



Empresa Pública de Puertos de Andalucía
CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES

ESTUDIO DE INUNDABILIDAD DEL ÁMBITO DEL PLAN ESPECIAL DE “ALETAS” (PUERTO REAL, CÁDIZ)

Puerto Real, Octubre de 2007



ÍNDICE

1. OBJETO DEL ESTUDIO.....	1
2. DESCRIPCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO.....	1
2.1. Situación geográfica.....	1
2.2. Climatología.....	3
2.3. Geología, geomorfología y suelos.....	4
2.4. Hidrología.....	8
2.5. Vegetación.....	14
2.6. Usos del suelo.....	17
3. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE CAUDALES DE CRECIDA EXTRAORDINARIA.....	19
3.1. Cálculo de la Superficie de la cuencas.....	20
3.2. Cálculo de la Intensidad de Precipitación.....	20
3.3. Cálculo del Coeficiente de escorrentía.....	31
3.4. Cálculo de Caudales de crecida extraordinaria.....	36
3.5. Cálculo de Caudales de crecida extraordinaria tras la ejecución del Plan Especial.....	41
3.6. Cálculo del volumen a desaguar en la cuenca para el tiempo de concentración considerado.	44
4. ESTUDIO HIDRÁULICO.....	45
5. ESTUDIO DE INUNDABILIDAD COSTERA.....	52
5.1. Influencia por mareas. Datum y rango de mareas.....	53
5.2. Previsiones sobre el aumento del nivel medio del mar.....	56
5.3. Cálculo de isóneas de cota de inundación en Playa de Levante.....	59
5.4. Niveles de referencia del nivel del mar en el ámbito de Las Aletas.....	79
5.5. Hidrodinámica mareal del caño mareal Río San Pedro.....	90
5.6. Datos topográficos.....	135
5.7. Campañas y datos experimentales	136
6. CONCLUSIONES.....	138
7. PROPUESTA DE MEDIDAS CORRECTORAS.....	145
1.- Evitación del riesgo sobre el Viario Estructurante.....	145
2.- Evitación del riesgo en los Parques de Actividad.....	145
3.- Evitación del riesgo frente a las crecidas mareales.....	147
4.- Respecto a la situación más adversa previsible.....	148
8. EQUIPO TÉCNICO.....	151

