se realizó primero una simulación abarcando 15 días, la cual arroja resultados a cada minuto con el módulo FLOW-DELFT 3D. Posteriormente se simuló por un mes, desde el 7 de noviembre de 2017 al 7 de diciembre de 2017 con un paso de tiempo de 5



minutos, con la finalidad de observar los niveles de marea presentados en la zona de estudio. El tiempo de calentamiento del modelo se observó de 10 horas aproximadamente.

4.4.2 Oleaje

Para la simulación de oleaje con el módulo WAVE-DELFT 3D, se utilizaron los datos presentados en el capítulo III, de donde se tomaron los valores más representativos y de mayor frecuencia de altura significativa (H_s), periodo pico (T_p) y dirección del oleaje que incide en la zona de estudio, presentando así condiciones normales y de tormenta. En total se definieron 39 simulaciones de oleaje, las características de cada simulación se presentan en la tabla 9.



Tabla 9.- Simulaciones para oleaje

| Caso | H_s (m) | T_p (s) | Dirección (°) |
|------|-----------|-----------|---------------|
| 1 | 0.6 | 10 | 270 W |
| 2 | 0.6 | 11 | 270 W |
| 3 | 0.6 | 12 | 270 W |
| 4 | 0.8 | 10 | 270 W |
| 5 | 0.8 | 11 | 270 W |
| 6 | 0.8 | 12 | 270 W |
| 7 | 1 | 10 | 270 W |
| 8 | 1 | 11 | 270 W |
| 9 | 1 | 12 | 270 W |
| 10 | 3 | 13 | 270 W |
| 11 | 3 | 15 | 270 W |
| 12 | 5 | 13 | 270 W |
| 13 | 5 | 15 | 270 W |
| 14 | 0.6 | 10 | 315 NW |
| 15 | 0.6 | 11 | 315 NW |
| 16 | 0.6 | 12 | 315 NW |
| 17 | 0.8 | 10 | 315 NW |
| 18 | 0.8 | 11 | 315 NW |
| 19 | 0.8 | 12 | 315 NW |
| 20 | 1 | 10 | 315 NW |
| 21 | 1 | 11 | 315 NW |
| 22 | 1 | 12 | 315 NW |
| 23 | 3 | 13 | 315 NW |
| 24 | 3 | 15 | 315 NW |
| 25 | 5 | 13 | 315 NW |
| 26 | 5 | 15 | 315 NW |
| 27 | 0.6 | 10 | 225 SW |
| 28 | 0.6 | 11 | 225 SW |
| 29 | 0.6 | 12 | 225 SW |
| 30 | 0.8 | 10 | 225 SW |
| 31 | 0.8 | 11 | 225 SW |
| 32 | 0.8 | 12 | 225 SW |
| 33 | 1 | 10 | 225 SW |
| 34 | 1 | 11 | 225 SW |
| 35 | 1 | 12 | 225 SW |
| 36 | 3 | 13 | 225 SW |
| 37 | 3 | 15 | 225 SW |
| 38 | 5 | 13 | 225 SW |
| 39 | 5 | 15 | 225 SW |



Capítulo V. Resultados

5.1 Gastos de ríos

En las tablas 11 a 14 se presentan los resultados de los gastos obtenidos en cada uno de los ríos presentados en el capítulo III, utilizando datos de intensidad de lluvia asociadas a periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años, cuyo procedimiento de obtención, se describió en el capítulo IV.

Tabla 10.- Gasto pico para periodo de retorno de 5 años

Periodo de retorno 5 años

| núm. de río | intensidad de lluvia (mm/hr) | tiempo de concentración (min) | tiempo de concentración (hrs) | lluvia (mm) | Área drenada (km ²) | Q pico (m ³ /s) |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | 12.462 | 174.910 | 2.915 | 36.330 | 320.900 | 84.549 |
| 2 | 15.301 | 166.690 | 2.778 | 42.510 | 224.900 | 72.755 |
| 3 | 12.863 | 218.060 | 3.634 | 46.750 | 201.430 | 38.168 |
| 4 | 14.786 | 211.620 | 3.527 | 52.150 | 190.190 | 34.519 |

Tabla 11.- Gasto pico para periodo de retorno de 10 años

Periodo de retorno 10 años

| núm. de río | intensidad de lluvia (mm/hr) | tiempo de concentración (min) | tiempo de concentración (hrs) | lluvia (mm) | Área drenada (km ²) | Q pico (m ³ /s) |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | 39.000 | 174.910 | 2.915 | 113.692 | 320.900 | 264.590 |
| 2 | 40.000 | 166.690 | 2.778 | 111.127 | 224.900 | 190.190 |
| 3 | 45.000 | 218.060 | 3.634 | 163.545 | 201.430 | 133.523 |
| 4 | 48.000 | 211.620 | 3.527 | 169.296 | 190.190 | 112.060 |

Tabla 12.- Gasto pico para periodo de retorno de 20 años

Periodo de retorno 20 años

| núm. de río | intensidad de lluvia (mm/hr) | tiempo de concentración (min) | tiempo de concentración (hrs) | lluvia (mm) | Área drenada (km ²) | Q pico (m ³ /s) |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | 47.000 | 174.910 | 2.915 | 137.013 | 320.900 | 318.865 |
| 2 | 45.000 | 166.690 | 2.778 | 125.018 | 224.900 | 213.964 |
| 3 | 50.000 | 218.060 | 3.634 | 181.717 | 201.430 | 148.359 |
| 4 | 58.000 | 211.620 | 3.527 | 204.566 | 190.190 | 135.406 |



Tabla 13.- Gasto pico para periodo de retorno 50 años

Periodo de retorno 50 años

| núm. de río | intensidad de lluvia (mm/hr) | tiempo de concentración (min) | tiempo de concentración (hrs) | lluvia (mm) | Área drenada (km ²) | Q pico (m ³ /s) |
|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 | 58.000 | 174.910 | 2.915 | 169.080 | 320.900 | 393.493 |
| 2 | 45.000 | 166.690 | 2.778 | 125.018 | 224.900 | 213.964 |
| 3 | 60.000 | 218.060 | 3.634 | 218.060 | 201.430 | 178.031 |
| 4 | 67.000 | 211.620 | 3.527 | 236.309 | 190.190 | 156.417 |

5.1 Modelación Marea

Se presentan los patrones de la simulación de marea, para algunos puntos específicos como son: Todos Santos, Plutarco E. Calles, Migriño, Faro Viejo y Cabo San Lucas. El nivel de marea de todo el dominio de la simulación puede ser consultada en el anexo.

En la figura 30, se presenta el nivel de marea de Todos Santos. En donde se observa que el nivel de pleamar máxima es de 0.97 m y una bajamar máxima de -1 m, la pleamar media superior es de 0.68 m y bajamar media inferior de -0.63 m.

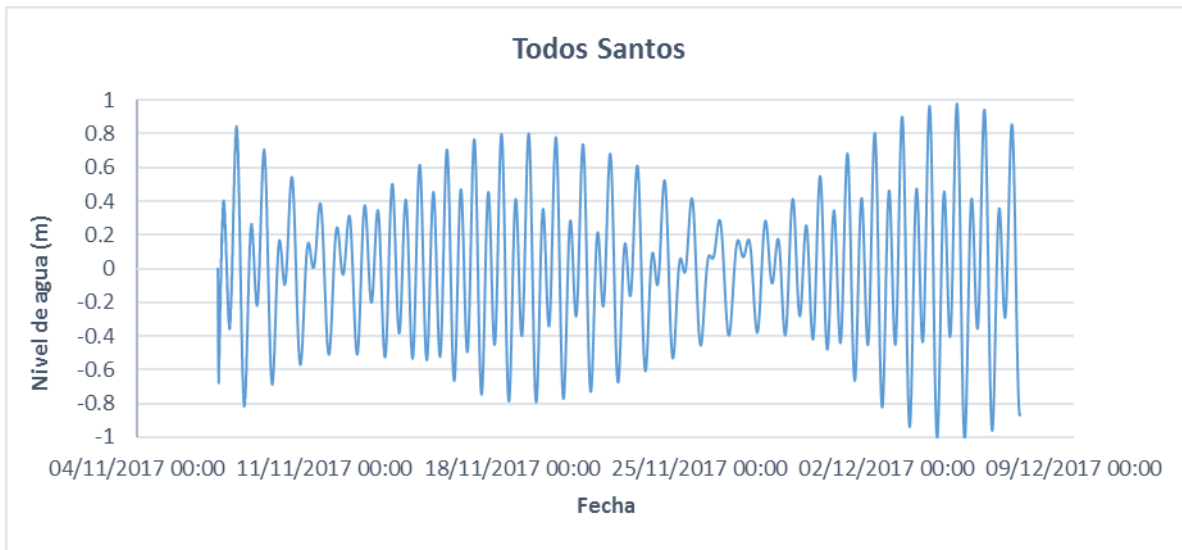


Figura 30.- Nivel de marea de Todos Santos

En la figura 31, se presenta el nivel de marea en las cercanías de la comunidad Plutarco E. Calles. En donde el nivel de pleamar máxima es de 0.95 m y una bajamar máxima de -0.98 m, la pleamar media superior es 0.67 m y bajamar media inferior de -0.62 m.

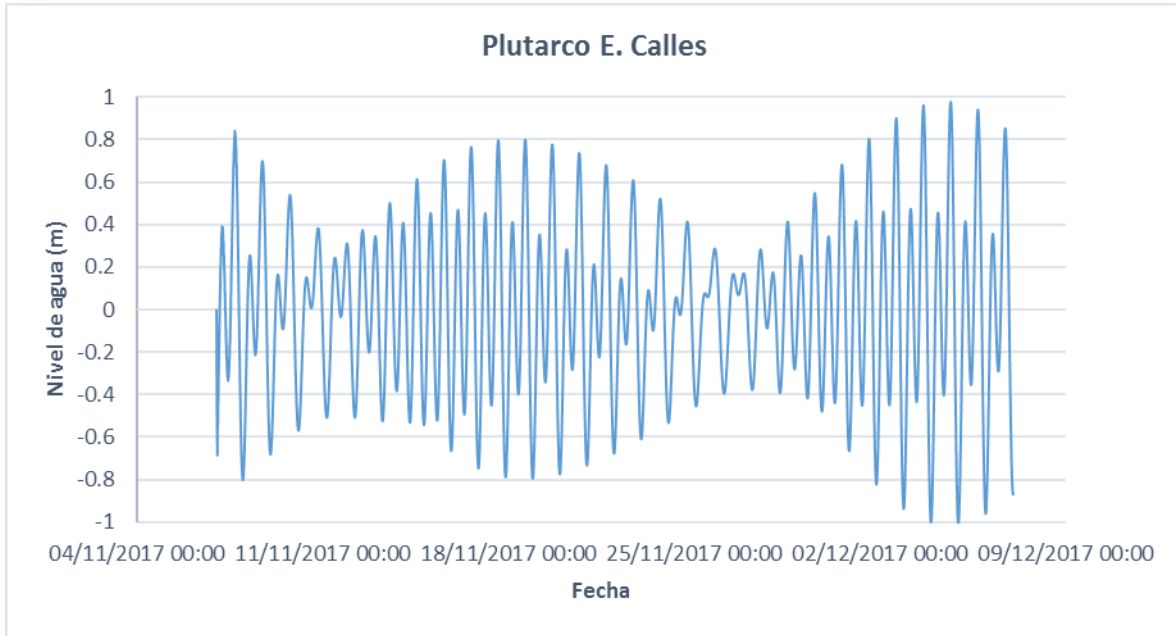


Figura 31.- Nivel de marea de Plutarco E. Calles

En la figura 32, se presenta el nivel de marea en las cercanías de Faro Viejo, presentándose un nivel de pleamar máxima de 0.91 m y una bajamar máxima de -0.96 m. pleamar media superior y bajamar media inferior de 0.66 m y -0.62m.

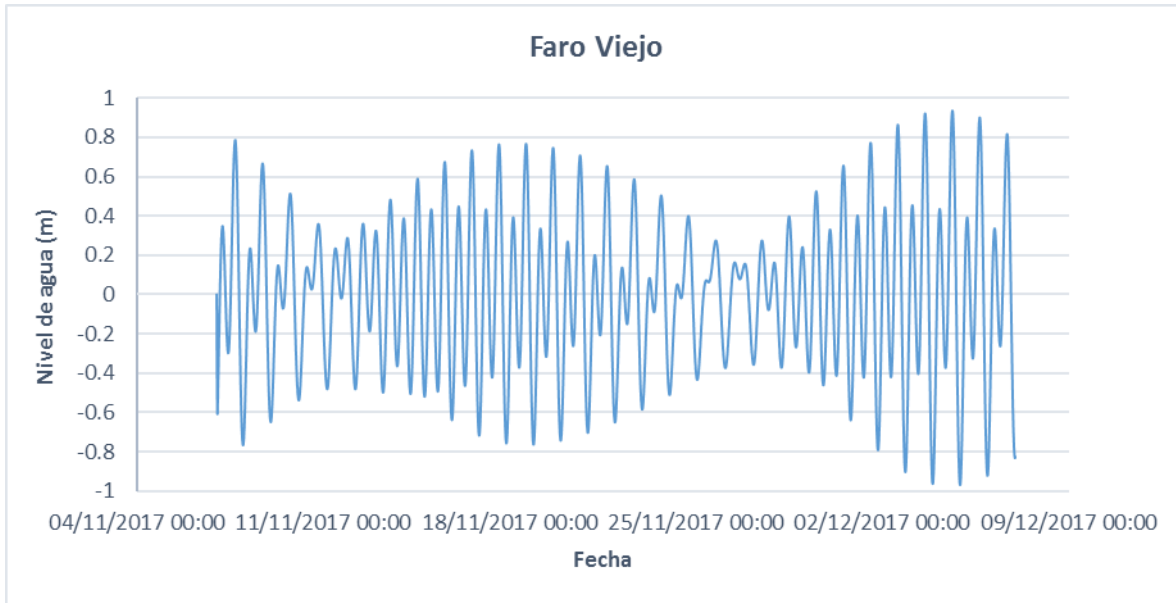


Figura 32.- Nivel de marea de Faro Viejo

En la figura 33, se muestra el nivel de marea de la cercanía a la bahía de Cabo San Lucas, en donde se observa una pleamar máxima de 0.9 m y una bajamar máxima de -0.94 m. Pleamar media superior y bajamar mar media inferior de 0.57m y -0.6 m.

