

**ASISTENCIA TÉCNICA PARA LA REDACCIÓN DE ESTUDIO DE DINÁMICA LITORAL PARA EL DISEÑO Y PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL BY-PASS DE ARENA N-S EN EL PUERTO DE GRANADILLA**

**RESUMEN**



## RESUMEN



## RESUMEN

En este documento se presenta un resumen del informe titulado "Asistencia técnica para la redacción de estudio de dinámica litoral para el diseño y proyecto de construcción del by-pass de arena N-S en el Puerto de Granadilla". Este resumen presenta la misma estructura que el documento principal.

El objetivo del estudio llevado a cabo, es tener la información suficiente para dar respuesta a las cuestiones concernientes al transporte sedimentario, planteadas por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife en el pliego de prescripciones técnicas particulares que han de regir en la asistencia técnica, concretamente:

- Volúmenes de arena que en la situación previa y tras la construcción del Puerto entran en la ZEC Seadales del Sur de Tenerife.
- Variación del volumen transportado atendiendo a las distintas condiciones de clima marítimo y estacionales de la zona.
- Zonas de acumulación de sedimentos tras la construcción del Puerto y velocidad con la que se depositan las arenas.

## 1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El puerto de Granadilla, que se ubicará a unos 10 km del núcleo de población del mismo nombre, se encuentra en la comarca Sur-Este de la isla de Tenerife (véase la figura 1).

Las Islas Canarias en general, están muy influenciadas por las altas presiones subtropicales. El predominio y frecuencia de los alisios, con una variación anual muy marcada, determinan el clima y el tiempo en todo el Archipiélago.

La zona de Granadilla en particular, presenta una costa alineada en dirección NE-SW, con una batimetría longitudinalmente discontinua debido a la presencia de numerosos cañones y sumideros submarinos (véase la figura 2).

Como se analizará más adelante, este hecho condicionará fuertemente los resultados obtenidos en el presente trabajo.



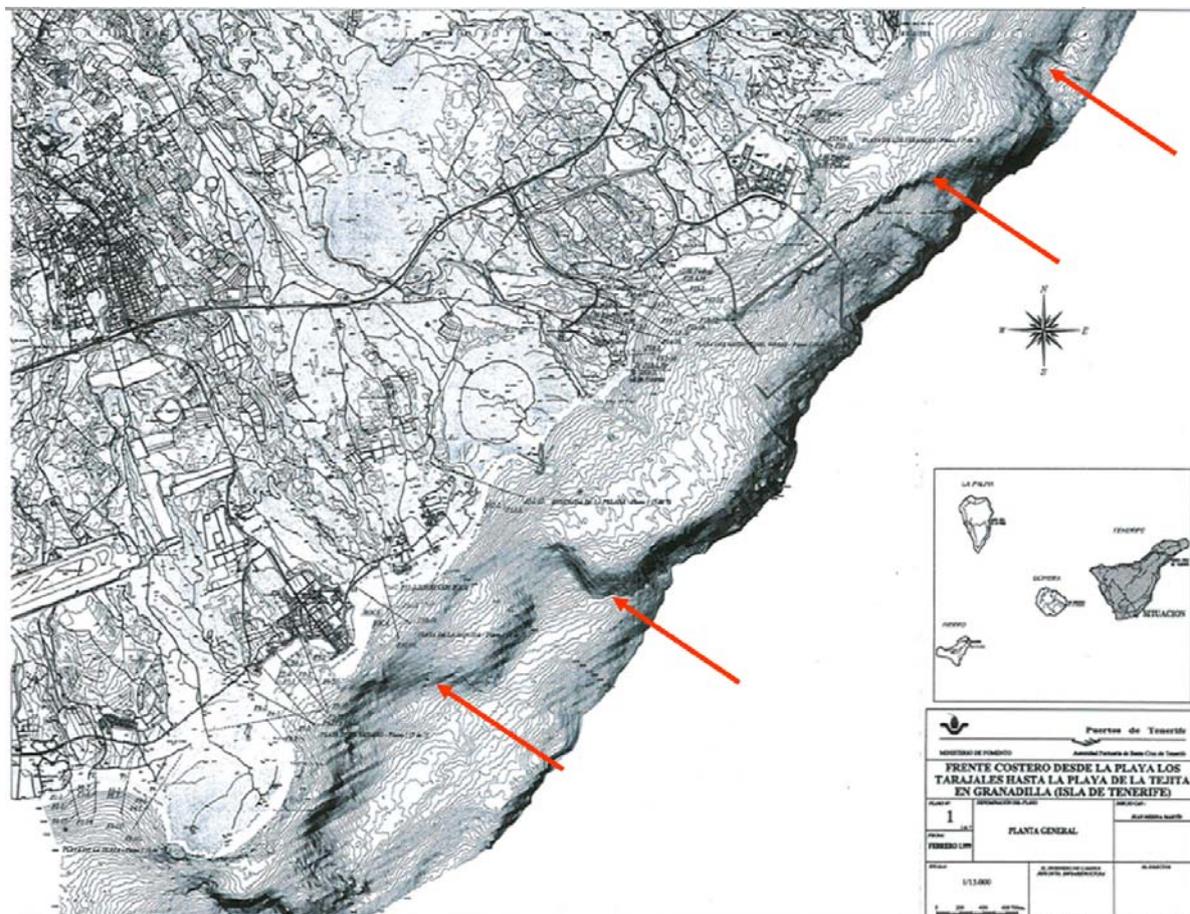


Figura 2. Batimetría en la costa de Granadilla. Las flechas rojas marcan discontinuidades en la batimetría.

## 2. METODOLOGÍA

Para poder responder a las cuestiones planteadas por la Autoridad Portuaria es necesario conocer el clima marítimo, el régimen de corrientes y el transporte potencial en la zona de estudio. Para ello se han implementado, la metodología, los modelos numéricos y las bases de datos, desarrollados por el IH Cantabria. La figura 3 muestra el esquema de la metodología aplicada.

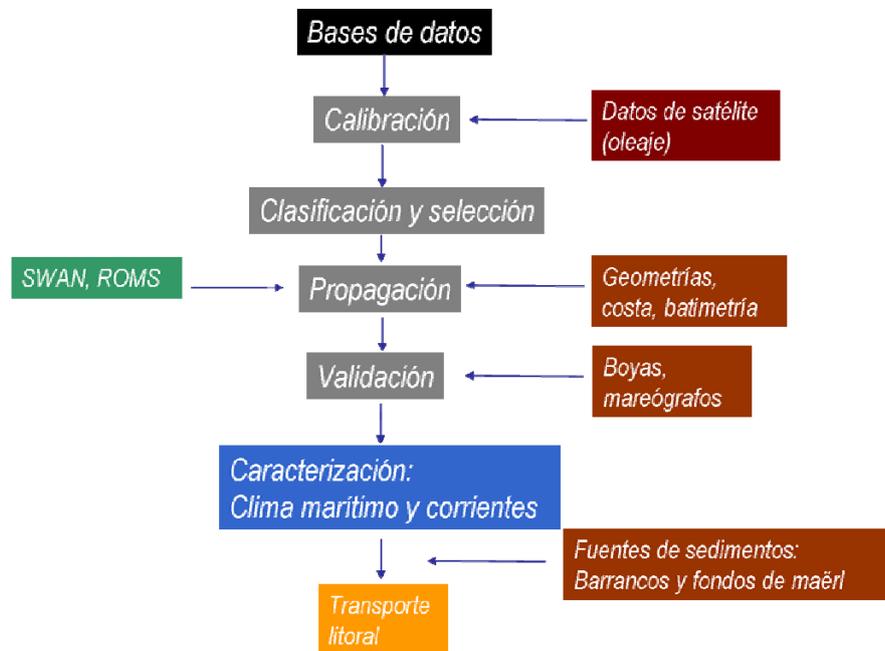


Figura 3. Metodología aplicada en este estudio

En lo referente a las bases de datos de batimetrías, además de batimetrías globales (ETOPO2, GEBCO) y de detalle (Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife), se han utilizado tanto datos instrumentales como numéricos. Los primeros, utilizados para calibrar y validar los resultados numéricos proporcionados por los modelos, provienen de: boyas de medida de oleaje y corriente, mareógrafos y satélites, pertenecientes a distintas instituciones (OPPE, Observatorio Ambiental Granadilla).

Las bases de datos numéricas, han sido utilizadas como condiciones de contorno y forzamientos de las mallas de detalle de oleaje y de corrientes:

Para la realización del estudio de oleaje se han seleccionado los campos de vientos procedentes del reanálisis global NCEP/NCAR. Los campos de vientos a 10 metros de altura seleccionados han sido utilizados como forzamientos para la generación del reanálisis de oleaje. El reanálisis de oleaje utilizado en este trabajo es el GOW 1.0 (Global Ocean Waves 1.0) desarrollado por IH Cantabria. Es un reanálisis horario en el periodo 1948-2008 con cobertura global de  $1^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  y de  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  a lo largo del litoral de España. El forzamiento proviene de la base de datos NCEP/NCAR. En el litoral español los resultados han sido validados con boyas de la red exterior de OPPE.