ANEXOS

PERFILES DE ELEVACIONES
PERFILES ZONA ESTE DE LAS ALETAS
ESQUEMA DE MEDIDAS CORRECTORAS

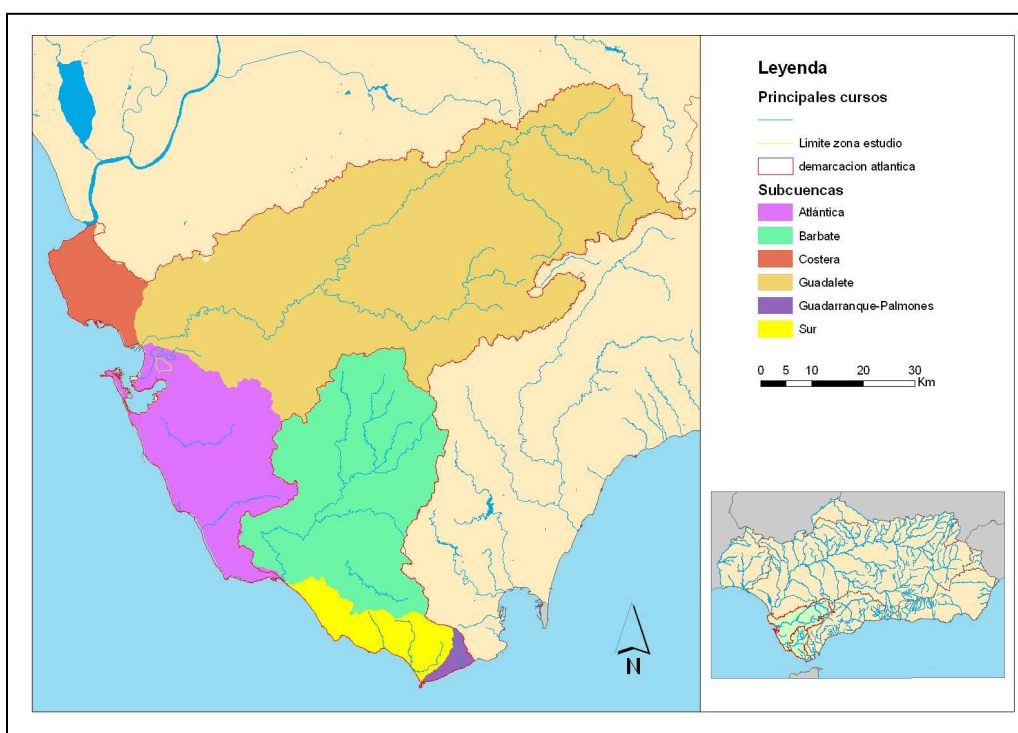
1. OBJETO DEL ESTUDIO

El objeto del presente estudio es realizar un análisis y diagnóstico del comportamiento hidrológico, tanto marino como continental, de las marismas de Las Aletas, en la zona objeto del Plan Especial de Interés Supramunicipal del Área de Actividades Logísticas, Empresariales, Tecnológicas, Ambientales y de Servicios de la Bahía de Cádiz, “Las Aletas” (Término Municipal de Puerto Real) perteneciente a la ZERPLA-3 del Plan de Ordenación del Territorio de la Bahía de Cádiz, de cara a evaluar el posible riesgo de inundación de la zona y plantear las pertinentes medidas correctoras a incorporar a los instrumentos de desarrollo de este Plan Especial.

2. DESCRIPCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Situación geográfica.

El ámbito de estudio está formado por la cuenca del río San Pedro, ubicada en la margen izquierda del río Guadalete en su desembocadura, entre los términos municipales de Puerto Real, el Puerto de Santa María y, parcialmente, en Jerez de la Frontera. Dicha cuenca se integra a su vez entre las subcuencas Atlántica y del Guadalete de la Demarcación Atlántica de Andalucía gestionada por la Agencia Andaluza del Agua.



Demarcación atlántica de Andalucía de la provincia de Cádiz y subcuencas internas.

En la parte sur de la cuenca, próxima a la desembocadura del río San Pedro, se localiza el suelo destinado al polígono de Las Aletas (Foto nº 1), que ocupa una amplia zona de marisma desecada del estuario del río San Pedro. Dicho polígono queda incluido en la Zona de Especial Reserva para la Localización de Actividades denominada ZERPLA 3 del Plan de Ordenación del Territorio de la Bahía de Cádiz, al Norte del núcleo urbano de Puerto Real, en el radio de influencia de la Zona Portuaria, y limitado por grandes infraestructuras de comunicación de ámbito nacional y metropolitano; al oeste por el ferrocarril Cádiz –Sevilla-Córdoba-Madrid y por la CA-32, Antigua Nacional IV en una segunda línea, al Norte y al este por la A4, antigua variante de la Nacional IV; al Sur por la autopista AP4 Sevilla-Cádiz en un tramo de 2.450 m.



Ubicación del ámbito del Plan Especial de Aletas.

El río Guadalete en su desembocadura ha generado una importante marisma, formación dominante en la Bahía de Cádiz, dando a este espacio uno de los elementos más característicos de su paisaje. La zona húmeda, ubicada en la parte norte de la Bahía de Cádiz, es el resultado de proceso de relleno y colmatación cuaternario que dio lugar a una superficie de más de 4.000 Has.

Las Aletas se encuadra desde el punto de vista del medio físico en un ámbito con importantes valores naturales, al Oeste, el Parque Natural de la Bahía de Cádiz; al Norte, el Caño del Río San Pedro; y al Este las marismas del río Guadalete.

2.2. Climatología.

El **balance hídrico** de la zona alcanza sus mínimos en verano. Posteriormente experimenta un proceso de recuperación en época otoñal hasta alcanzar valores máximos. Vuelve a disminuir a partir de diciembre, retomando una tendencia ascendente en primavera.

En los meses de invierno, coincidiendo con las temperaturas bajas y pluviometría elevada, la evapotranspiración alcanza valores mínimos. Es en estos meses cuando la evapotranspiración real coincide con la potencial, ya que no hay escasez de agua y la reserva hídrica es alta. A medida que llega la estación primaveral primero y luego la estival la evapotranspiración experimenta un periodo de ascenso. Se alcanzan valores extremos en los meses de verano, concretamente en el mes de agosto se encuentra el máximo anual de 115 mm. En la época cálida la evapotranspiración real está muy por debajo de la potencial, debido a la escasez de agua lo que hace que la reserva hídrica sea nula. A medida que llega el otoño el fenómeno se va suavizando hasta alcanzar de nuevo en invierno valores mínimos. Con la llegada de las lluvias las reservas se van recuperando poco a poco, llegando un momento en el que la evapotranspiración real se iguala a la potencial.