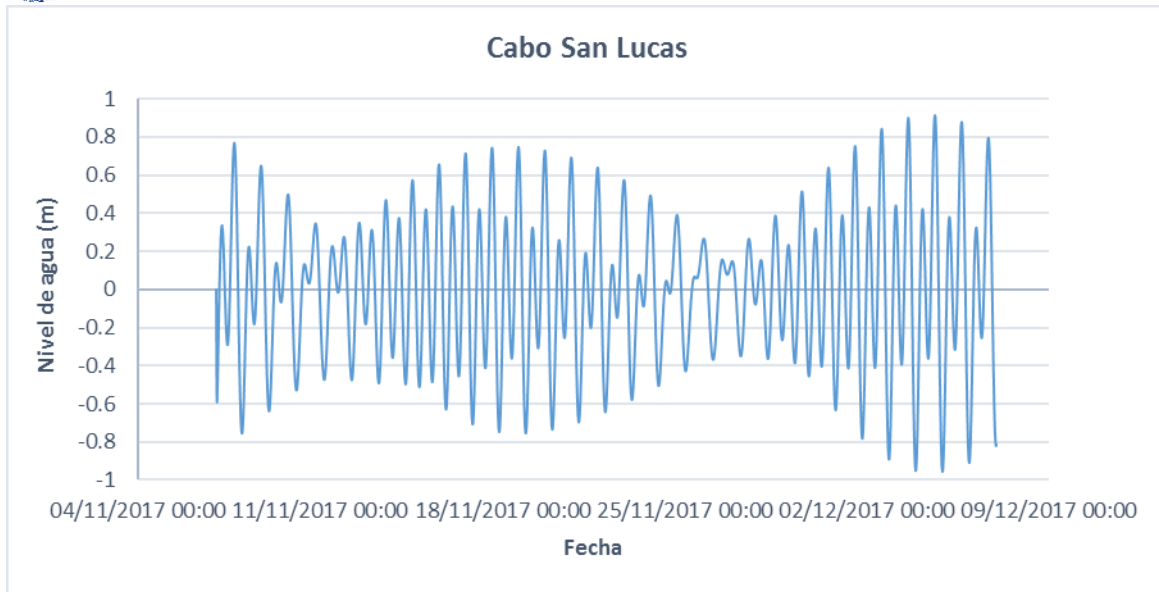


Figura 33.- Nivel de marea de Cabo San Lucas

De acuerdo con la clasificación de Hayes (1979), el tipo de marea resultante en los puntos de observación es mesomareal bajo. Presentándose la mayor pleamar y bajamar máxima de 0.97 m y -1 m respectivamente en las cercanías de Todos Santos y la menor en Cabo San Lucas, con una pleamar 0.9 m y bajamar -0.94 m máxima.

5.2 Modelación Oleaje

En la zona de estudio, se observó que el oleaje es más sensible a la dirección de propagación que a las variables H_s y T_p . Como consecuencias el oleaje disminuye su altura de ola conforme se aproxima a la costa.

La descripción de resultados se realizará conforme a la dirección de incidencia del oleaje (NW, SW y W); sin embargo, se limitó a la descripción de los casos más representativos. Para facilitar la lectura. En el Anexo 1 se presentan todos los resultados.

5.2.1 Oleaje NW (315°)

Para diferentes condiciones de oleaje normal, en la figura 34 se muestran los patrones de oleaje correspondientes a la dirección NW. En puntos específicos ubicados a las cercanías de: Todos Santos, Plutarco E. Calles, Migriño, Faro viejo (se fijaron dos puntos) y Cabo San Lucas.



Se puede observar que los puntos donde hay una mayor incidencia del oleaje son: $H_s=0.6$ m en el punto Migriño, mientras que en el punto Plutarco E. Calles se presentan con $H_s=0.8$ y en $H_s=1$ m.

Por lo que, entre las playas de las comunidades de Plutarco E. Calles y Migriño, existe un grado de influencia del oleaje, ya que impacta con una altura de oleaje mayor en comparación con los otros puntos. En consecuencia, se presenta con mayor energía en la línea de costa en estos puntos.

En todas las condiciones se presenta un patrón de oleaje incidente menor en Cabos San Lucas.

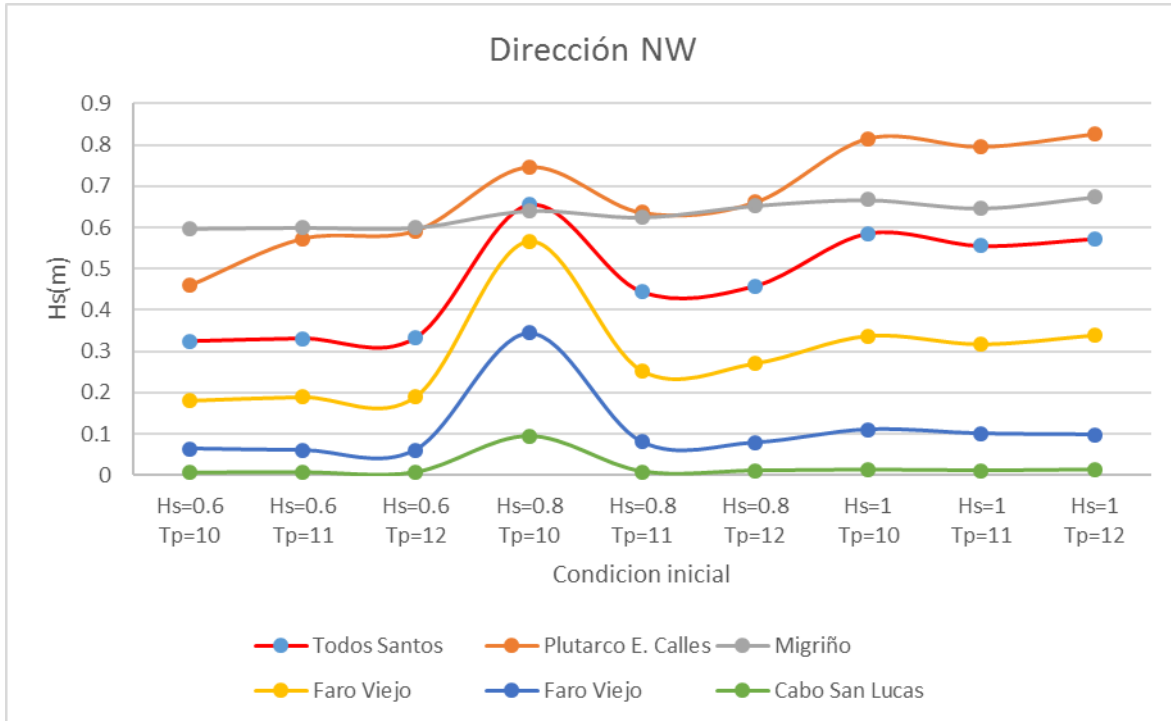


Figura 34.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección NW en puntos de la zona de estudio

Para las condiciones de oleaje extremal, cuyos patrones se presentan en la figura 35. se observa que el punto Plutarco E. Calles presenta la mayor altura de ola incidente, seguido del punto Todos Santos. por lo que el grado de influencia del oleaje es mayor para estos dos puntos.

También se observa que en un punto de Faro Viejo se presenta alturas de oleaje incidente considerables de entre 1 - 1.2 m con H_s propagada de 3 m y 1.8 - 2 m con H_s propagada de 5 m.

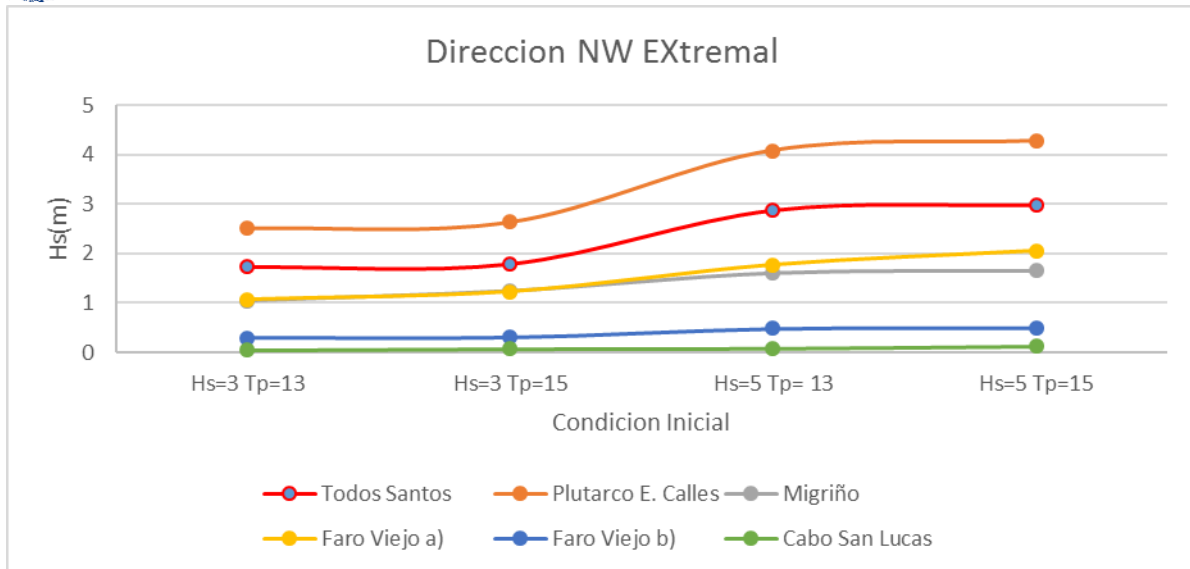


Figura 35.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje extremal en dirección NW en puntos de la zona de estudio

Los patrones presentados por los vectores de corriente por oleaje NW (figura 36) tienen dirección hacia el Sureste, desde Todos Santos hasta el final de la península donde se encuentra Faro Viejo, y desde este sitio hasta la parte final de la bahía de Cabo San Lucas la dirección de los vectores es hacia el Este.

Se puede observar para esta dirección de propagación, la difracción del oleaje con mayor magnitud al final de la península de Baja California Sur (figura 36). La difracción provoca un cambio en su orientación hacia el Sureste, así como la disminución en la altura de oleaje de manera gradual en la zona cercanas a Cabo San Lucas, siendo esta menor en la entrada de la bahía de Cabo San Lucas.

La difracción provoca que el oleaje gane energía cinética y pierda energía potencial, lo cual puede tener como consecuencia inmediata que el oleaje no pueda transportar sedimento y que éste sea depositado en la costa más próxima, donde se encuentra Faro Viejo (Figura 37)

Dichas características debidas a la difracción se presentan en todas las simulaciones con esta dirección de propagación (NW), solo cambia el tamaño de ola que se difracta y la energía con que llega a la línea de costa en las zonas cercanas a Cabo San Lucas.

Con lo anterior es posible suponer que la dirección NW propicia remoción de sedimento en los puntos de Plutarco E. Calles y Migriño ante condiciones normales de oleaje. Y que, debido a la difracción del oleaje, el sedimento sea depositado a las playas cercanas de Faro Viejo y la parte oeste de Cabo San Lucas.

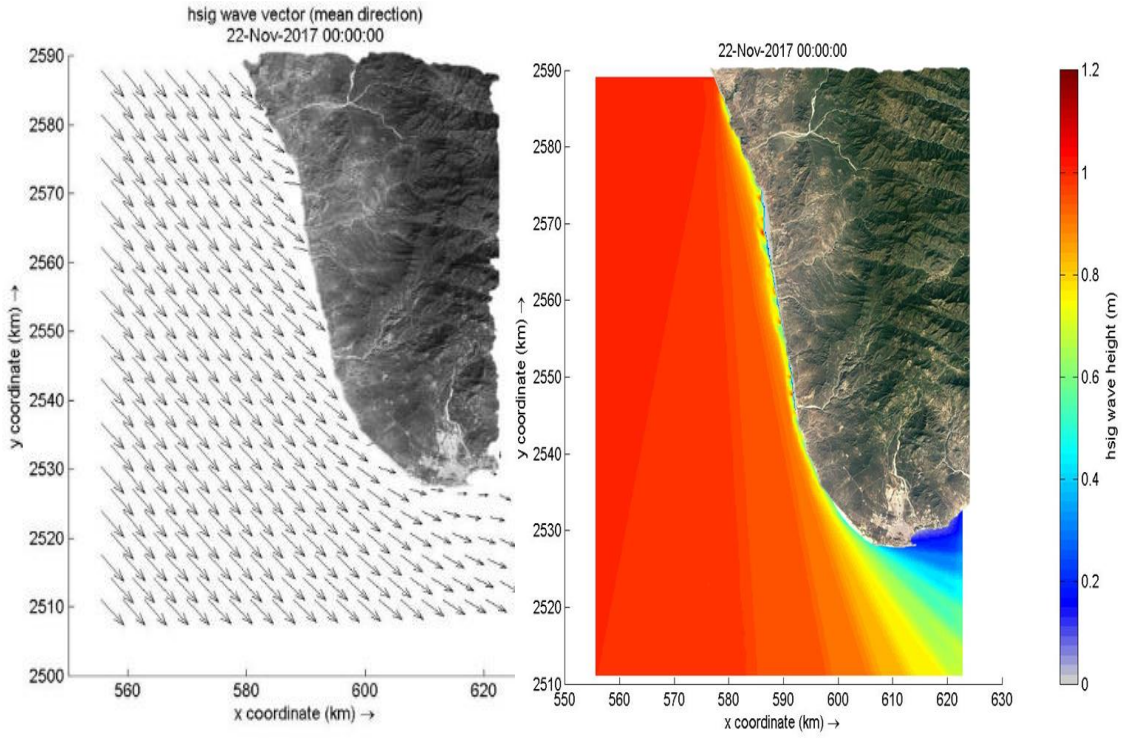


Figura 36.- Oleaje NW ($H_s=1m$, $T_p=11s$)

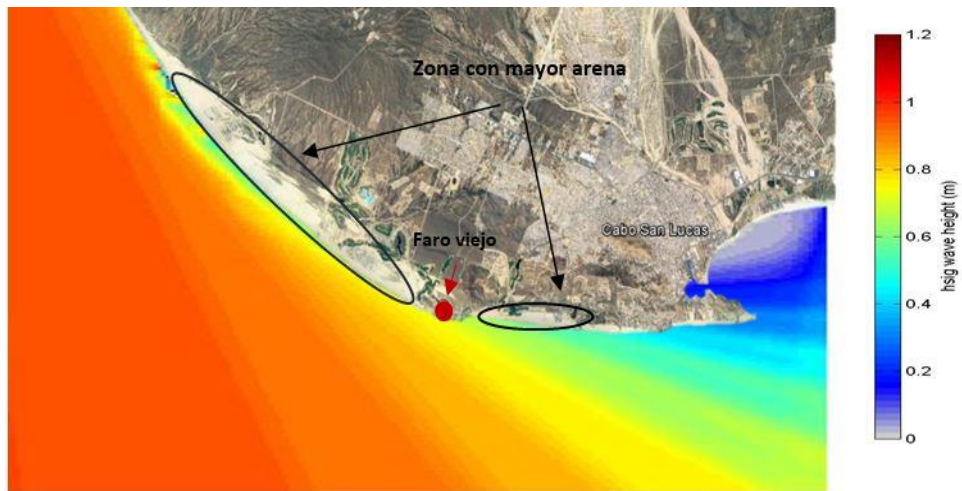


Figura 37.- Bahía de Cabo San Lucas, Oleaje NW ($H_s=1m$, $T_p=10s$)



5.2.1 Oleaje W (270°)

En la figura 38, se muestran los patrones de oleaje en la dirección W. Para los mismos puntos especificados en dirección anterior NW.