Para las corrientes, el reanálisis utilizado es el DOT (Downscaled Ocean Tides) desarrollado por IH Cantabria. Es un reanálisis horario de niveles y corrientes de marea astronómica con una resolución horizontal de 1 milla náutica y 30 niveles verticales que

abarca todo el Archipiélago Canario. Estos datos se han utilizado como condiciones de contorno para obtener las corrientes en la zona de estudio. Para tener en cuenta también las corrientes debidas a la marea meteorológica (viento y presión), se ha introducido como forzamiento el reanálisis atmosférico de Seawind-Interim (~15 km de resolución horizontal). Los resultados han sido validados con el mareógrafo y la boya de Granadilla (OPPE y OAG, respectivamente).

Una vez recopiladas/generadas todas las bases de datos necesarias, la metodología empleada se basa en la utilización de técnicas estadísticas avanzadas de clasificación y selección (análisis de componentes principales (EOFs), algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss), funciones de base radial (*radial basis functions*)) junto con modelos numéricos del estado del arte (SWAN, ROMS) para obtener el clima marítimo y las corrientes a la escala requerida por este estudio.

En concreto, para obtener las características del oleaje se ha utilizado un modelo de propagación energético (SWAN), aproximando el oleaje hasta la zona de estudio mediante una malla general (G01) del orden de 1 Km de resolución, anidada a su vez a una malla de mayor resolución para zonas cercanas a la costa (M01) de unos 25 m de resolución horizontal (véase la figura 4).

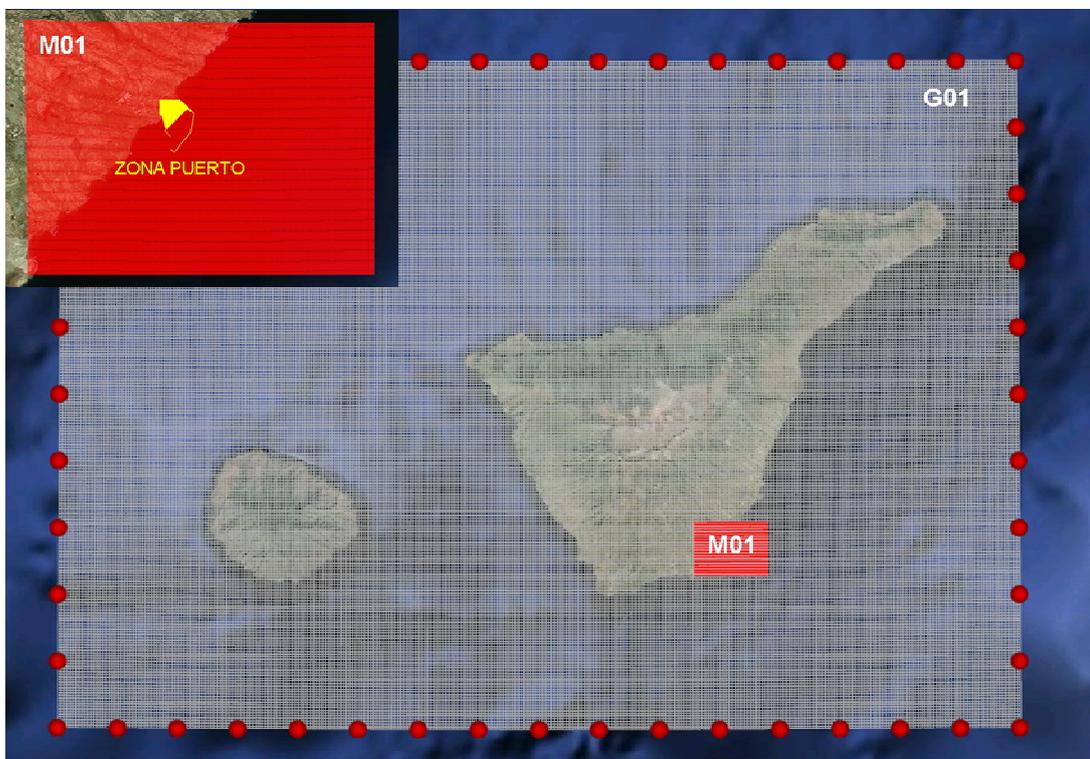


Figura 4. Mallas SWAN utilizadas para la transferencia del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa.

Para caracterizar las corrientes generadas por las dinámicas relevantes en la zona de estudio: marea astronómica y marea meteorológica (viento y presión), se ha utilizado una malla con una resolución horizontal igual a 200 metros y con 10 capas verticales, anidada al reanálisis DOT (véase la figura 5). El modelo hidrodinámico utilizado para resolver las corrientes en la malla de detalle, es el modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) desarrollado por el Ocean Modeling Group de Rutgers (<http://www.myroms.org>).

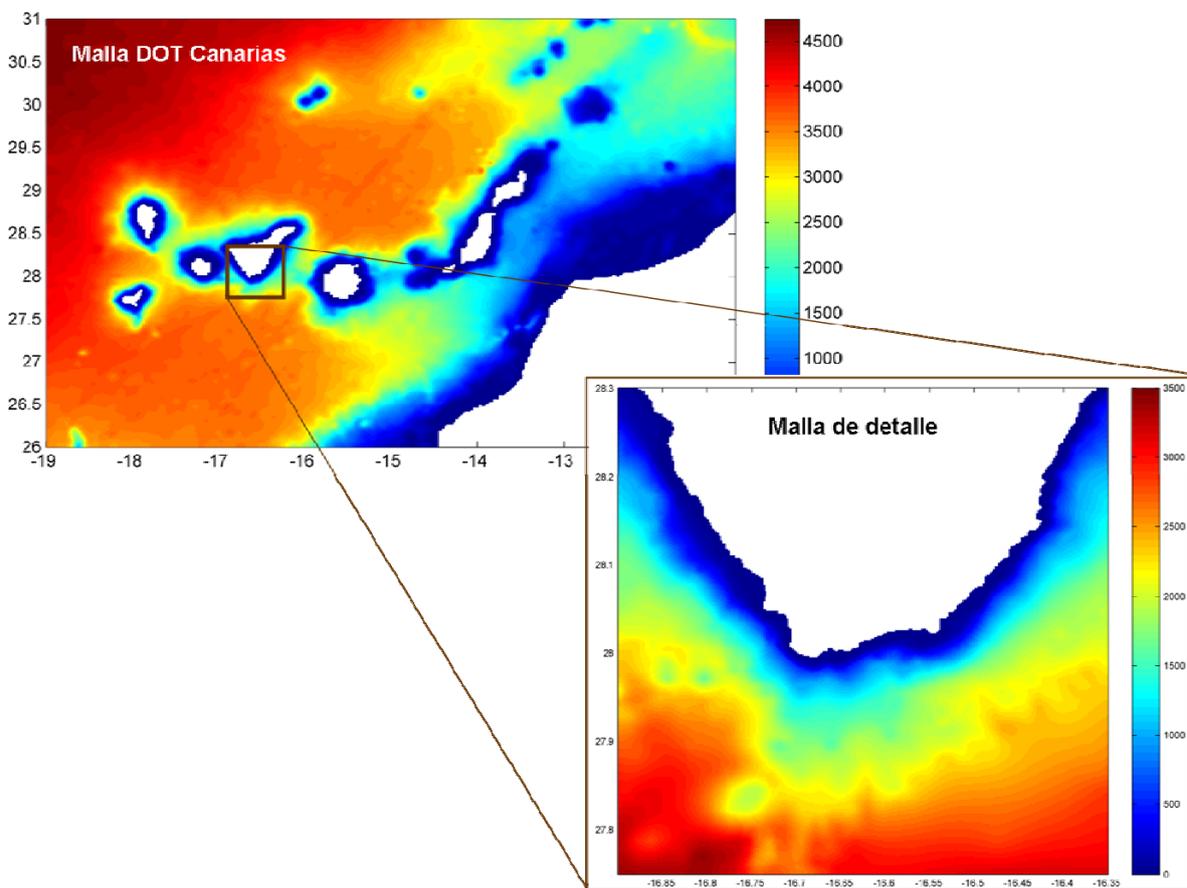


Figura 5. Anidamiento de mallas para calcular corrientes en la zona de estudio

Una vez obtenido el clima marítimo y las corrientes en la zona de estudio, se ha estimado el efecto que producirá el nuevo puerto en estas variables, así como en el transporte litoral, tanto potencial como real.

Para la estimación del transporte potencial se ha utilizado la formulación de Soulsby - van Rijn (Soulsby, 1997) que tiene en cuenta tanto el oleaje como las corrientes. Aplicando esta formulación a los resultados de oleaje y de corrientes se obtiene un transporte potencial, por metro lineal ( $m^3/s/m$ ), que contiene la componente de transporte por fondo y la componente de transporte en suspensión.

Para el cálculo del transporte real de sedimentos se ha estimado el aporte de material de los barrancos y de los fondos de maërl. El primer paso para la estimación de los aportes de sedimentos procedentes de los barrancos, es la identificación de las cuencas de aportación (véase figura 6). Una vez definidas las cuencas, a partir de la mineralogía presente en la zona y de los datos de precipitación, se ha calculado la tasa de erosión del suelo mediante la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) y, a partir de ella, la aportación de material de los barrancos. Para la estimación de los aportes de los fondos de maërl, se ha estimado la tasa fijación media anual de  $CaCO_3$  de las poblaciones de *L. corallioides* así como las dimensiones de la zona que ocupa el maërl, utilizando la cartografía bionómica disponible.