En los meses estivales la vegetación se ve sometida a un fuerte estrés hídrico. Son meses de temperaturas muy elevadas, siendo sus precipitaciones nulas o casi nulas, un hecho típico dentro del clima mediterráneo.

En cuanto a las **temperaturas** se puede considerar al municipio al que pertenece la zona como de elevado confort climático durante todo el año. Las temperaturas medias anuales en torno a los 17°C. En época estival se alcanzan las más elevadas del año, estando la media entorno a los 20-25°C.

Las temperaturas más altas se producen con vientos de Levante. El área de estudio, como todo el municipio, carece de invierno climatológico ya que no presenta medias mensuales inferiores a 6 °C, lo cual no quiere decir que la temperatura no descienda alguna vez de ese valor. Las temperaturas más bajas se producen con vientos del Norte aunque no se producen heladas.

Los vientos están condicionados por las ondulaciones montañosas de la provincia de Cádiz y del Norte de Marruecos que repercuten en la dirección y fuerza de los mismos, siendo el predominio de los mismo del eje Este-Oeste (Este: Levante, viento seco; Oeste: Poniente, viento húmedo) cuya alternancia da lugar a oscilaciones en la humedad relativa de la zona. Los vientos predominantes son el Levante y el Poniente, estos alternan con un régimen de brisas que suele imponerse cuando el gradiente isobárico es muy fuerte. Los vientos de componente Sur y Norte son menos frecuentes, aunque también hay que tenerlos en cuenta por los efectos que suelen provocar. La cantidad y el tipo de nubes están condicionados por estas corrientes de aire dominantes.

2.3. Geología, geomorfología y suelos.

Encuadre geológico.

El área de estudio se inserta en la terminación occidental de las llamadas cordilleras Béticas, dentro de una amplia banda de materiales arcillo-yesíferos del Triásico Superior, cubiertos en su mayor parte por el Complejo Tectosedimentario Mioceno. Gran parte de la provincia de Cádiz queda englobada bajo este Complejo, con orientación Noroeste paralela a la cadena, se prolonga hacia el Sur, por Puerto Real y hacia el Norte, hasta las Sierras de las Dos Hermanas, del Valle y de la Cabras. Dicha estructura debió actuar como un umbral diapírico, con tendencia al levantamiento, cuyos movimientos han ocasionado en gran parte los rasgos paleogeográficos y los límites de distribución de sedimentos así como, en los momentos de mayor actividad tectónica, la dirección y extensión de los transportes tectónicos y los estilos estructurales de las diversas zonas. Con posterioridad al paroxismo tectónico parte de esta zona quedaría definida como una gran depresión en la que sedimentarían los materiales margosos y biocalcarenticos del Mioceno Superior-Plioceno, asimismo afectados por los movimientos diapíricos.

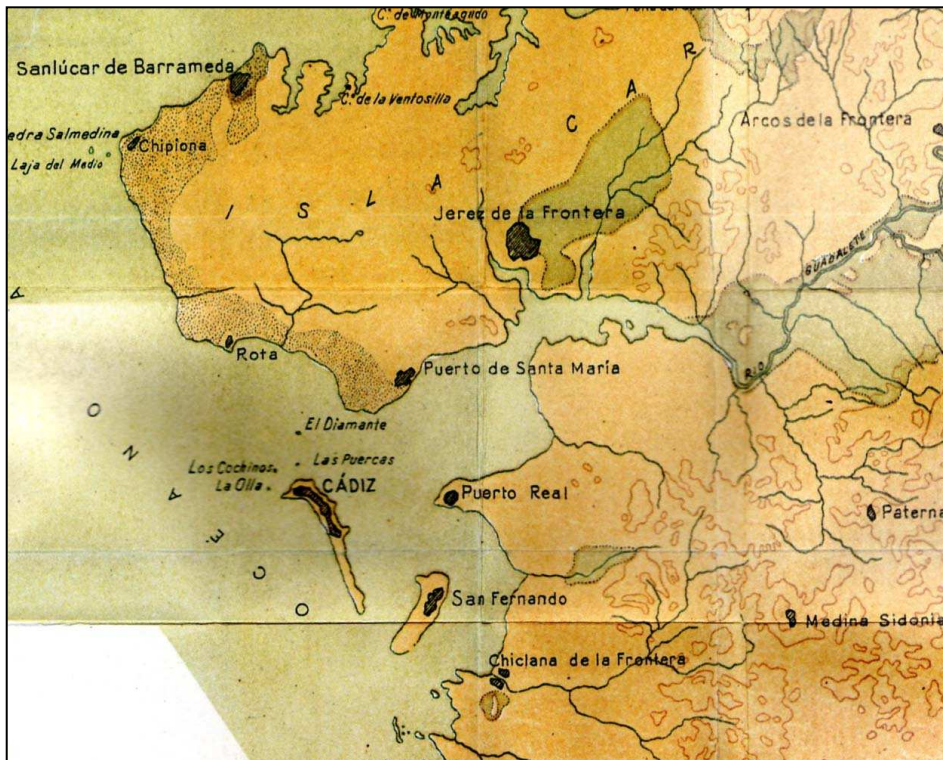
Los materiales predominantes, son los limos arenosos. Se trata de arenas y limos arenosos amarillos con numerosas conchas de Pectínidos y Ostreidos. Hacia el Este de Puerto Real los niveles del Plioceno Inferior pasan hacia el