Se observa de la figura 38, que los puntos donde hay mayor incidencia del oleaje, en condiciones normales son: para $H_s=0.6$ m el punto Migriño, $H_s=0.8$ y 1m el punto Plutarco E. Calles, con excepción de las condiciones de $H_s=0.8$ y 1 m con $T_p=11$ donde es mayor Migriño. El punto Cabo San Lucas presenta altura de ola menor que los demás puntos de observación.

El punto Todos Santos, también se presentan alturas de incidencia en la línea de costa, significativos, pero con mucho menor altura de ola que en los descritos Migriño y Plutarco E. Calles

Se puede denotar que de igual forma que en la dirección NW, entre las playas de las comunidades de Plutarco E. Calles y Migriño, el oleaje incidente impacta con una mayor altura la costa.

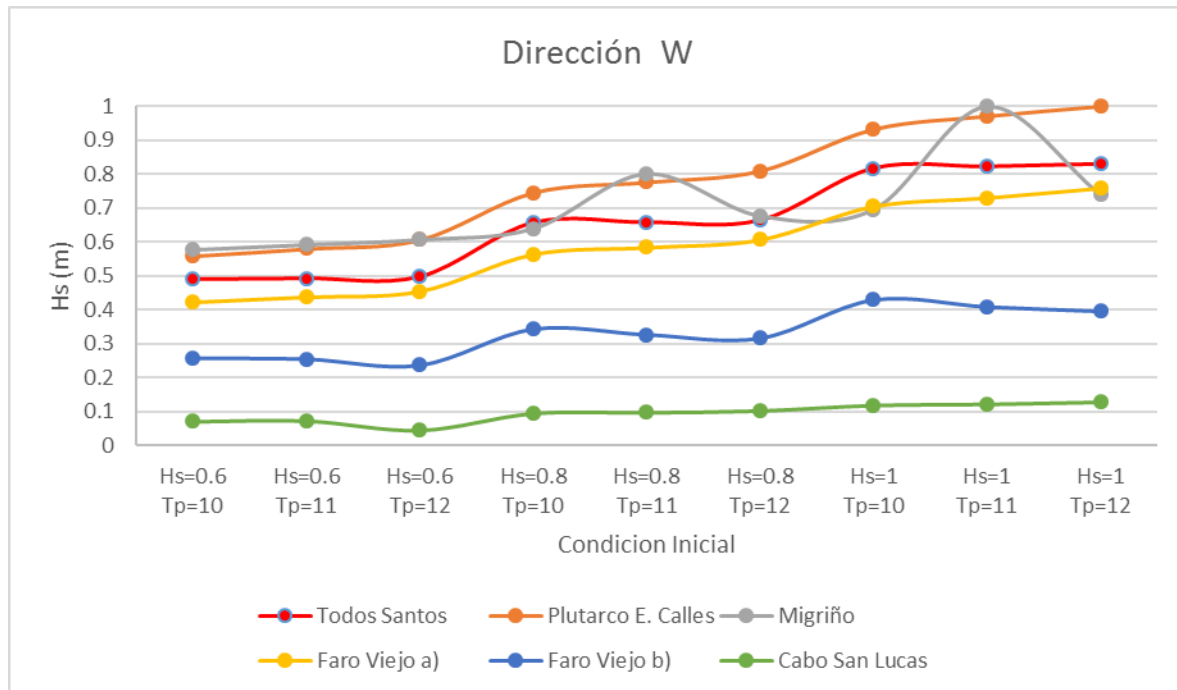


Figura 38.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección W en puntos de la zona de estudio

En condiciones de oleaje extremal (figura 39), se observa que en el punto Plutarco E. Calles presenta la mayor altura de ola que en el resto de los puntos, seguido de Todos Santos. presentándose en la condición $H_s=5$ m con $T_p=15$ s, altura de ola de 4.8 m para el punto Plutarco E. Calles y para el de Todos Santos de 4.2 m. siendo el de menor incidencia Cabo San Lucas.

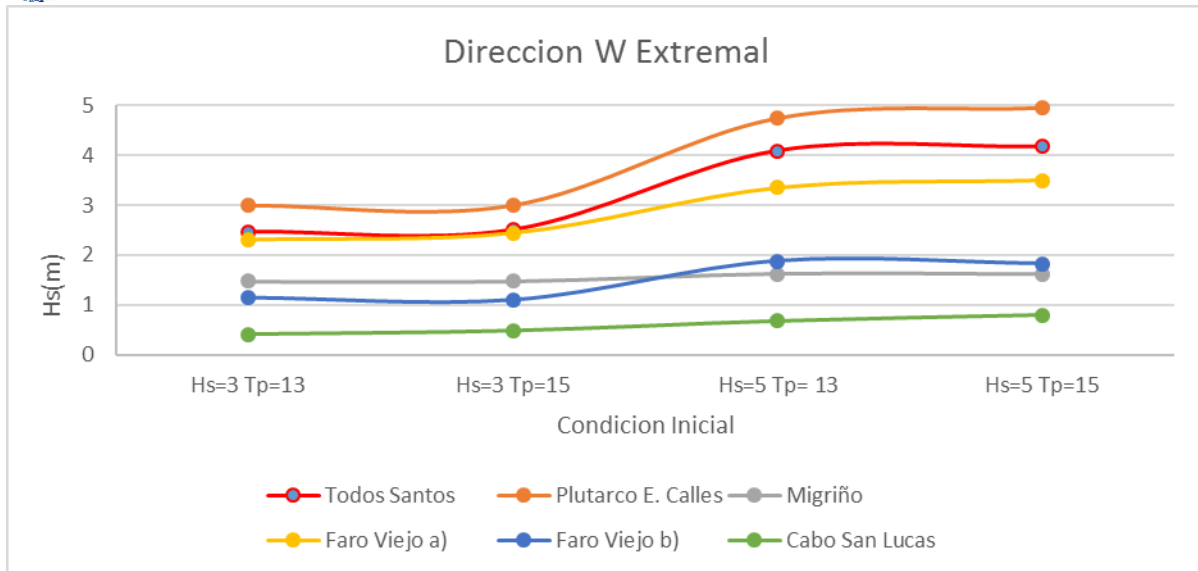


Figura 39.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección W en puntos de la zona de estudio

Los patrones de los vectores de corriente por oleaje W (figura 40), son perpendiculares a la costa en la parte oeste. impactando con mucha mayor energía a la costa de esta zona, lo que podría propiciar posibles cambios morfológicos a la línea de costa. Entre Faro Viejo y cercano a la bahía de Cabo San Lucas, los vectores de corrientes son en dirección al noreste.

Se pudo observar (figura 40) que hay presencia de la difracción del oleaje, pero en menor escala haciendo la comparativa con la presentada en dirección NW. Iniciando antes de Faro Viejo, hasta la bahía de Cabo San Lucas. Provocando el cambio en la orientación del oleaje hacia el noreste. Lo que puede tener consecuencia inmediata que el oleaje no pueda soportar sedimento debido a la difracción y este sea depositado en las playas cercanas a la bahía de Cabo San Lucas.

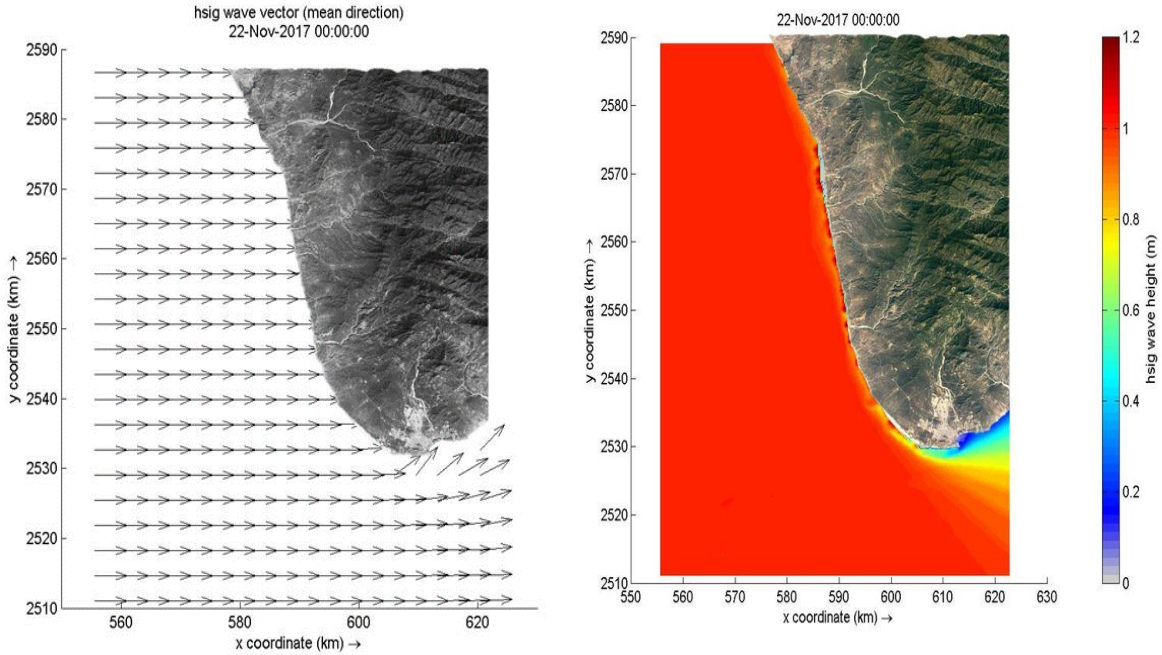


Figura 40.- Oleaje W ($H_s=1m$, $T_p=12s$)

5.2.3 Oleaje SW (225°)

En la figura 41, se muestran las diferentes condiciones de oleaje en la dirección SW. Para los mismos puntos especificados en las direcciones NW y W.

Se puede observar de la figura 41. Que los puntos donde existe una mayor incidencia del oleaje normal, es el de Faro Viejo. seguido por el punto de Todos Santos, con excepción de la condición $H_s=0.6m$, donde es superior el punto Migriño, por una diferencia muy mínima de valor de altura de ola. El punto con menor altura de ola como en las direcciones anteriores, es Cabos San Lucas.

Por lo que se denota, que a diferencia de las direcciones NW y W, esta dirección SW presenta un mayor impacto el oleaje en el punto de Faro viejo. Que se localiza al final de la península de Baja California Sur.

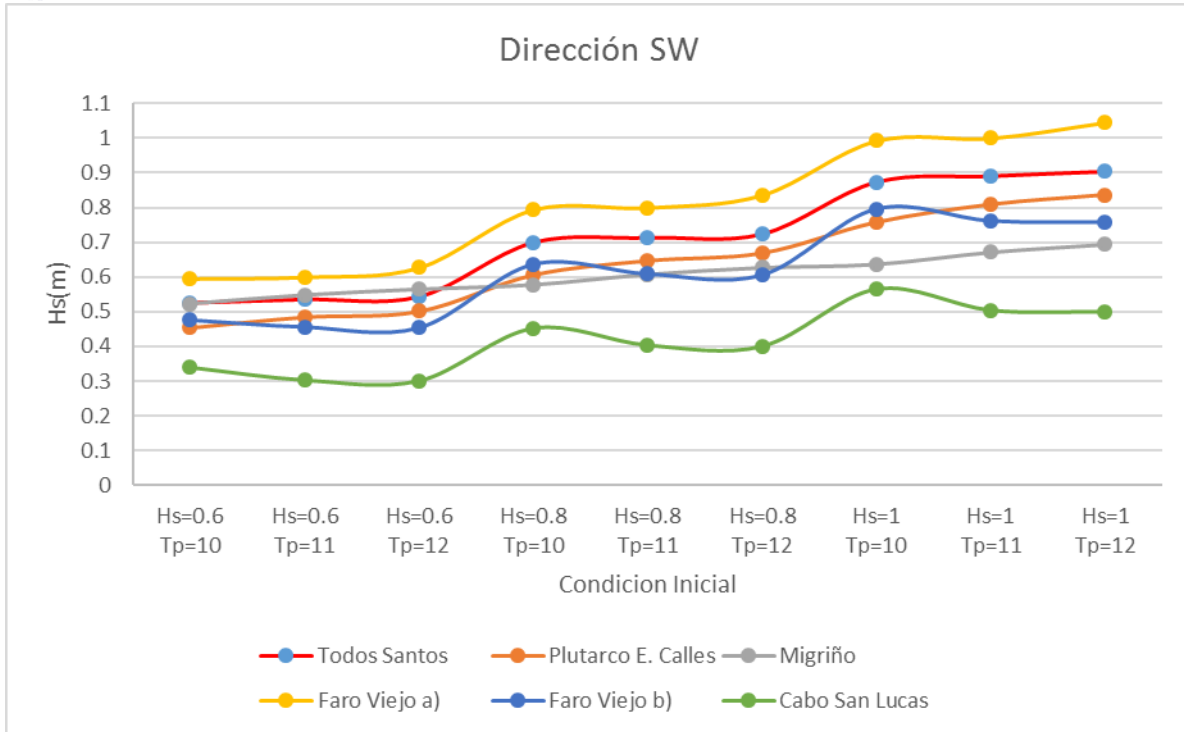


Figura 41.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje en dirección SW en puntos de la zona de estudio

Con las condiciones de oleaje extremal (figura 42), se observa que varía los puntos donde se tiene alturas de oleaje incidente mayor. en condiciones de $H_s=3$ m, el punto Faro Viejo presenta la mayor altura de ola; mientras que para una $H_s=5$ m es en Todos Santos. De la misma forma Cabo San Lucas presenta alturas de ola mínimas con $H_s=3$ m y Migriño con $H_s=5$ m.