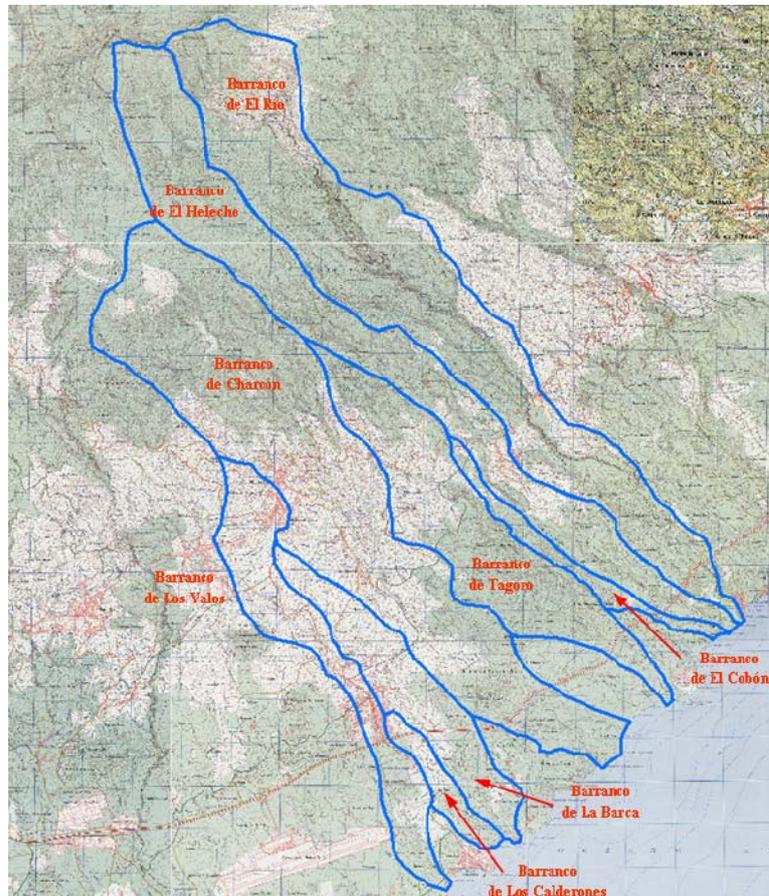


Figura 6. Cuencas de los Barrancos

### 3. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos, tanto para la situación actual como para la situación con puerto, en cuanto a:

1. Variación del clima marítimo.
2. Variación del régimen de corrientes.
3. Variación en el transporte potencial.
4. Variación en el transporte real (teniendo en cuenta los aportes y las pérdidas de sedimento).

1. En lo relativo al **oleaje**, para calcular la variación respecto de la situación actual, se han calculado los campos de oleajes medios de los 61 años en la zona de estudio, para la situación actual y la situación con puerto. Posteriormente se ha obtenido la diferencia relativa, en cada posición, de la media de esta alternativa respecto a la media de la alternativa de no actuación. En la

figura 7 se representan estas diferencias relativas en %. Se observa, que frente a los diques exteriores expuestos a los oleajes de NE el aumento del oleaje (colores amarillos y rojos) llega hasta el 25 % y va disminuyendo a medida que nos alejamos de estas estructuras. La distancia medida en la zona en la que el aumento del oleaje varía entre 5% y 25% es de 6 Km. El efecto suave que se aprecia en el dique exterior (dique S) es debido a que los oleajes de sur son muy poco probables. El área azul representa zonas donde se produce disminución del oleaje por efecto del abrigo de los dique. De hecho, en el interior de las dársenas la reducción es muy superior al 80% pues se obtienen oleajes medios inferiores a los 10 cm. Esta zona de disminución del oleaje se extiende hacia el SW, siendo su efecto especialmente intenso (>20%) hasta Punta Pelada. La gran extensión que alcanza la zona donde disminuye la  $H_s$  es debido al elevado ángulo de incidencia del oleaje medio respecto a la normal a la costa que alcanza valores cercanos a los 90°.

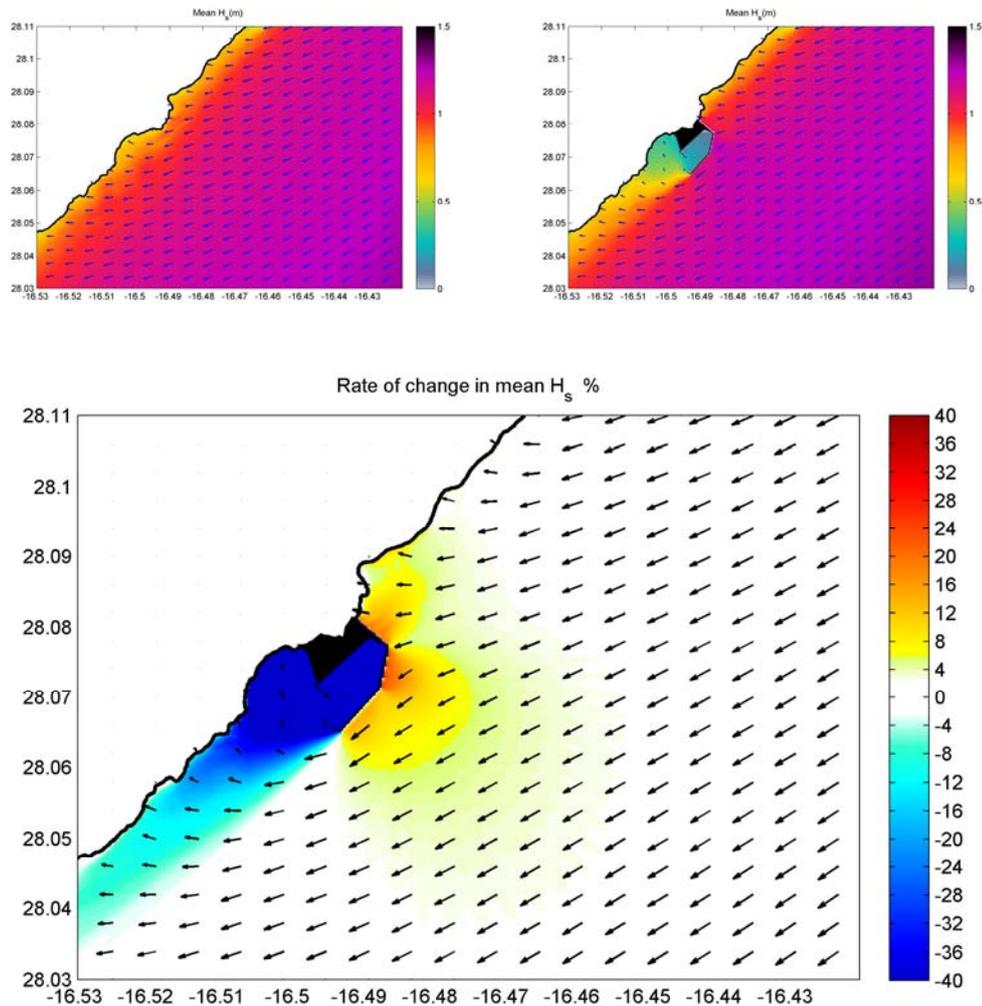


Figura 7.  $H_s$  media anual en la situación con y sin puerto (paneles superiores). Diferencia media anual en % (panel inferior).

2. En relación a las **corrientes**, se han evaluado las corrientes máximas diarias puesto que serán las que determinen el transporte de sedimentos. En la figura 8 se muestra la media anual de la corriente máxima diaria para las dos situaciones. A simple vista, ambos escenarios son muy similares, con zonas de mayor corriente en el entorno de Montaña Roja y Punta de Abona (en torno a 40 cm/s) y zonas de corriente en torno a 15 – 25 cm/s en la franja costera comprendida entre ambos salientes. Se observa en ambos casos, una corriente residual en dirección SW. En la figura 9 se muestra la diferencia entre ambas situaciones. Los tonos azules (valores negativos) muestran las zonas donde la velocidad de la corriente disminuirá al construir el puerto. Por el contrario, el color rojo

representa zonas donde se producirá un aumento de la corriente. Los resultados muestran un aumento máximo de aproximadamente 1 cm/s y una disminución máxima de 20 cm/s. Se observa que, como es lógico, las zonas donde las variaciones son más acusadas son las del entorno de la nueva dársena. La zona donde las corrientes disminuyen (azul) es mucho más extensa que la zona de aumento de corrientes (roja). La influencia del puerto llega, por el Suroeste, hasta Montaña Roja y por el Noreste, hasta Barranco del Río. La zona donde se prevé que aumenten las corrientes está localizada en el exterior del dique del nuevo puerto. Así mismo, se marca la línea de contorno para diferencias de velocidad inferiores a 1 cm/s ya que este es el orden de magnitud del error del modelo numérico de corrientes.