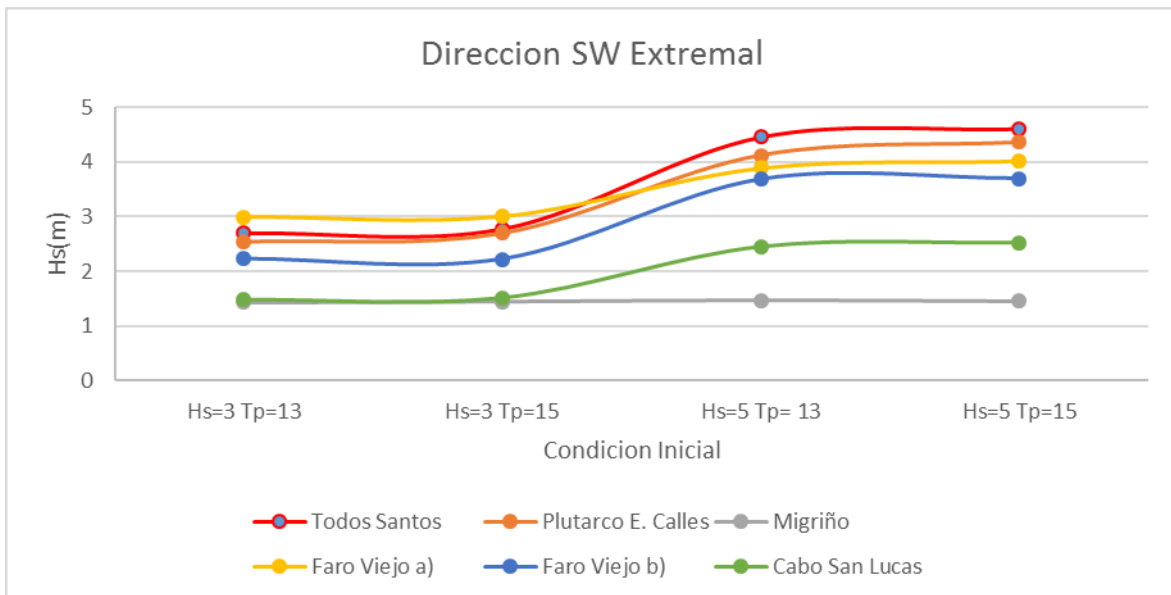


Figura 42.- Condiciones resultantes de propagación de oleaje extremal en dirección SW en puntos de la zona de estudio



Los patrones de vectores por oleaje SW (figura 43). presentan con una dirección NE. excepto en cercanía de la bahía de Cabo San Lucas donde cambian su dirección hacia el N.

En esta condición no se presenta difracción importante, más que en la entrada a la bahía de Cabo San Lucas. Esto propicia una disminución de altura de ola de 0.8 m y 0.6 m, teniendo refracción del oleaje de 0.4 m en zonas alejadas a la bahía. En la parte oeste de la zona de estudio se presenta refracción entre 0.8 y 0.65 m. Presentándose dicho comportamiento con variabilidad en la altura de ola provocado por la difracción y refracción en todas las simulaciones realizadas como se puede observar en el Anexo 1.

Lo antes descrito se puede sugerir que exista un transporte de sedimentos local en la zona sur, donde se encuentra la bahía de Cabo San Lucas y en playas cercanas Faro Viejo.

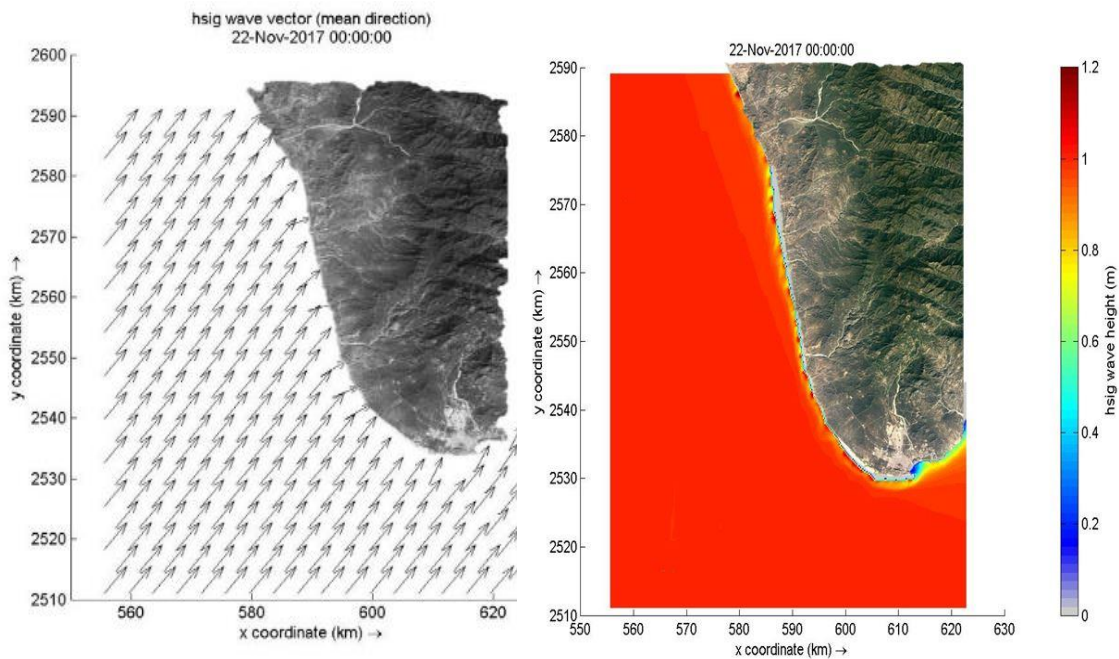


Figura 43.- Oleaje SW ($H_s = 1m$, $T_p = 10s$)

Una característica importante de la comparativa de los tres escenarios de propagación de oleaje en dirección NW, W y SW. es que la dirección SW remueve el sedimento que fue depositado en la zona de Faro Viejo por oleaje NW y W. Además, la bahía de Cabo San Lucas bajo condiciones de corrientes por oleaje en dirección SW (figura 44), presenta cambios de corriente en la punta (extremo sur de la bahía) que es capaz de transportar el sedimento y depositarlo dentro de la bahía, donde se encuentra la zona del Arco, y playas del sur de la bahía, este transporte abastecería de sedimento a las cascadas de arena submarinas.

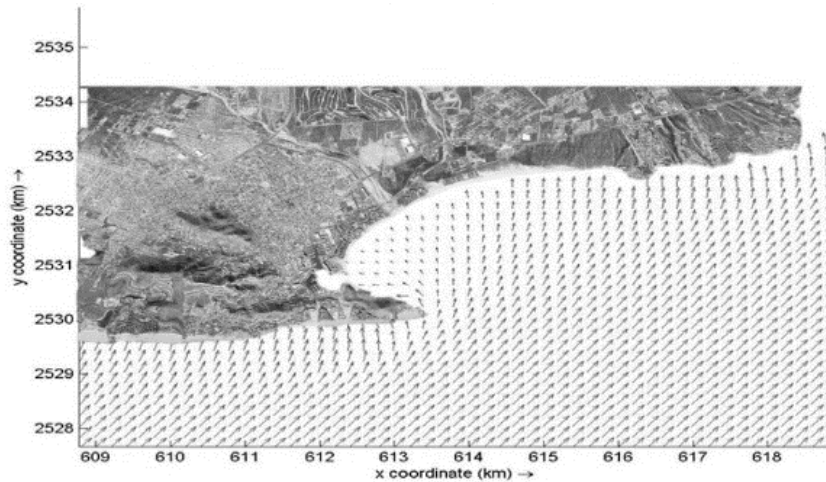


Figura 44.- Oleaje SW, Bahía de Cabo San Lucas

5.3 Modelación Marea-Puntos de Descargas de Ríos

Se presentan los resultados de los patrones de marea con puntos de descarga de ríos, asociado al gasto que transcurriría ante precipitaciones con periodo de retorno de 5, 10, 20 y 50 años. Donde se limitó a la descripción de los casos del nivel de pleamar y bajamar en puntos específicos, estos son: Todos Santos, Plutarco E. Calles, Migriño y Cabo San Lucas. Todos los resultados se presentan en el Anexo 3.

5.3.1 Periodo de retorno de 5 años

En la figura 45 se muestran los niveles de marea, con punto de descarga de ríos asociado a una precipitación con periodo de retorno de 5 años. Las pleamares y bajamares máximas en los puntos específicos son: Todos Santos 0.75 y -0.70 m, Plutarco E. Calles de 0.79 y -0.73 m, Migriño 0.76 y -0.73 m y en Cabo San Lucas 0.64 y -0.61 m.

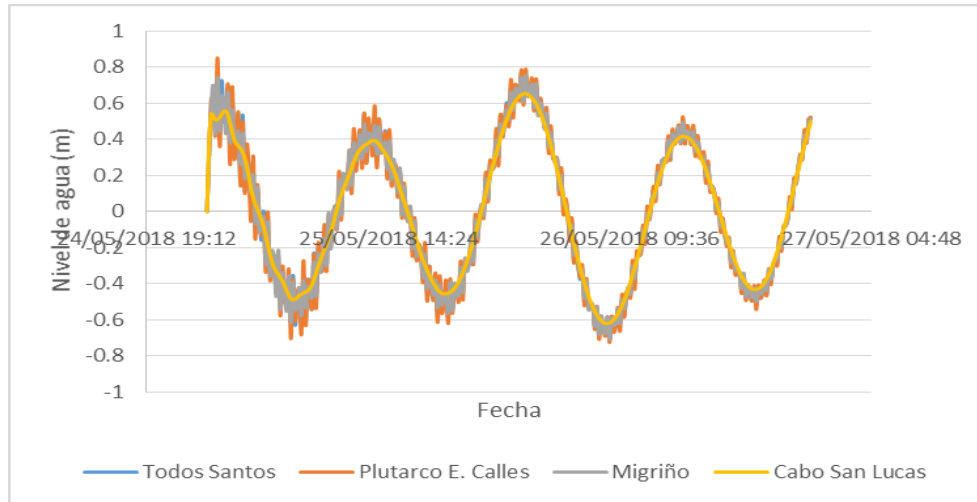


Figura 45.- Nivel de Marea, simulación periodo de retorno de 5 años

En figura 46 se presentan los patrones velocidad de corriente. En donde la zona de desembocadura de los arroyos se tiene velocidades de 0.03 a 0.05 m/s, estas pueden ser resultante de la combinación de las corrientes de descarga del rio y la rotura del oleaje en la línea de costa.

Así mismo en la zona próxima al arroyo San Jacinto. se presenta una corriente originada por la refracción y corrientes de retorno, la cual provocan un desvío de corriente en dos direcciones, Norte y Sur. Provocando un aumento en la velocidad entre 0.01 y 0.02 m/s con dirección Norte y de entre 0.02 y 0.030 m/s al Sur.

En la zona final de la península de Baja California Sur, se presenta la mayor velocidad de corriente con valor aproximado de 0.07 y 0.11 m/s en bajamar y de 0.04 y 0.11m/s pleamar.

Al hacer la comparativa con los resultados de oleaje, en la zona final de la península ocurre disminución en la altura del oleaje por la difracción. Lo que provoca un aumento en la velocidad. Como se comprueba al pasar de una velocidad de corriente en esta zona de 0.02 a 0.1 m/s aproximadamente. Lo que eventualmente puede favorecer al arrastre de sedimento.

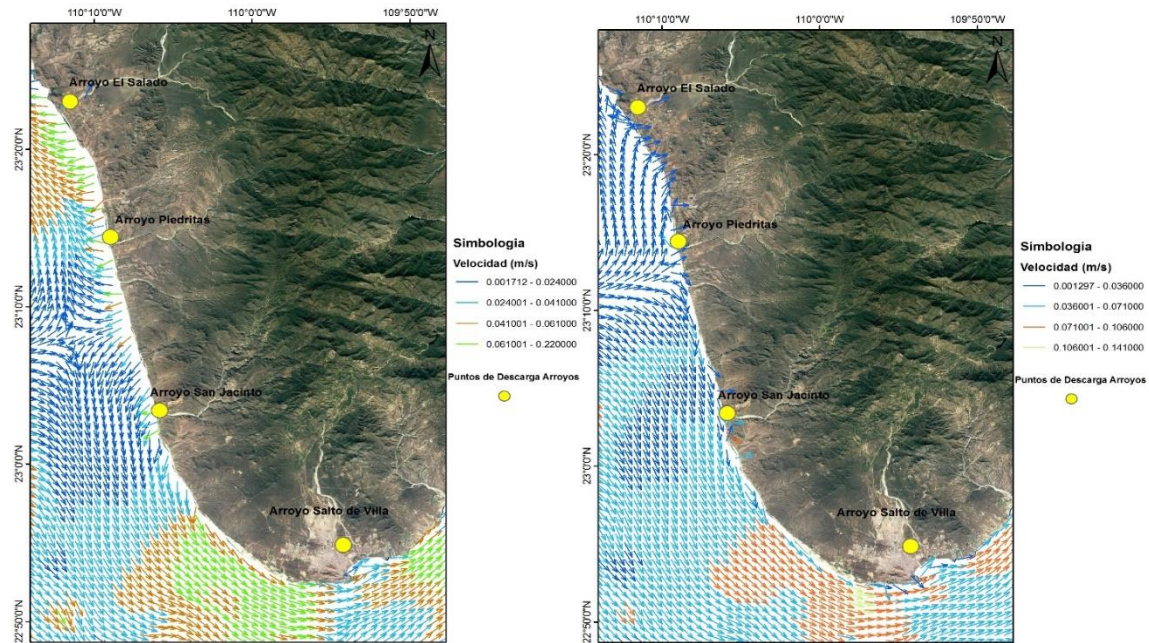


Figura 46.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 5 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)

5.3.2 Periodo de retorno 10 años

En la figura 47 se muestran los niveles de marea, con puntos de ríos cuyo gasto es asociado a una precipitación con periodo de retorno de 10 años. Las pleamares y bajamares máximas en los puntos específicos son: Todos Santos 0.74 y -0.70 m, Plutarco E. Calles 0.78 y -0.72 m, Migriño 0.75 y -0.70 m, Cabo San Lucas 0.64 y -0.62 m.

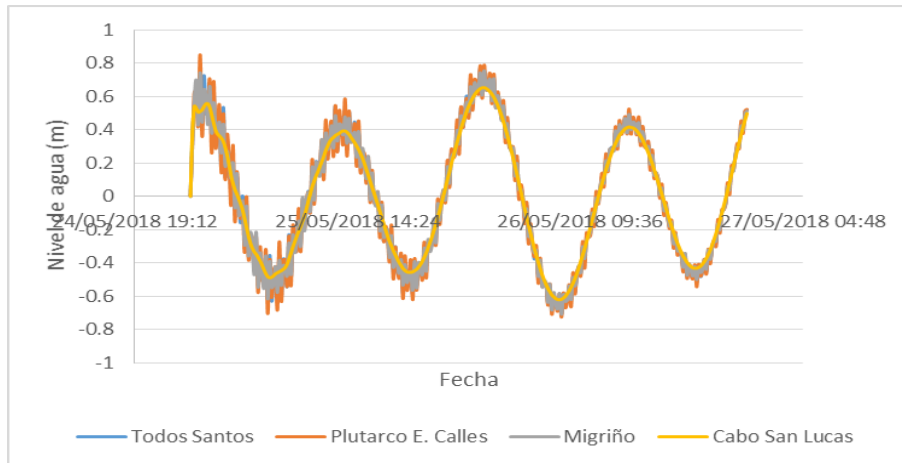


Figura 47.- Nivel de marea, simulación periodo de retorno de 10 años

En la figura 48, se presentan los patrones velocidad de corriente. En donde la zona de desembocadura de los arroyos El Salado y San Jacinto se presentan velocidades entre 0.07 a 0.29 m/s. debido a que el impacto de corrientes es de manera más directa a las playas entre estos dos arroyos.

En la desembocadura del arroyo El Salado (el de mayor gasto), se conjuntan corrientes provenientes del Norte y del Sur y corrientes de retorno, presentando velocidades menores de 0.02 m/s, que al conjuntarse con la saliente del río, se presentan velocidades entre 0.07 y 0.2 m/s.

En el río San Jacinto se presenta una corriente con velocidades en el orden de 0.08 m/s, que en la boca del río se difracta hacia el Norte y Sur con velocidades relativamente bajas, en el orden de 0.01 m/s.

En la zona final de la península de Baja California Sur, se presenta la mayor velocidad, de aproximadamente 0.05 y 0.14 m/s en bajamar y de 0.07 y 0.29 m/s pleamar.

En la saliente de la bahía de Cabo San Lucas se presenta velocidades alrededor de 0.07 m/s por la zona cercana al denominado Arco.

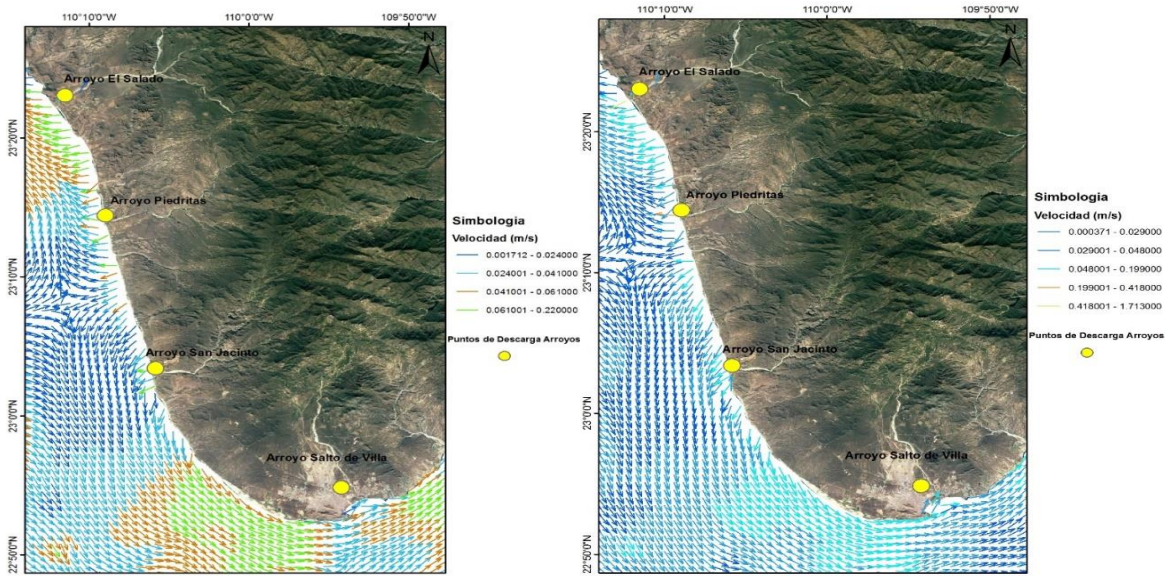


Figura 48.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 10 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)

5.3.3 Periodo de retorno de 20 y 50 años

En la figura 49 se muestran los niveles de marea para puntos cuyo gasto es asociado a periodo de retorno de 20 años. Las pleamares y bajamares máximas en los puntos específicos son los siguientes: Todos Santos 0.76 y -0.70 m, Plutarco E. Calles 0.78 y -0.73 m, Migriño 0.74 y -0.71m y Cabo San Lucas 0.63 y -0.61 m.

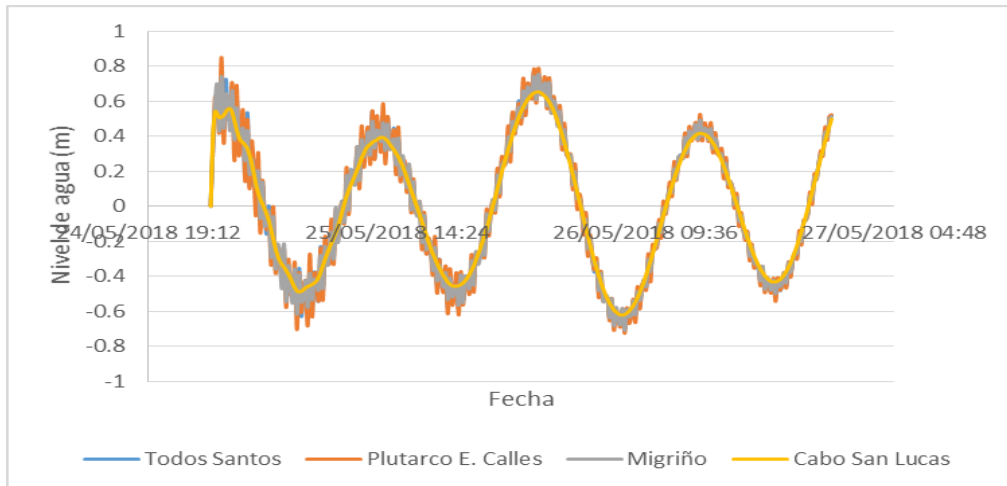


Figura 49.- Nivel de marea, simulación con periodo de retorno de 20 años



En la figura 50 se presentan los niveles de marea para el periodo de retorno de 50 años, donde las pleamares y bajamares máximas son las siguientes: Todos Santos 0.76 y -0.70, Plutarco E. Calles 0.75 y -0.73 m, Migriño 0.74 y -0.71 m y en Cabo San Lucas 0.63 y -0.62 m.

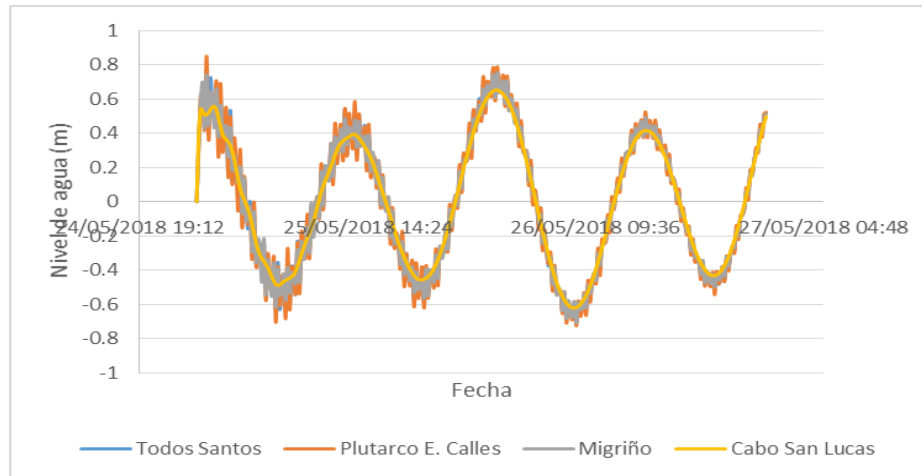


Figura 50.- Nivel de Marea simulación con periodo de retorno de 10 años

Se observo los patrones de velocidad de corriente para un gasto asociado a una precipitación con periodo de retorno de 20 años (figura 51) y 50 años (figura 52), no presentan grandes cambios en las velocidades con respecto a los resultados de 5 y 10 años, presentándose velocidades de 0.06 a 0.3 m/s, e impactando de mayor forma en la zona de las playas entre los ríos El Salado y San Jacinto.

De igual forma que en los resultados de periodos de 5 y 10 años, se observa que, en la parte final de la península de Baja California, se presentan velocidades de corriente mayores de aproximadamente 0.05 y 0.17 m/s en bajamar, 0.06 y 0.34 m/s pleamar; para periodo de 20 años. Y para el periodo de 50 años de 0.05 y 0.16 m/s en bajamar y de 0.07 y 0.37 m/s pleamar.

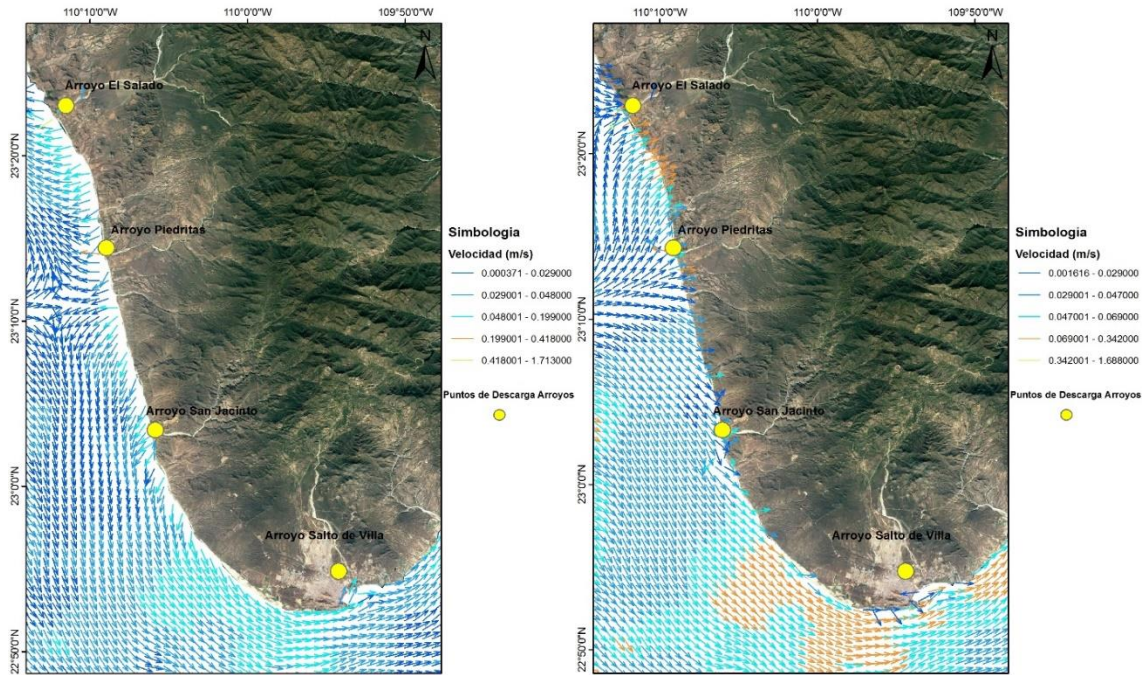


Figura 51.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 20 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)

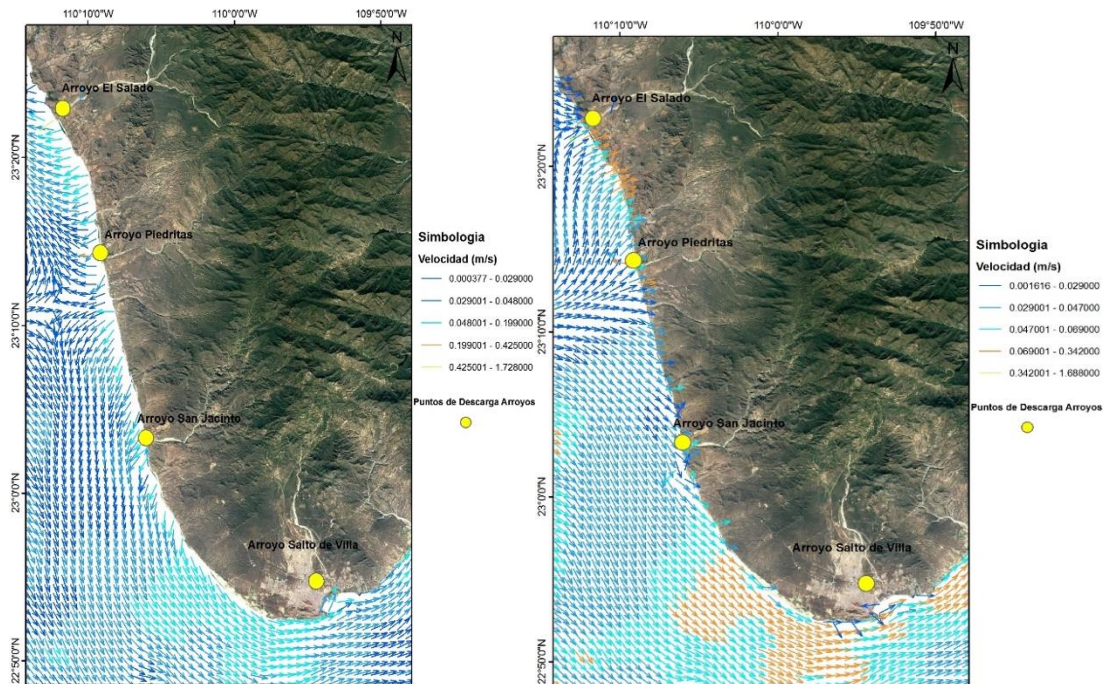


Figura 52.- Corrientes con descarga de arroyos, Periodo de retorno 50 años, nivel de pleamar media superior (arriba), bajamar media inferior (abajo)



VI. Discusión

En el presente trabajo describe y analiza los patrones sedimentarios de la costa suroeste de Baja California Sur. Para ello, se realizaron modelaciones numéricas utilizando el software DELFT 3D especializado en comportamientos hidrodinámicos; se determinaron las fuentes y la distribución del sedimento, así como su tendencia de desplazamiento del noroeste hacia el suroeste. Los resultados anteriores pueden generar políticas de conservación y ordenamiento territorial, que permitan un uso sostenible de la costa y sitios de importancia como son las Cascadas de Arena Submarinas ubicadas en Cabo San Lucas. A continuación, se discuten los principales hallazgos en materia de fuentes, medios de distribución y transporte del sedimento en el suroeste de Baja California Sur.