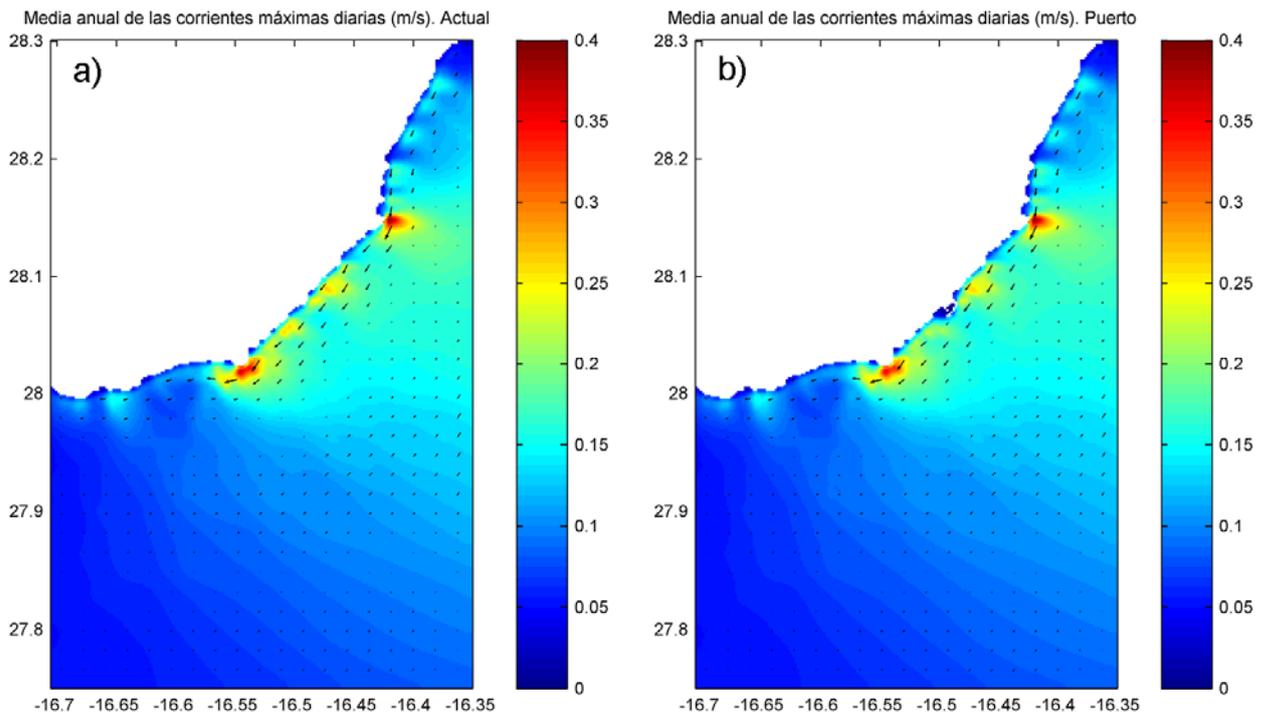


Figura 8. Media anual de la corriente máxima diaria. a) Situación actual; b) Situación con puerto.

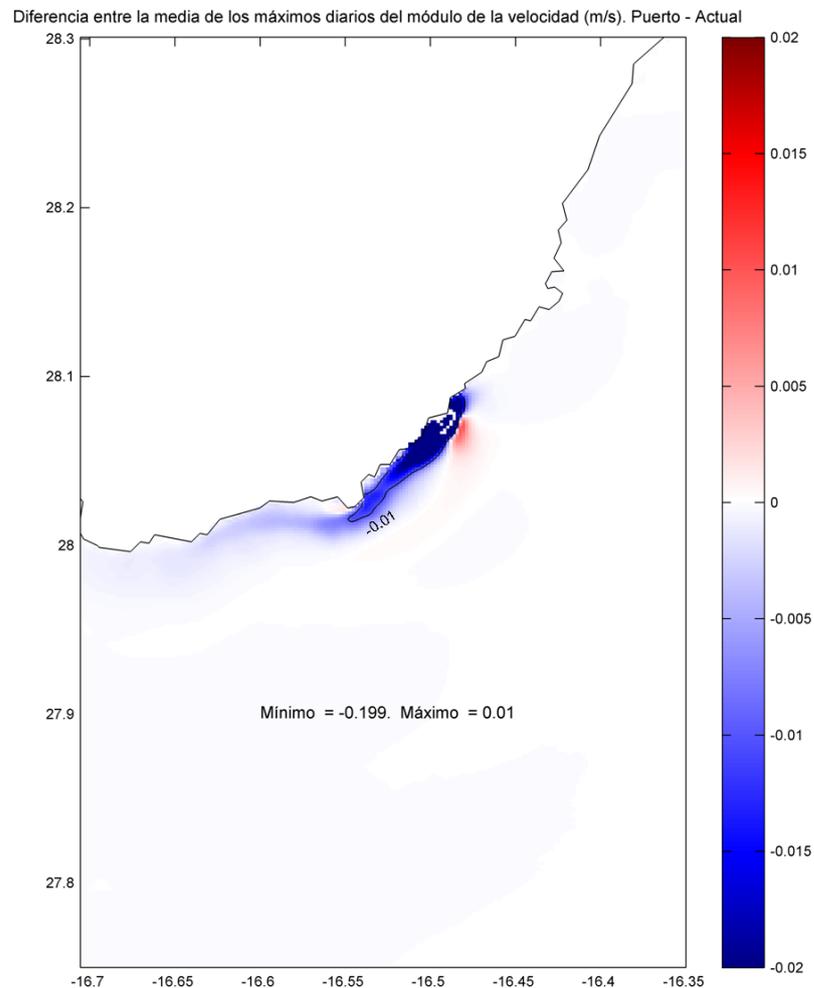


Figura 9. Diferencia entre la media anual de la corriente máxima diaria en la zona de estudio. Malla de detalle. Situación con puerto - Situación actual

3. Los resultados del estudio del **transporte potencial de sedimentos** reflejan una reducción considerable del transporte potencial aguas abajo del puerto, debido a la disminución del oleaje y la corriente (véase figura 10). Por otro lado, aguas arriba del puerto se observa un incremento del transporte potencial con respecto a la situación actual, debido al aumento en la altura de ola producido por la reflexión del dique del nuevo puerto. Al igual que para la corriente, se observa una dirección media del transporte potencial hacia el SW. En la figura 11 se observa como la disminución máxima del transporte medio anual es de  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  que son unos  $1500 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$ . La distribución espacial de esa disminución se representa en color azul. En cuanto a la zona en la que se produce aumento de la tasa media anual de transporte, se encuentra localizada al NE del puerto y alcanza valores máximos de  $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ( $300 \text{ m}^3/\text{año}/\text{m}$ ).

Estos cambios en el transporte sedimentario, están asociados a la disminución de corriente que produce el puerto en la zona abrigada por éste y al aumento de oleaje producido por la reflexión del dique. Los primeros (disminución de corriente), se traducen en una zona de disminución del transporte potencial respecto de la situación actual (zona azul) y por tanto en una zona de potencial sedimentación. Por otro lado, la zona de aumento de transporte potencial (zona roja) asociada al aumento del oleaje debido a la reflexión del dique, es una zona de potencial erosión.

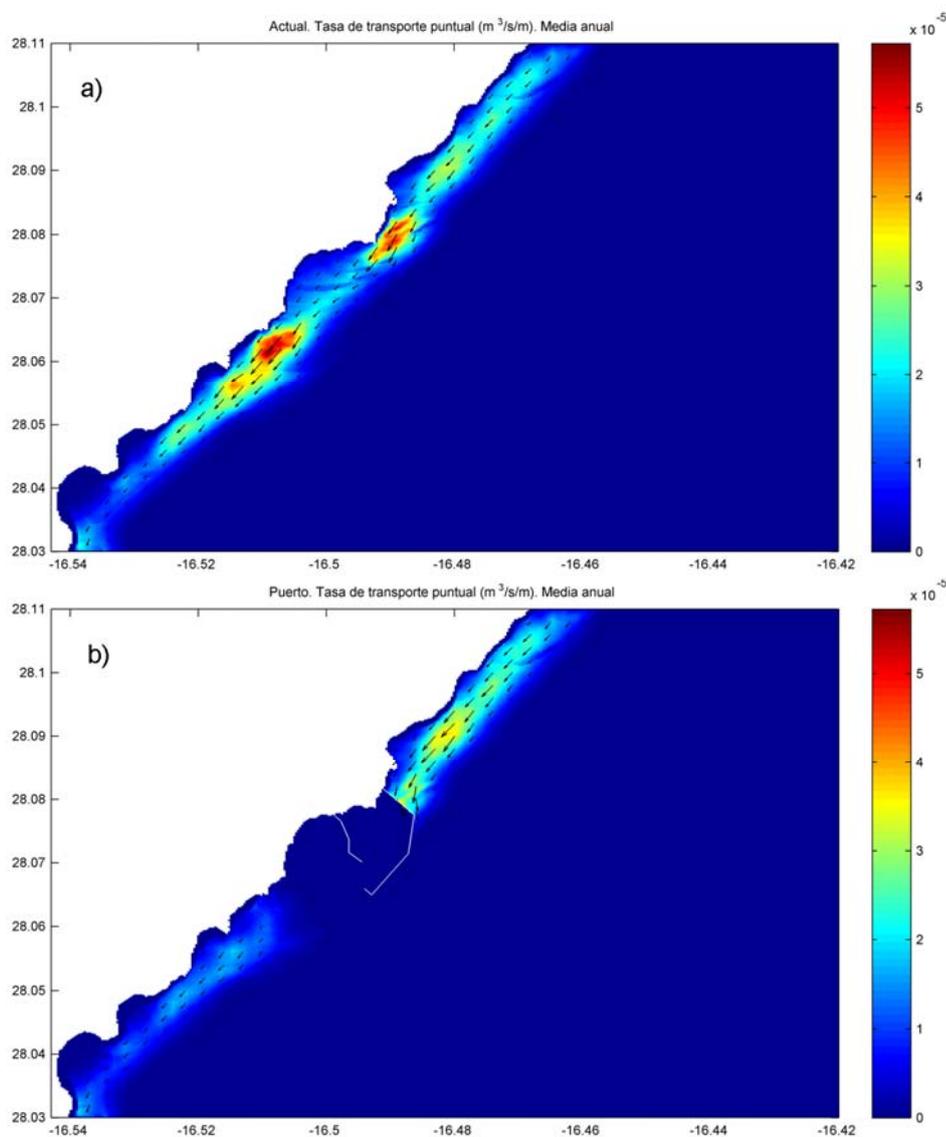


Figura 10. Media anual de la tasa de transporte media diaria ( $m^3/s/m$ ). a) Situación actual; b) Situación con puerto.