La distribución del sedimento, está influenciada principalmente por el oleaje. La difracción propicia una acumulación de sedimento en ciertas zonas, como la dirección de incidencia NW, donde su influencia es mayor en la parte final de la península de Baja California Sur, en zonas de Faro Viejo a la bahía de Cabo San Lucas. Lo anterior como consecuencia a la pérdida de energía del oleaje debida ala difracción y como resultado el nulo transporte de sedimento, ocasionando su depósito. Dependiendo de la dirección de incidencia del oleaje, la difracción ayuda a distribuir la arena a lo largo de las playas en el oeste de la bahía de Cabo San Lucas. Pero también la refracción juega un papel importante para la distribución de arena, como el caso de la dirección de incidencia del oleaje SW que distribuye sedimento dentro de la bahía de Cabo San Lucas, por lo tanto, beneficia de sedimento sitios importantes como las Cascadas de Arena Submarinas.

La fuente de sedimento se encontró como principal el proveniente de los arroyos locales, dado a que en la zona de tierra se encuentra la disponibilidad de grandes cantidades de arena, que, durante los periodos de precipitación o avenidas extraordinarias, existe un arrastre de sedimento por los arroyos transitorios y así es depositado en el mar. Lo cual, mediante los patrones arrojados en las modelaciones de marea-descarga de arroyos, las corrientes cambian de velocidad y dirección con tendencia hacia el suroeste y en la zona final de la península de Baja California Sur presentándose una disminución de velocidades significativa.

Realizando un análisis entre todas las condiciones del oleaje se puede denotar que existe un patrón del transporte de sedimento predominante del NW hacia el SW, lo cual se denota en sitios como la



zona de playas de Migriño y Plutarco E. Calles donde el oleaje impacta con mayor energía la línea de costa y generando condiciones para la erosión y con ello la captura de sedimento por parte del oleaje. Los ríos de mayor caudal registrado: El Salado y San Jacinto, junto con la refracción del oleaje describen el comportamiento de, las corrientes, ya que estas favorecen la remoción del sedimento depositado en la boca de los ríos arrastrados por las precipitaciones.

Murillo-Jiménez (2007) reporta que Cabo San Lucas tiene algunos suministros de sedimentos proveniente del W con dirección E y aportaciones de sedimento provenientes de diversas fuentes. Los resultados obtenidos de este trabajo sugieren la existencia de más agentes hidrodinámicos presentes en la parte suroeste de la península de Baja California Sur, los agentes principales para la proporción y distribución de sedimento en la costa oeste, como la difracción y energía del oleaje favorecen la obtención sedimentaria de Cabos San Lucas.

El viento es un agente que ayuda a tener sedimento en la costa, dado que en la zona de estudio existen grandes cantidades de dunas transgresivas y frontales, como lo describe Martínez (2015). El cual, en el análisis de caracterización del viento en este estudio, muestra que el viento tiene velocidades mayores a 11 m/s y la dirección predominante es hacia el NW y E, ante la movilidad que pueda existir con algunas dunas, pueden tender a una orientación más hacia tierra que al mar, es decir, la duna crece hacia tierra. Sin duda el viento es un factor importante tanto para el depósito de sedimento en los arroyos, como la formación de cordones de dunas en la línea de costa, dichas formaciones puede ser capturada por el oleaje en condiciones extremas y así su dinámica como la presentada en este estudio. Sin embargo, los resultados hidrodinámicos de este trabajo dejan una herramienta futura para realizar una caracterización del transporte eólico y comportamiento de dunas en esta zona de Baja California Sur, bajo condiciones por época del año, eventos extremos y proyecciones futuras del viento.

Como se mencionó en párrafos anteriores este trabajo tiene la utilidad para la clasificación de fuentes importantes tanto para la captura como recepción de sedimento, lo cual indica un manejo equilibrado de conservación como de ordenamiento territorial, ya que cualquier alteración a la dinámica sedimentaria modificaría su desplazamiento y depósito. Además, alteraciones en el déficit de sedimento afectaría principalmente a playas en zona de Cabo San Lucas y las Cascadas de Arena Submarinas que dependen en más de un 40% de la actividad turística que en ellas se desarrolla.



VII. Conclusiones

7.1 Conclusiones

La presente tesis tuvo como objetivo describir y analizar los patrones sedimentarios de la costa suroeste de Baja California Sur. De acuerdo con los resultados numéricos obtenidos, se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- El oleaje con una dirección de incidencia NW, proporciona un transporte de sedimentos de la costa norte del estudio. y debido a la difracción del oleaje, presente al final de la península de Baja California Sur, el sedimento será depositado a las playas más cercanas a Faro Viejo y la bahía de Cabo San Lucas.
- Para la incidencia del oleaje con una dirección W, la refracción propicia remoción de sedimento por transporte transversal, por lo que esta dirección puede remover grandes cantidades de sedimento ante condiciones extrémas.
- El oleaje con una dirección de incidencia SW, propicia un transporte de sedimento en la zona sur de la zona de estudio, por lo que el oleaje distribuye el sedimento entre las playas de Faro Viejo y bahía de Cabo San Lucas. Además, propicia a la existencia de un cambio de corriente y velocidades altas en la punta (extremo sur de la bahía) lo que es capaz de depositar y distribuir el sedimento dentro de la bahía, donde se localiza las cascadas de arena submarinas.
- La difracción es el factor por el cual hay acumulación del sedimento en ciertas partes de Faro Viejo. pero también la refracción juega un papel importante para la distribución de la arena.
- En patrones de marea con descarga de ríos, persiste un reacomodo del sedimento debido a la refracción en algunas partes de la costa, lo cual provoca que haya una distribución del sedimento principalmente en el noreste y del sureste, que puede modificar la morfología local.



- Entre la desembocadura de los ríos de mayor caudal, El Salado y San Jacinto; se presentan corrientes de gran importancia. por lo que favorece a la remoción del sedimento depositado en la boca de los ríos ante precipitaciones extraordinarias.

7.2 Futuras líneas de investigación

El estudio numérico del transporte de sedimentos en el Suroeste de Baja California Sur. Permitirá el desarrollo de nuevos trabajos que incluyan:

- La caracterización de los sedimentos en la boca de ríos y arroyos, en la región comprendida de Todos Santos hasta la bahía de Cabo San Lucas.
- Caracterización hidrológica de la región Suroeste de Baja California Sur; donde se tome en cuenta un aforo de caudal de los ríos y arroyos en épocas de lluvias.
- Obtención de datos batimétricos de regiones locales, como Todos Santos, El Pescadero, La Tinaja, Migriño y Cabo San Lucas. para la realización de simulaciones de las condiciones hidrodinámicas.
- Realización de un balance ecosistémico de la región, en donde se tome en consideración la tipología de dunas y su influencia en el aporte de sedimento en las playas del Suroeste de Baja California Sur.



Bibliografía

Aragón, G, J., (2014). Efectos de la hidrodinámica en una playa alimentada artificialmente, tesis que para obtener el grado de: Maestro en ingeniería, SISAL, UNAM.

Autodesk (2015). AutoCAD 2015, versión 20.0.

Bagnold, R A (1941).The physics of blown sand and desert dunes, Methuen, Londres.

Bagnold, R A (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics, Geol Survey, prof papae 422-1 pp, Washington, DC.

Carrasco, R, & Escandon, c. SIATL (2015): WEB-BASED HYDROGRAPHIC NETWORK MODELLING.

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2016), Red de estaciones climatológicas, México.

Comisión Federal de Electricidad, CFE (2014).Manual de diseño de obras civiles, obras marítimas, Tomo 1, México.

DATATUR. (2017). Información Turística por Entidad Federativa. Obtenido de <http://www.datatur.sectur.gob.mx/SitePages>

Defense Mapping Agency Hydrographin/ Topographic Center., (1980). Bahía Magdalena to La Paz.

Deltares (2014). DELFT3D-FLOW User Manual, Delft, The Netherlands.

DGP(2010) Dirección General de Puertos- CGP y MM – S.C.T, Capitulo 3 Condiciones Físicas.

DIGAOHM (2012). Cabo San Lucas, Baja California Sur, <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioCabosnlucas.pdf>.

Esri (2016). ArcGIS, version 2.0.

Estudio hidrológico del estado de Baja California Sur (2000). Estudios hidrológicos de los municipios del estado de Baja California Sur, México.



Félix, D, A.,(2014).Gestión de zonas costeras con técnicas estocásticas multicriterio. Universidad de Granada, Granada, España.

Guthrie CAD/GIS (2017). dx2fxyz , version 20.0.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Baja California Sur, México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2017). Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas SIATL, México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2017). Red Hidrográfica Baja California Suroeste, México.

Kraus, N.C. y Larson, M., (1982). Mathematical model for rapid estimation of infiling and sand bypassing at inlet entrance channels, U.S. Army Engineer Research and Development Center, USA, Vicksburg, Ms.

Madsen, O S, y Grant, W D (1976).Sediment transport in the coastal environment, MIT Ralph M Persons Lab, rep 2009, Cambridge, EUA.

Martínez, M.L. (2009). Las playas y las dunas costeras: un lugar en movimiento, Fondo de cultura económica, México.

Martínez, M.L.(2015). Diagnóstico de las dunas costeras de México, SEMARNAT-CONAFOR, México.

Meyer-Peter, E y Müller, R (1948). Formulas for bead load transport, 2nd Congress of the int Association of Hydraulics Structures Res, Estocolmo, Suecia.

Ministerio de Medio Ambiente, MMA (2007). Manual de diseño de obras civiles, Dirección General de Costas, España.

Navarro, J O., (2012) Tasas de erosión e índices geomorfológicos en tres cuencas costeras al sur de la península de Baja California, México, boletín de la sociedad geológica mexicana, México

PDU (Plan de Desarrollo Urbano) (2013), Plan de desarrollo urbano San José del Cabo y Cabo San Lucas B.C.S. México

Pedrozo, A A., (2011).Procesos costeros y morfología de playas, serie de docencia-UNAM, Instituto de Ingeniería, México, 113-120 pp



Ramírez, M, E.,(2018). Rumbo a un plan de manejo integral de laguna la Mancha, Veracruz, tesis que para obtener el grado de: Maestro en ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Romualdo, T, J C., (2008). Diseño de un puente carretero sobre un canal que conduce una avenida provocada por un ciclón, tesis que para obtener el grado de: Maestro en ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM

Schaaf, P.,(2000). Pre-Miocene palaeogeography of the Los Cabis Block, Baja California Sur: geochronological and palaeomagnetic constraints, UNAM, México.

SDEMARN (2017). Baja California Sur información estratégica 2017, Gobierno de Baja California Sur, México.

SETUES (Secretaria de Turismo, Economía y Sustentabilidad) (2017). Zonas turísticas en Baja California Sur, Gobierno de Baja California Sur, México.

SCT (Secretaria de Comunicaciones y Transportes) (2010). Isoyetas de intensidad de lluvia en Baja California Sur, México.

Silva C, R.,(2014). Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable, UNAM/SEMARNAT, México, 41-43pp

Silva, R, Alcérreca, J, C, (2015). Efectos para el monitoreo, conservación y manejo de recursos naturales de las cascadas de arena submarinas de Cabo San Lucas. Instituto de Ingeniería, México.

Sleath, J F A(1978). On Rolling-grain ripples, Journal of Hydraulic Research, 14 , 69-81pp

Sleath, J F A (1984).Sea bead mechanics, Wiley and Sons, Nueva York, EUA

Sunamura, T y Takeda, I (1984).Landward migration of inner bars, Marine Geology,63-78 pp

Tyson, J. A., (2013). Cabo San Lucas Unerwater & Dive sites.

UNISYS (2017), Hurricane data, <http://weather.unisys.com/hurricanes>

USACE US Army Corps of Engineers . (2002). National inventory of dams. CD-ROM Federal Emergency Management Agency

WHSN (World Heritage Scanned Nomination) (2005). Islands and protected áreas of the Gul of California.