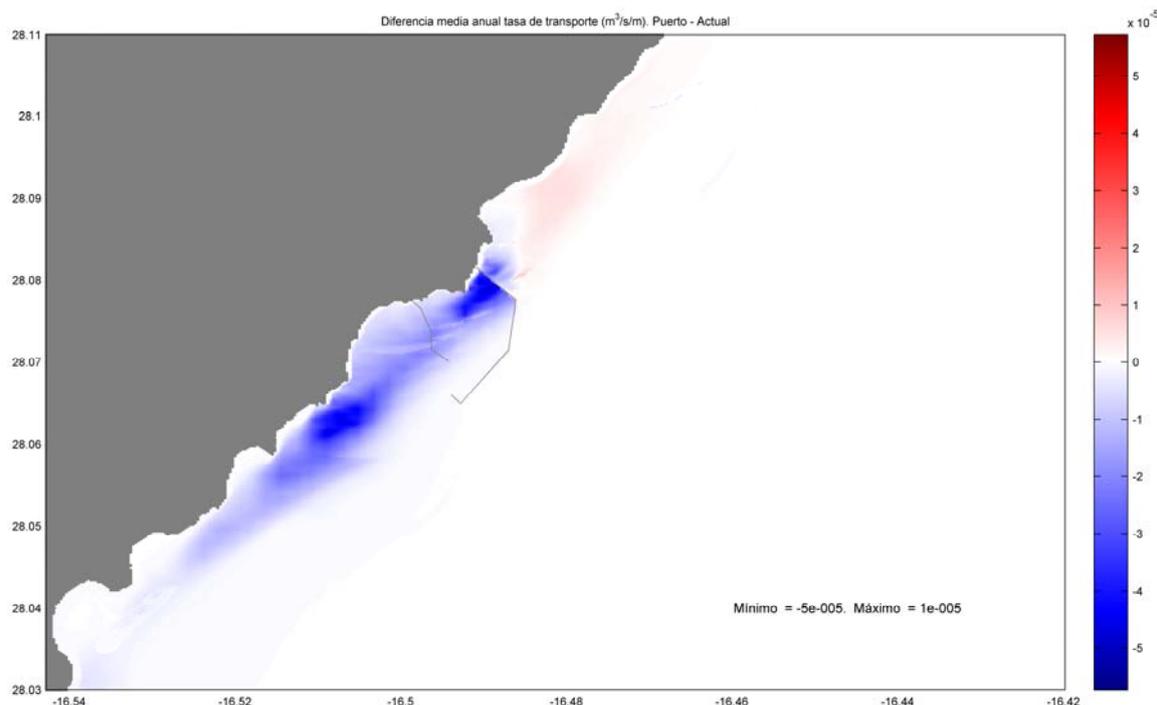


Figura 11. Diferencia entre la tasa media anual de transporte potencial en la zona de estudio. Malla de detalle. Situación con puerto - Situación actual.

Los resultados obtenidos están en concordancia con las evidencias geomorfológicas presentes en la zona. En la figura 12 se observa como, las zonas con alta tasa de transporte (zona de Punta del Camello y zona de Playa del Trigo) se corresponden con fondos rocosos. Esto efectivamente, apoya los resultados obtenidos con el modelo numérico, ya que al ser zonas con tasas de transporte elevadas, no existe arena susceptible de ser transportada.

Así mismo, en la figura 13 se muestra como en el área con alta tasa de transporte (zona de Punta del Camello) no hay presencia de sebadales. Esto también apoya los resultados obtenidos con el modelo numérico, ya que sólo se encuentran sebadales en zonas donde el modelo concluye que las condiciones energéticas son de menor intensidad. De la misma manera, la forma alargada del área ocupada por maërl - *Sargassum*, corroboraría que las corrientes más importantes en la zona son las de la marea astronómica, y por tanto, a partir de la zona donde se concentra el maërl, se produce una redistribución del mismo siguiendo la dirección de las corrientes de marea (hacia el NE en marea llenante y hacia el SW en marea vaciante), para dar lugar a la forma final alargada del área ocupada por maërl - *Sargassum*.

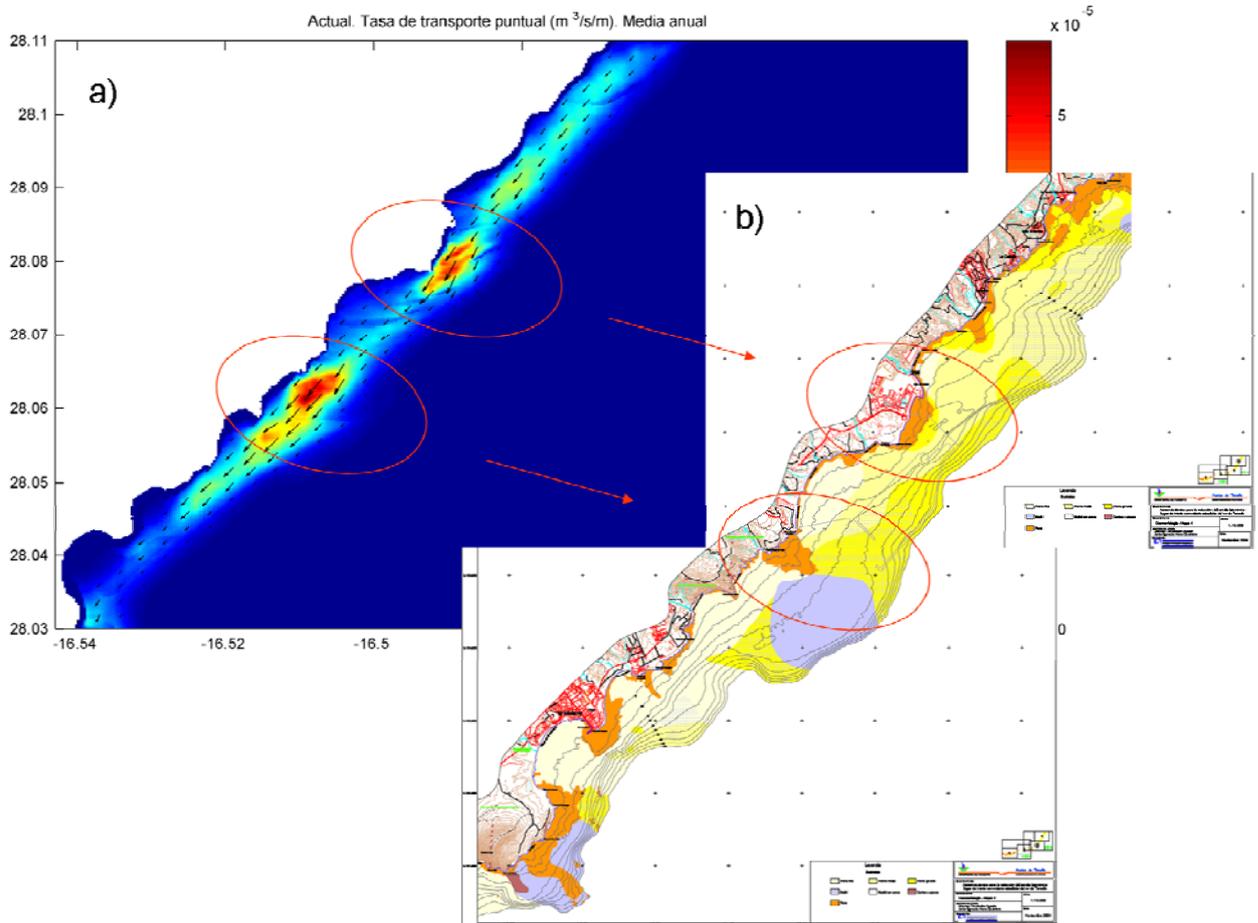


Figura 12. Relación entre la tasa de transporte puntual (a) y la geomorfología de los fondos (b). (Fuente: Asistencia Técnica para la redacción del estudio bionómico lugar de interés comunitario Sebadales del Sur de Tenerife. CIS. Noviembre 2004)