Anexo 1. Oleaje

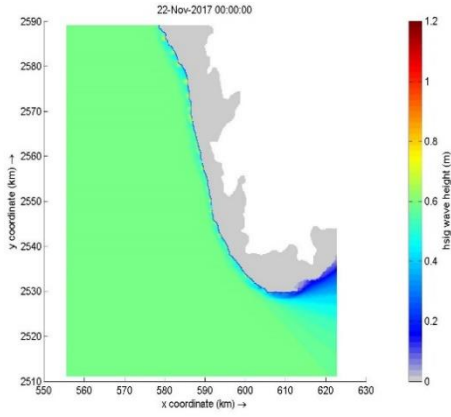


Ilustración 1. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=10s$, Dirección 270° (W)

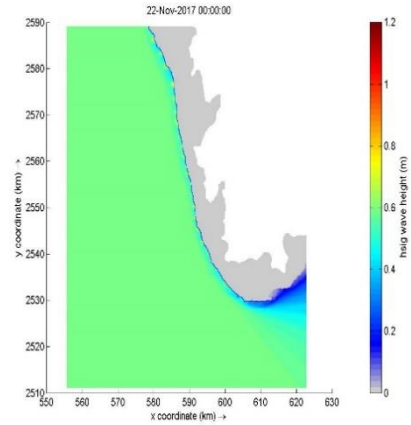


Ilustración 2. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=11s$, Dirección 270° (W)

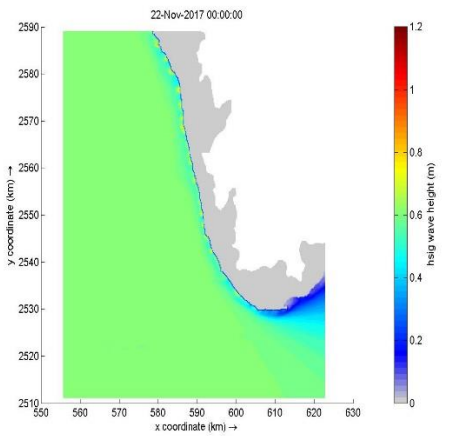


Ilustración 3. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=12s$, Dirección 270° (W)

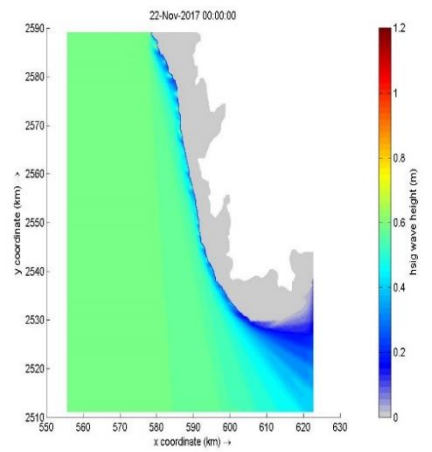


Ilustración 4. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=10s$, Dirección 315° (NW)

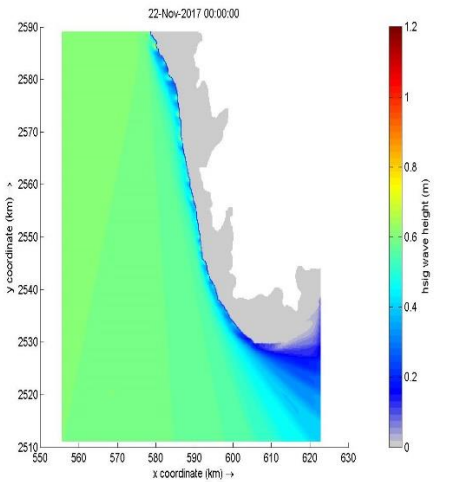


Ilustración 5. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=11s$, Dirección 315° (NW)

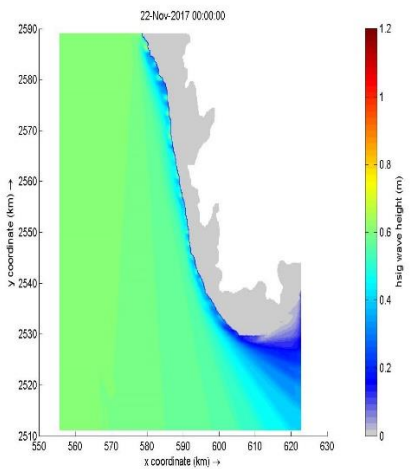


Ilustración 6. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=12s$, Dirección 315° (NW)

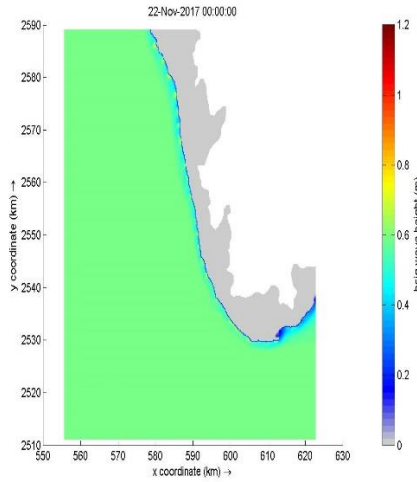


Ilustración 7. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=10s$, Dirección 225° (SW)

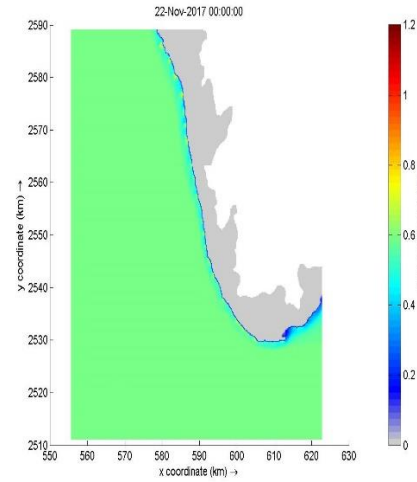


Ilustración 8. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=11s$, Dirección 225° (SW)

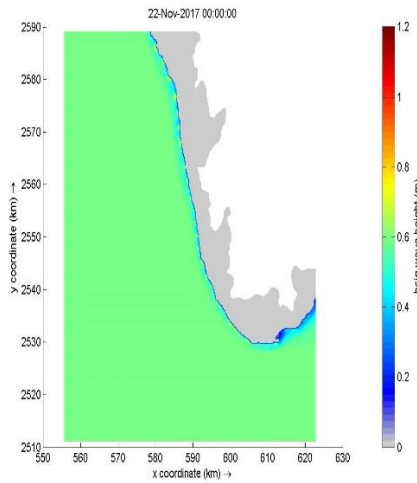


Ilustración 9. Oleaje $H_s=0.6m$, $T_p=12s$, Dirección 225° (SW)

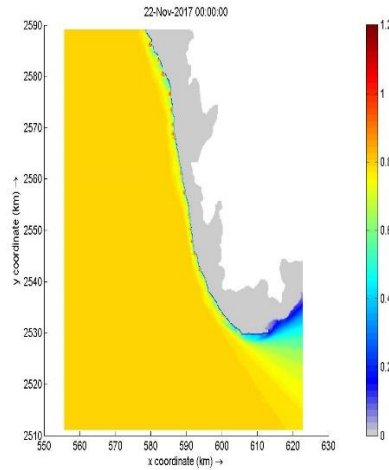


Ilustración 10. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=10s$, Dirección 270° (W)

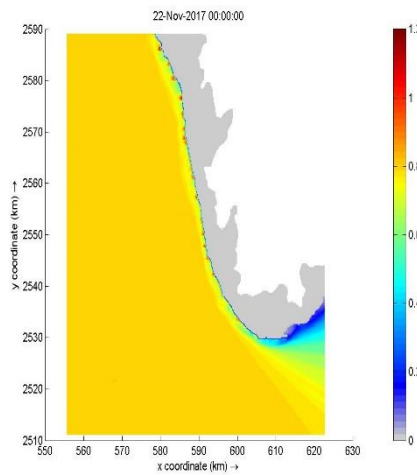


Ilustración 11. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=11s$, Dirección 270° (W)

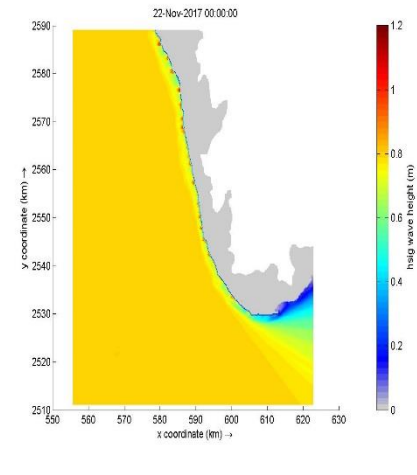


Ilustración 12. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=12s$, Dirección 270° (W)

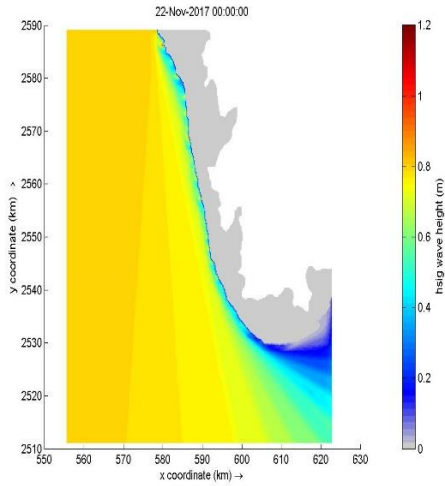


Ilustración 13. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=10s$, Dirección $315^\circ(NW)$

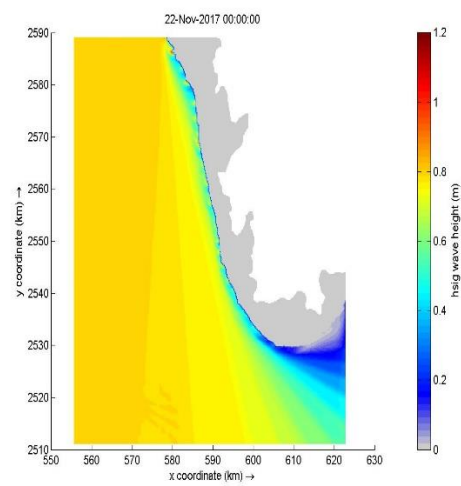


Ilustración 14. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=11s$, Dirección $315^\circ(NW)$

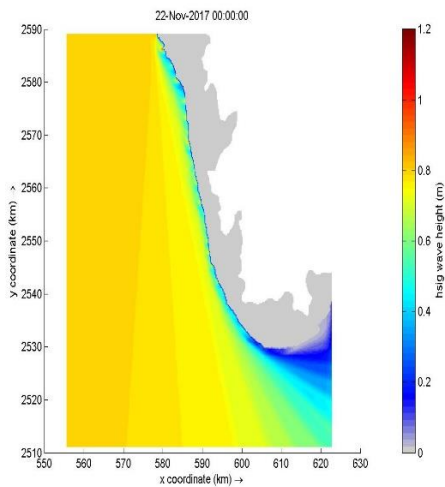


Ilustración 15. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=12s$, Dirección $315^\circ(NW)$

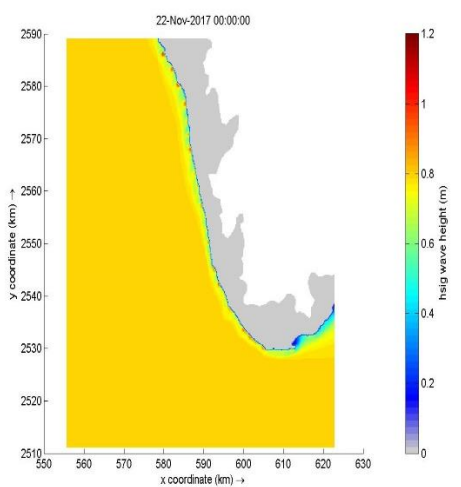


Ilustración 16. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=10s$, Dirección $225^\circ(SW)$

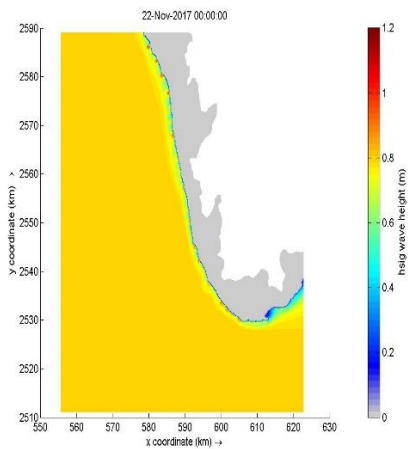


Ilustración 17. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=11s$, Dirección $225^\circ(SW)$

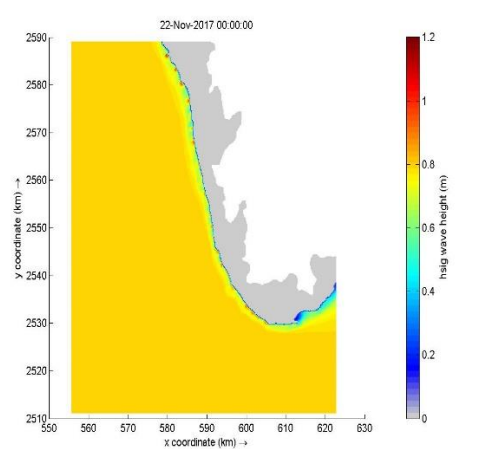


Ilustración 18. Oleaje $H_s=0.8m$, $T_p=12s$, Dirección $225^\circ(SW)$

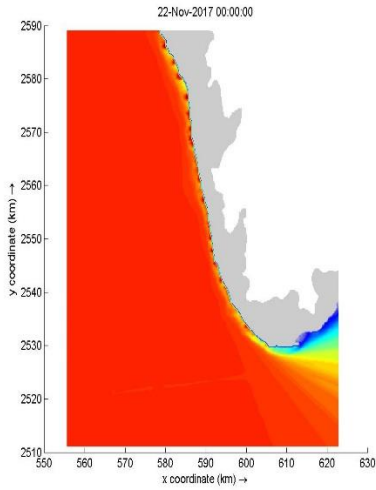


Ilustración 19. Oleaje $H_s=1\text{ m}$, $T_p=10\text{ s}$, Dirección $270^\circ(\text{W})$

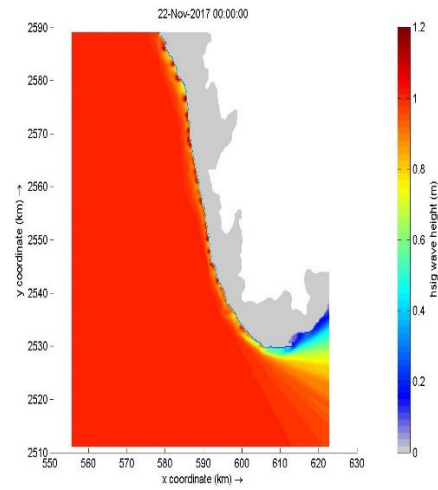


Ilustración 20. Oleaje $H_s=1\text{ m}$, $T_p=11\text{ s}$, Dirección $270^\circ(\text{W})$

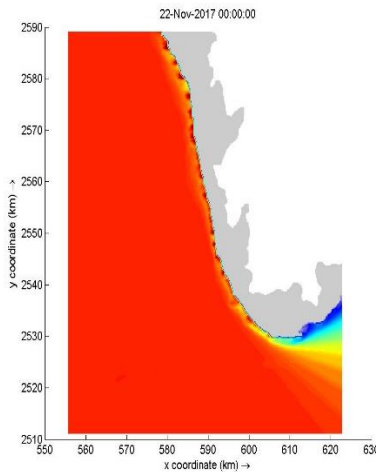


Ilustración 21. Oleaje $H_s=1\text{ m}$, $T_p=12\text{ s}$, Dirección $270^\circ(\text{W})$