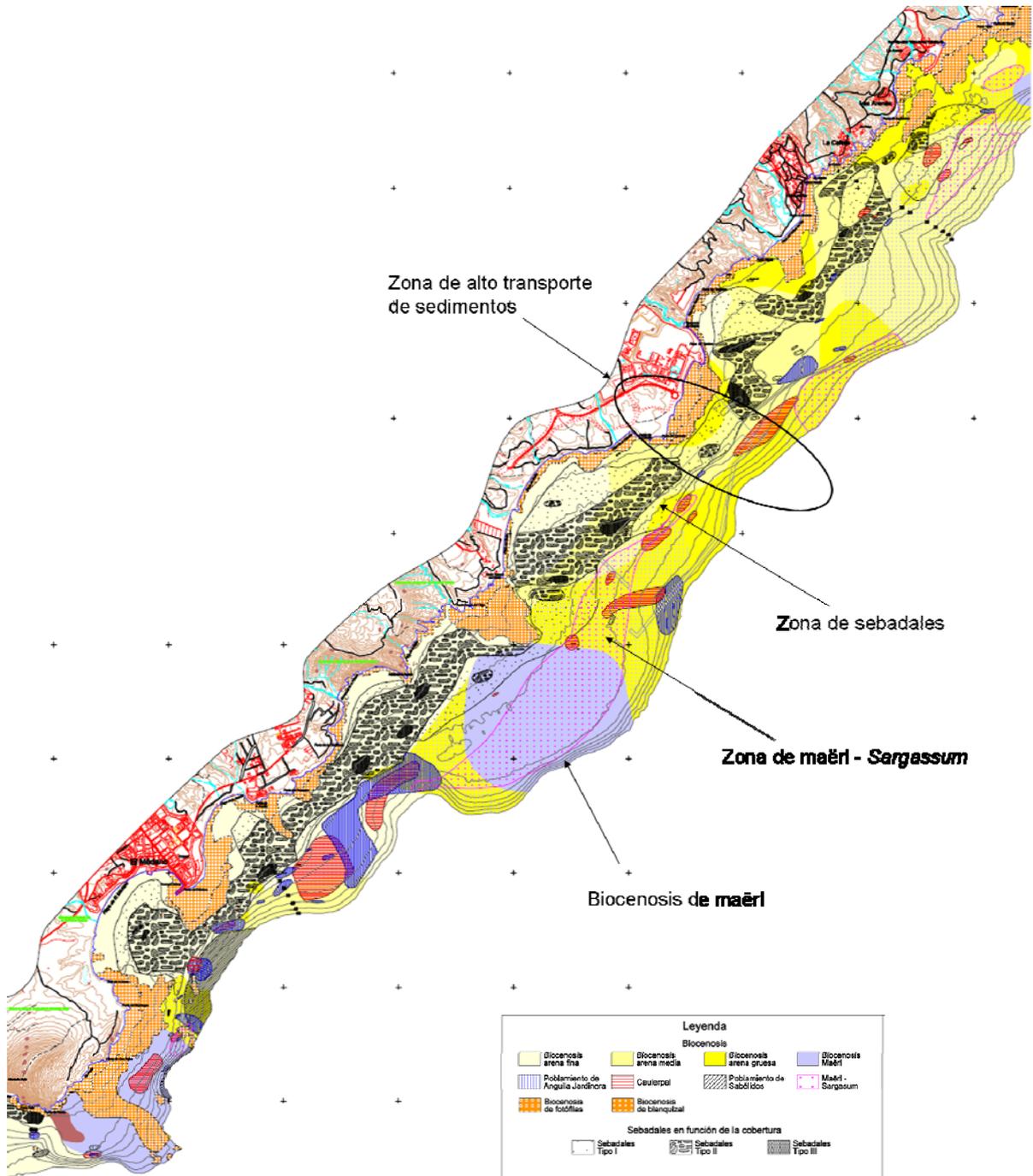


Figura 13. Biocenosis general. (fuente: Asistencia Técnica para la redacción del estudio bionómico lugar de interés comunitario Sebedales del Sur de Tenerife. CIS. Noviembre 2004)

4. Una vez obtenido el transporte potencial, para estimar el **transporte real**, es necesario cuantificar la disponibilidad de sedimento en la zona de estudio. Para ello, se ha propuesto un modelo conceptual con el fin de explicar el funcionamiento del sistema sedimentario.

En la figura 14, que presenta la batimetría de la zona de estudio, se han marcado con elipses azules las tres zonas (veril de La Jaca, sumidero de El Médano y sumidero de La Pelada) donde la batimetría presenta gran pendiente muy cerca de la costa. Esta configuración es determinante para el funcionamiento del transporte litoral ya que actúan como sumideros para el flujo de sedimento longitudinal existente en este tramo de costa, haciendo que se pueda plantear un modelo conceptual basado en células con muy poco o inexistente intercambio de sedimento entre ellas. De hecho, dada la configuración del veril de la Jaca, se puede considerar despreciable el flujo de sedimento que pueda pasar de las zonas al norte de La Jaca.

En la figura 15 se presenta el modelo conceptual propuesto, donde se incluyen las fuentes y los sumideros de sedimento en la zona de estudio (desde Punta de los Gomerros, después del veril de la Jaca, hasta punta de El Médano, en el sumidero de El Médano). Este tramo de costa recibe aportes de sedimentos de origen volcánico de los barrancos y de origen biológico (bioclastos) de los fondos de maërl. La flecha azul indica el transporte longitudinal del sedimento que existe en este tramo de costa, que considerando que el veril de la Jaca actúa como una barrera, provendrá del aporte de los barrancos (barrancos de El Río y de El Helecho) y del maërl. Las flechas rojas indican la pérdida de sedimento en los sumideros de El Médano y La Pelada, aguas abajo del puerto.

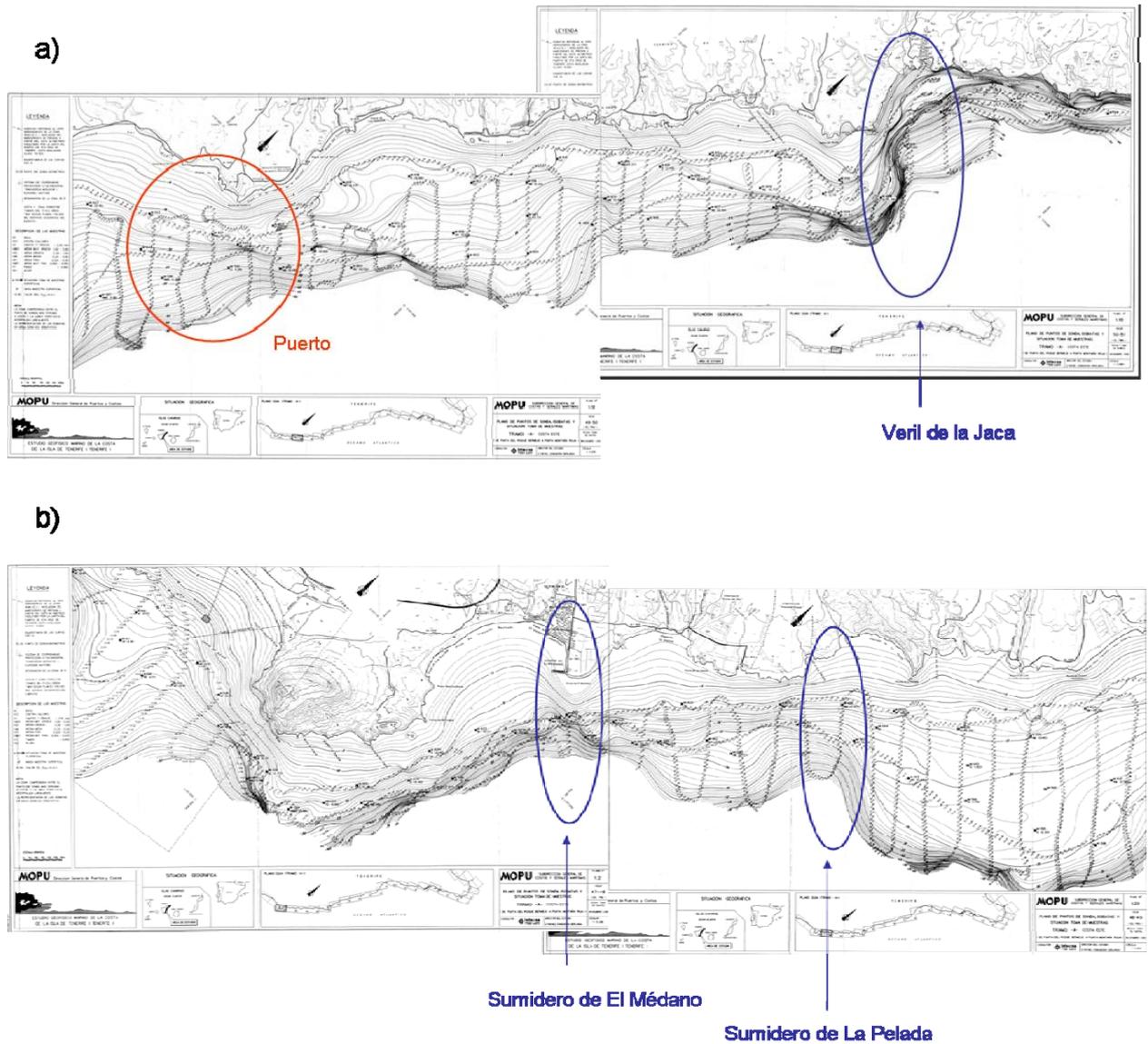


Figura 14. Batimetría de la zona de estudio (Fuente: "Estudio geofísico marino de la costa de la isla de Tenerife (Tenerife)", MOPU (1990)). a) zona aguas arriba del futuro puerto; b) zona aguas abajo.

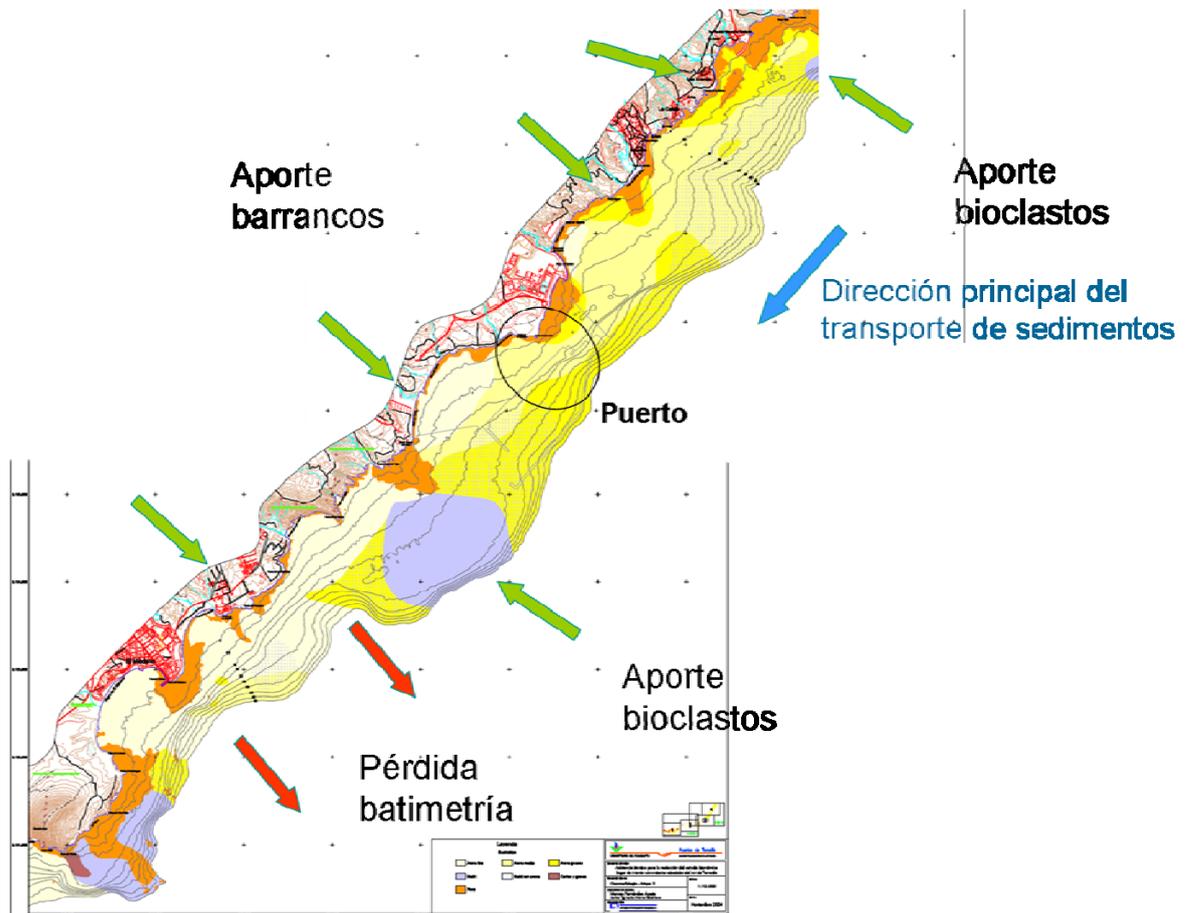


Figura 15. Modelo conceptual sedimentario

Con base en este modelo de funcionamiento, se ha llevado a cabo una estimación del transporte real en la zona de influencia del puerto, tanto aguas arriba como aguas abajo del mismo. Para ello se hará uso de los datos de aporte de sedimentos de los barrancos de El Río y de El Helecho (al NE del puerto) y de Charcón y Tagoro (al SW del puerto), así como de los datos del aporte del maërl.

En el apartado 3.6.1 del documento principal se ha estimado el aporte de arena de los barrancos de El Río y El Helecho en unos 1000-3000 m<sup>3</sup>/año , y en unos 2500-7800 para los barrancos de Charcón y Tagoro. De la misma forma, en el apartado 3.6.2 se ha calculado el aporte sedimentario de los fondos de maërl. Este valor asciende a unos 1000-2000 m<sup>3</sup>/año para cada una de las dos zonas de rodolitos.

Del vertido total de los barrancos situados al NE del puerto, sólo el sedimento contenido entre la línea de costa y la batimétrica de -10 m será el material con capacidad de ser transportado aguas abajo del puerto. Se ha calculado que este flujo de sedimentos, que será interceptado por el nuevo puerto, es de aproximadamente 400-1200 m<sup>3</sup>/año. En la figura 16 se muestra un esquema del transporte de sedimentos procedente de los barrancos.

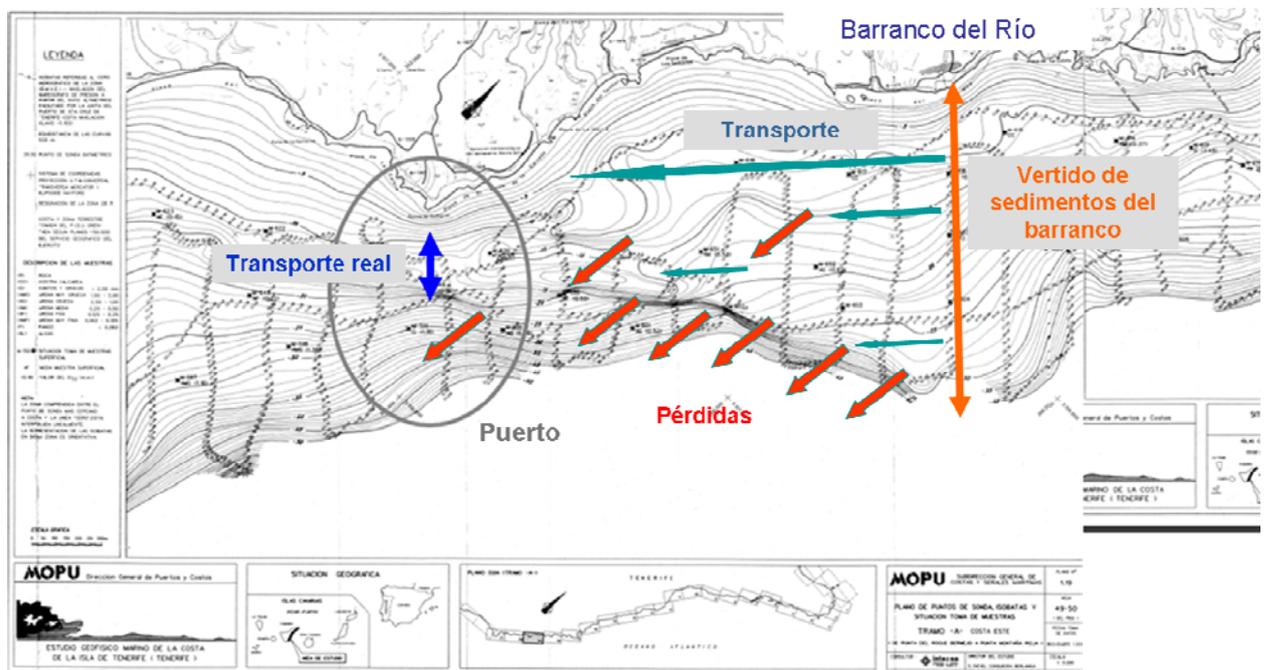


Figura 16. Esquema del vertido y transporte del sedimento procedente de los barrancos

Del vertido total de los barrancos situados al SW del puerto se ha considerado que, debido a su proximidad a la ZEC y a la ausencia de discontinuidades en la batimetría, todo el material es susceptible de ser transportado al interior de la misma.

Con respecto al transporte real derivado del aporte de los fondos de maërl, para el material situado aguas arriba, cabría esperar que la proporción de sedimento capaz de llegar a la zona sea inferior que en el caso del sedimento procedente de los barrancos, puesto que al estar a mayor distancia, este material tendrá que salvar más obstáculos batimétricos (sumidero de El Río y veril de Los Tarajales) que aquel procedente de los barrancos. Por tanto, asumiendo que la proporción de sedimento máxima que llegará a la zona es la misma que en el caso de los barrancos (40%), el sedimento procedente de los fondos de maërl que se verá retenido por la presencia del puerto oscila entre 400-800 m<sup>3</sup>/año.

Para estimar el transporte real derivado del aporte de los fondos de maërl ubicados al SW del puerto, se ha considerado que todo el material es susceptible de ser transportado al interior de la ZEC, debido a su proximidad a la misma.

Por tanto, de la suma de los flujos de material aguas arriba y aguas abajo del puerto, se puede estimar que el volumen de arena que actualmente llega a la ZEC es, aproximadamente, **4300-11800 m<sup>3</sup>/año** (véase la figura 17).