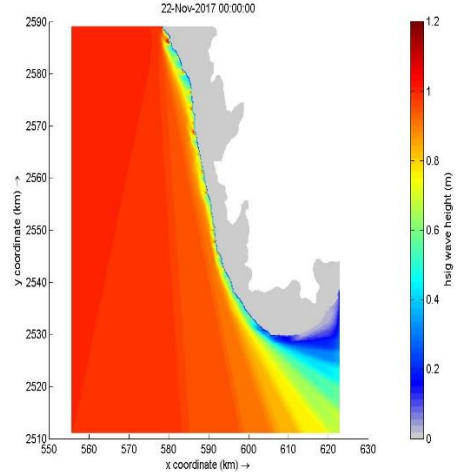


Ilustración 22. Oleaje $H_s=1\text{ m}$, $T_p=10\text{ s}$, Dirección $315^\circ(\text{NW})$

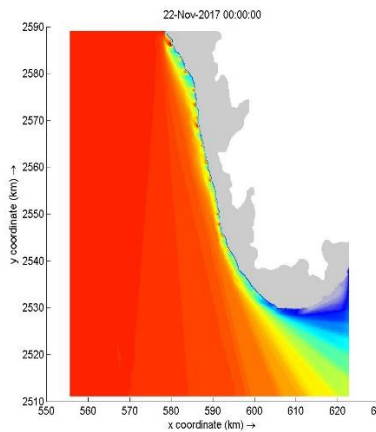


Ilustración 23. Oleaje $H_s=1\text{ m}$, $T_p=11\text{ m}$, Dirección $315^\circ(\text{NW})$

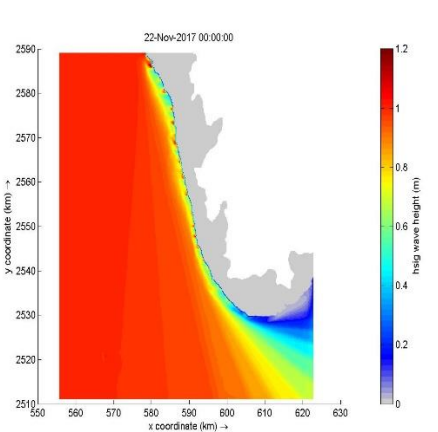


Ilustración 24. Oleaje $H_s=1\text{ m}$, $T_p=12\text{ m}$, Dirección $315^\circ(\text{NW})$

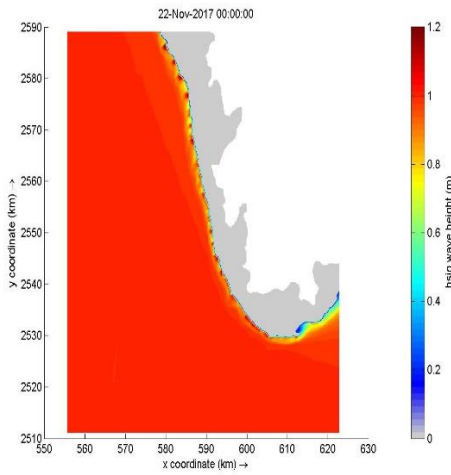


Ilustración 25. Oleaje $H_s=1m, T_p=10s, \text{Dirección } 225^\circ(\text{SW})$

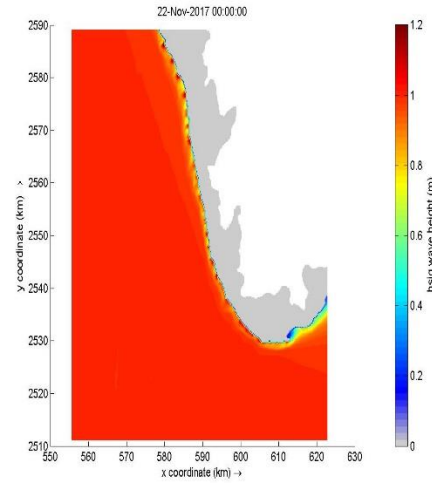


Ilustración 26. Oleaje $H_s=1m, T_p=11s, \text{Dirección } 225^\circ(\text{SW})$

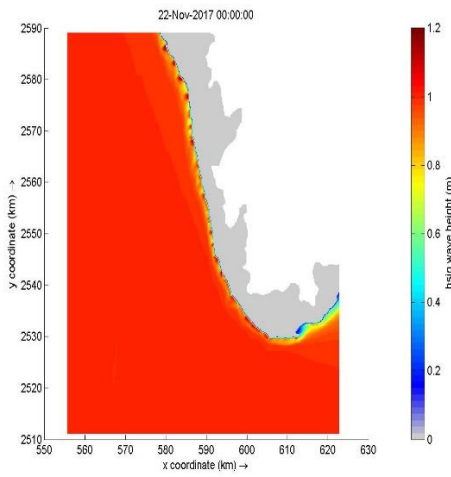


Ilustración 27. Oleaje $H_s=1m, T_p=12s, \text{Dirección } 225^\circ(\text{SW})$

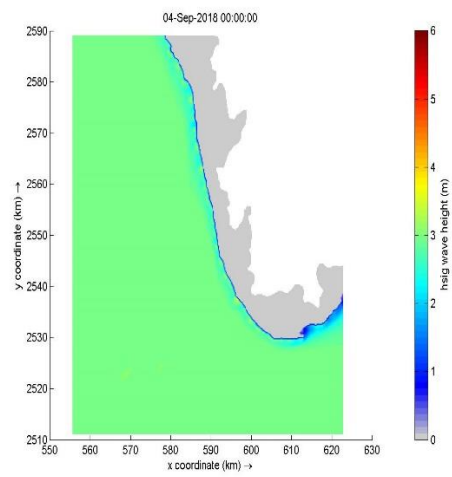


Ilustración 28. Oleaje $H_s=3m, T_p=13s, \text{Dirección } 225^\circ(\text{SW})$

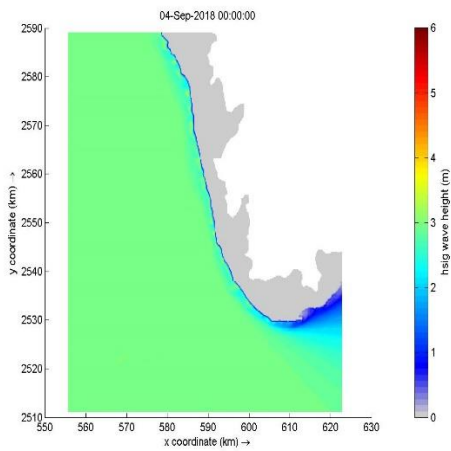


Ilustración 29. Oleaje $H_s=3m, T_p=13s, \text{Dirección } 270^\circ(\text{W})$

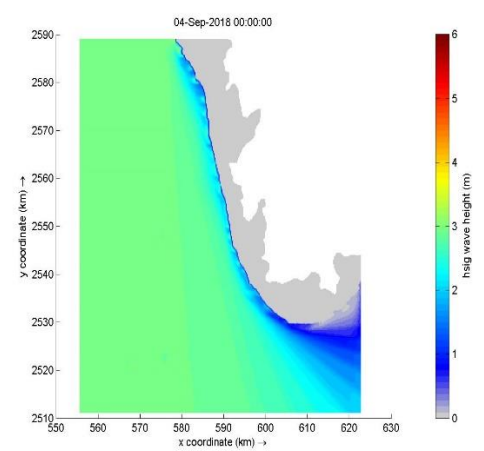


Ilustración 30. Oleaje $H_s=3m, T_p=13s, \text{Dirección } 315^\circ(\text{W})$

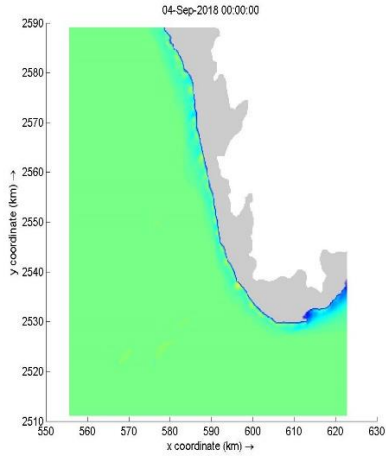


Ilustración 31. Oleaje $H_s=3m, T_p=15s, \text{Dirección } 225^\circ(\text{SW})$

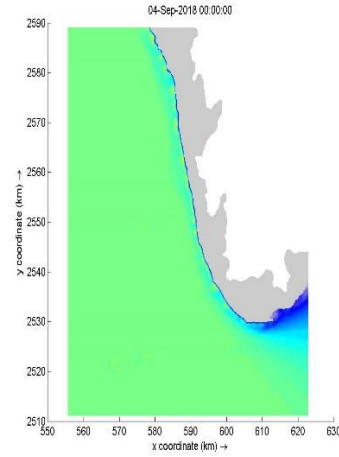


Ilustración 32. Oleaje $H_s=3m, T_p=15s, \text{Dirección } 270^\circ(\text{W})$

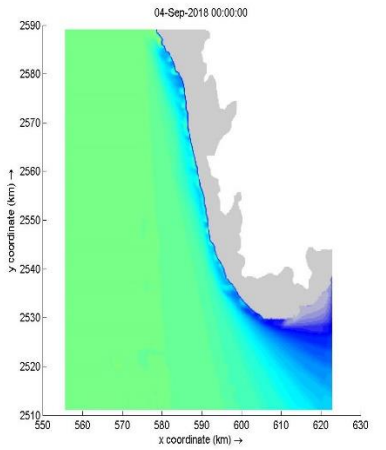


Ilustración 33. Oleaje $H_s=3m, T_p=15s, \text{Dirección } 315^\circ(\text{NW})$

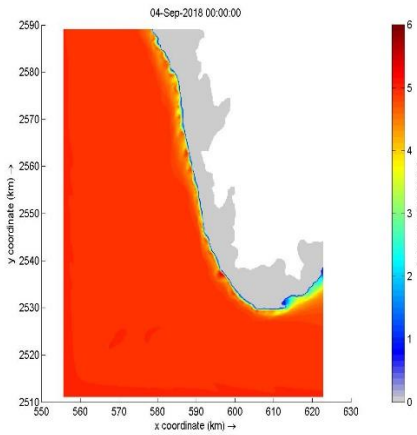


Ilustración 34. Oleaje $H_s=5m, T_p=13s, \text{Dirección } 225^\circ(\text{SW})$

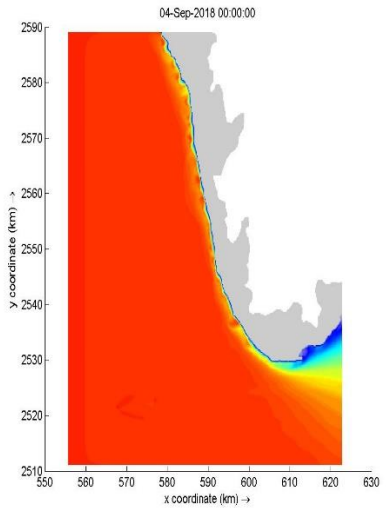


Ilustración 35. Oleaje $H_s=5m, T_p=13s, \text{Dirección } 270^\circ(\text{W})$

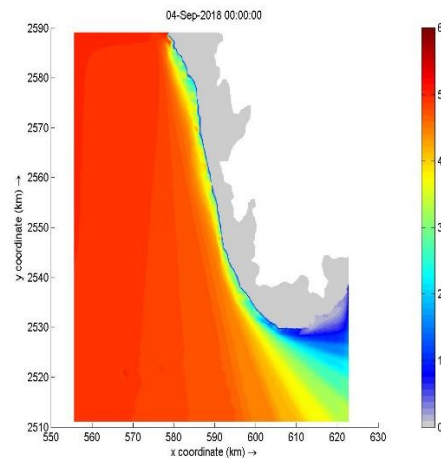


Ilustración 36. Oleaje $H_s=5m, T_p=13s, \text{Dirección } 315^\circ(\text{NW})$

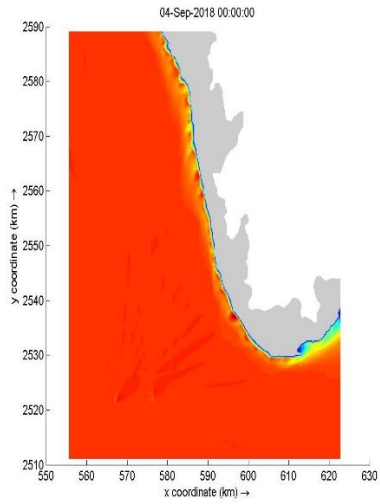


Ilustración 37. Oleaje $H_s=5m$, $T_p=15s$, Dirección 225°(SW)

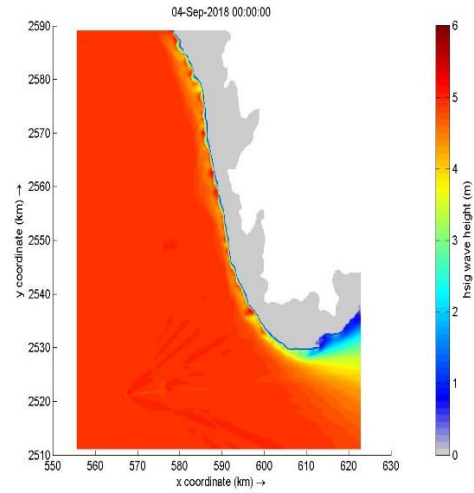


Ilustración 38. Oleaje $H_s=5m$, $T_p=15s$, Dirección 270°(SW)

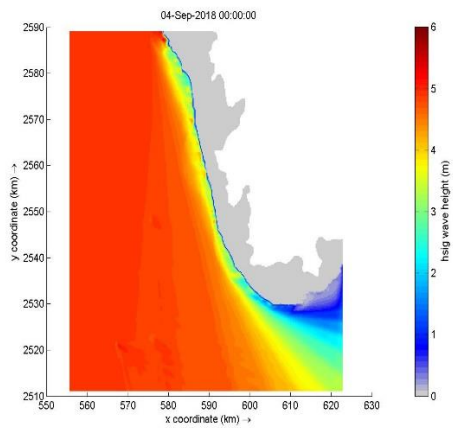


Ilustración 39. Oleaje $H_s=5m$, $T_p=15s$, Dirección 315°(NW)



Anexo 2. Marea

El anexo de los resultados de esta parte es digital

Anexo 3. Marea-Descarga de ríos

El anexo de los resultados de marea – descarga de ríos es digital.