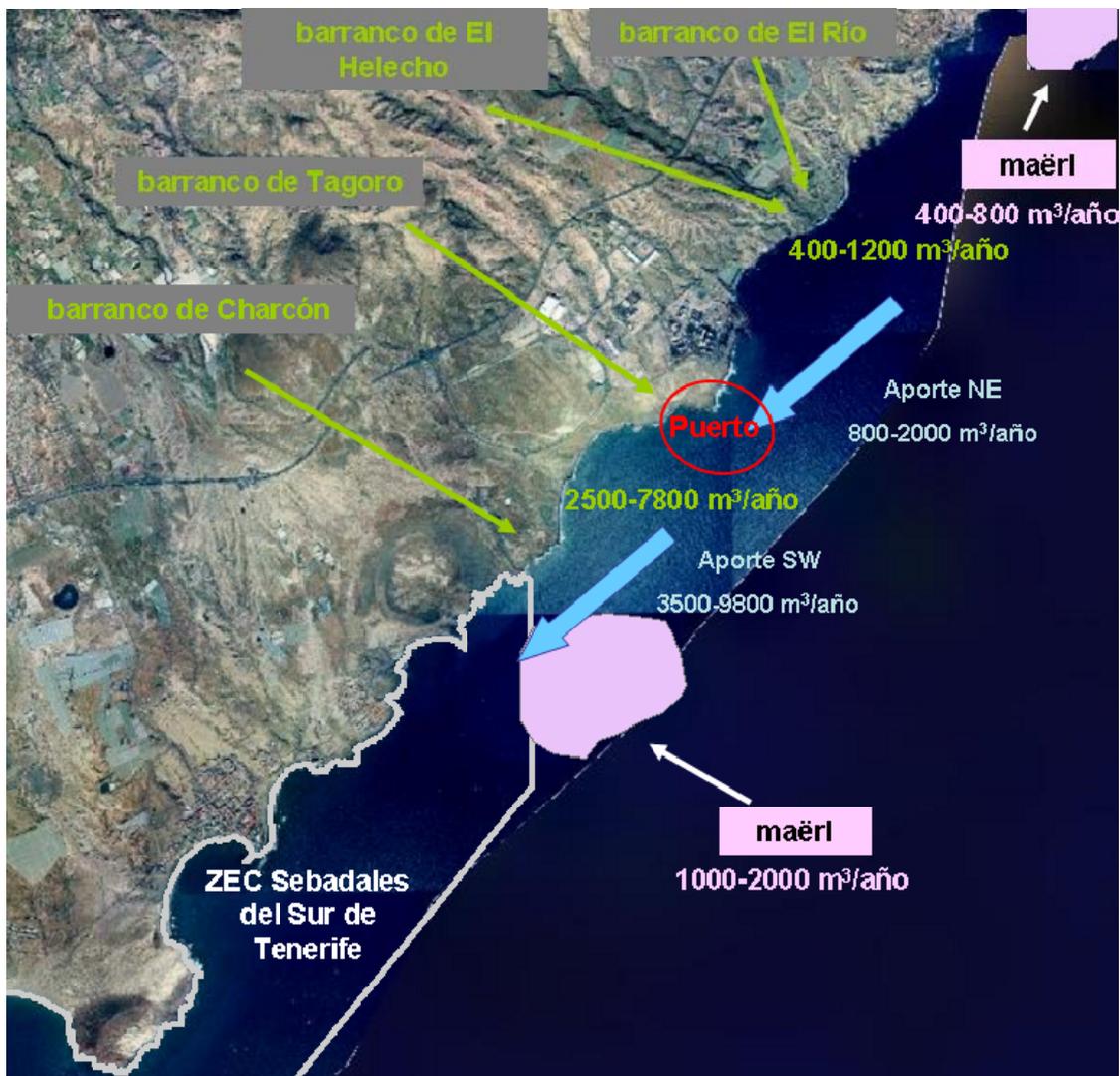


Figura 17. Flujo de sedimentos aguas arriba y aguas abajo del puerto.

Recuérdese que estos datos se han obtenido a partir de los mejores datos disponibles en este momento. Sin embargo, se han asumido ciertas hipótesis en el cálculo las cuales, se resumen a continuación:

- Aporte de los barrancos obtenido con la formulación de la USLE (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo).
- La fracción arena de los barrancos se ha estimado en un 10-30% del aporte total.
- La pluma de vertido de los barrancos se distribuye entre la costa y la batimétrica de -30 m, disminuyendo linealmente. El sedimento depositado entre la línea de costa y la batimétrica de -10 (40% del total), es el sedimento que se transporta a través de la zona donde se ubicará el puerto.
- Para el cálculo del aporte de material de los barrancos se ha supuesto que los cauces de los mismos se encuentran en un estado natural, sin modificaciones antrópicas.
- La zona ocupada por el maërl aguas arriba del puerto se ha supuesto de igual dimensión que la zona ocupada por el maërl aguas abajo.
- Con base en bibliografía existente, se ha estimado que para Canarias, la tasa de fijación de carbonato cálcico estará en torno a 2000 g de CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup>/año con una desviación de +/- 500 g CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup>/año.
- El porcentaje del aporte total de los fondos de maërl, susceptible de ser transportado aguas abajo del puerto, se ha estimado en un 40% como máximo.

Todas estas hipótesis quedan suficientemente argumentadas en el texto recogido en el apartado 3.6 del capítulo 3.

## 4. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas con respecto a las cuestiones concretas planteadas por la Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife en el pliego de prescripciones técnicas particulares que han de regir en la "Asistencia técnica para la redacción de estudio de dinámica litoral para el diseño y proyecto de construcción del by-pass de arena N-S en el Puerto de Granadilla".

- El flujo de material que quedará interceptado por la construcción del nuevo puerto será de 800-2000 m<sup>3</sup>/año. Esta cantidad supone, aproximadamente, un 18% del flujo total de sedimentos que actualmente entra en la ZEC (4300-11800 m<sup>3</sup>/año).

- Tras la construcción del puerto, se producirá una acumulación de sedimentos en la zona donde se produce una disminución en la tasa de transporte potencial (véase la
- figura 18), aguas arriba del puerto. La velocidad con la que se acumulará, se corresponderá con la tasa de transporte real que existe hoy en día aguas arriba del puerto, es decir, 800-2000 m<sup>3</sup>/año.

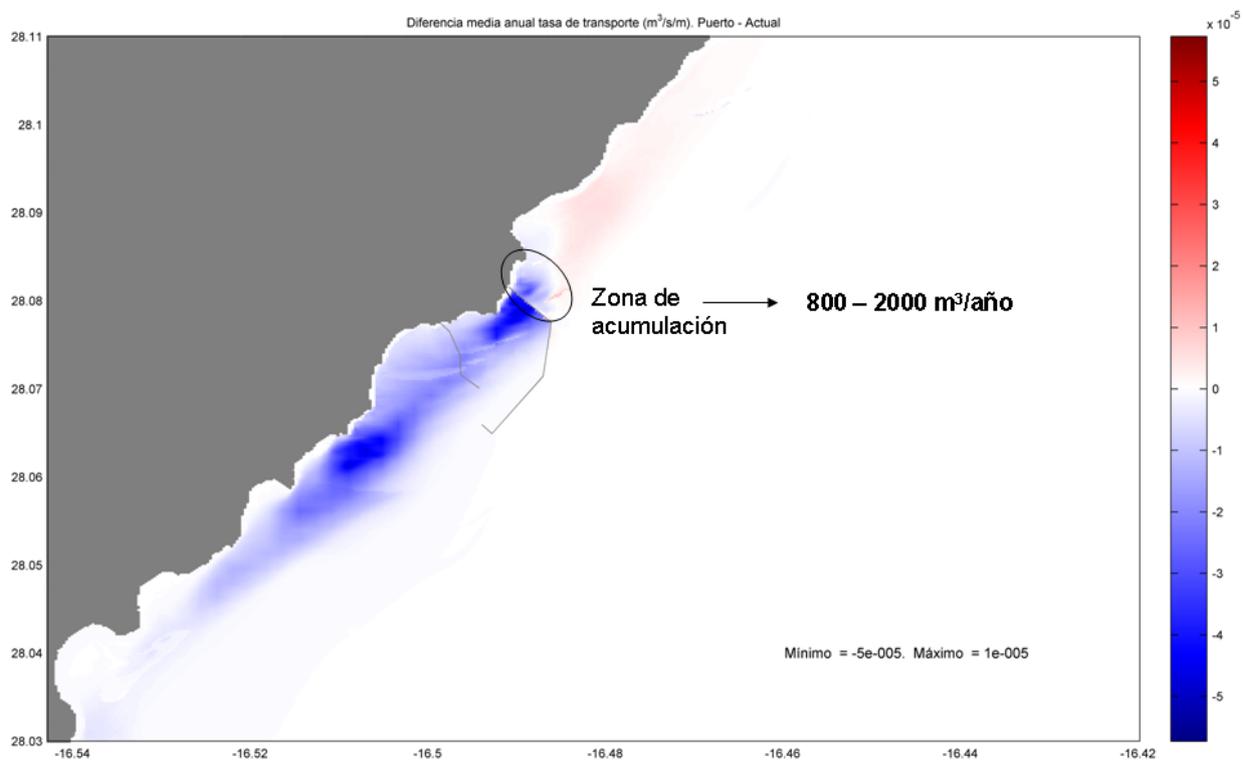


Figura 18 Zona de acumulación de sedimentos.