techo arenas finas amarillas con Lamelibranqueos. El otro material que predomina es el constituido por arenas y arcillas. Estos desarrollan un suelo rojo fersialítico con procesos de lavado de arcilla muy intensos que posteriormente han sufrido una desrubefacción en la parte superior dejando esta zona más empobrecida.

En menor proporción aparecen arcillas abigarradas, areniscas, dolomías y yesos, cuyo carácter alóctono se reconoce fácilmente por la mezcla, muchas veces, caótica de sus elementos litológicos. Rodeada por la anterior formación emergen arcillas verdes oscuras, margas blancas y calcarenitas ricas en microfauna. Por último se observan calizas lacustres de aspecto pulverulento y de color blanco que contiene talos de algas así como numerosos fragmentos de conchas embrionarias de gasterópodos del género *Valvata*.

Evolución geológica. La creación de la Bahía de Cádiz.

El proceso de formación de la Bahía de Cádiz, según varios autores, comienza en el Plioceno inferior, cuando la falla de dirección ENE-WSW que pasa por la Sierra de San Cristóbal, al actuar con carácter normal hunde el bloque de la Bahía. Ello da lugar a una línea de costa formada por un amplio entrante, cuya zona más interna se introduciría por el actual Guadalete sin sobrepasar la Sierra de San Cristóbal. Los dos salientes que limitaban esta costa se ubicaban al norte de Rota y al sur de la Playa de la Barrosa.



Estuario del Guadalete según Gavala y Laborde durante el Plioceno.

El Cerro del Centa, al norte de Puerto Real, y el Cerro de los Martires, al sur de San Fernando, representaban dos islotes en el interior de la Bahía. La retirada progresiva del mar durante el Plioceno superior originó la aparición de zonas marino-salobres, albuferas y marismas, que se desarrollaron fundamentalmente en el área norte de la antigua Bahía, en un proceso cíclico debido a las oscilaciones del nivel del mar durante este periodo.

Las olas y las corrientes litorales produjeron un cordón arenoso o flecha litoral que restringió y aisló la zona del mar abierto, reduciéndose la erosión y creando un gran medio sedimentario que fue progresivamente rellenándose con los aportes del Guadalete y las mareas. En este medio, los caños serían, al igual que en la actualidad, los canales de marea que conectan el interior de la Bahía con el mar abierto. En la fase Plio-Pleistoceno y en el Holoceno se depositan arcillas verdosas con la típica fauna marina salobre.

Geomorfología

La cuenca del río San Pedro se inserta en un ámbito donde se observan formas y procesos de los dominios marítimo terrestre y dominio continental. Así mismo, la morfogénesis de este espacio, derivada de un intenso proceso de relleno estuarino queda patente en la potencia de los depósitos cuaternarios que aparecen en la zona, que permiten describir los rasgos relevantes de la geomorfología del área de estudio, siendo el dominio marítimo-terrestre el predominante de la misma.

Dominio marítimo-Terrestre

El dominio marítimo-continental ésta representado en esta zona por el sistema estuario, en el que la acción conjunta de las mareas y la dinámica fluvial originan una morfología característica, cuya formación más representativa es la marisma. En el estuario del Guadalete, que es el que nos ocupa, la zona de equilibrio esta vecina del litoral, pero aguas arriba. Esto es debido a que su curso de agua tiene unas fluctuaciones considerables. Se trata de un “estuario barrera”, es decir que tiene la comunicación parcialmente cortada hacia el mar debido a la existencia de flechas, barras, etc y está más relacionado hidrológicamente con el río, teniendo un efecto menor la marea.

El área se encuentra dentro de un estuario de forma triangular, de tipo “mesotidal”, o sea, con mareas, cuya amplitud está comprendida entre los 2 y 4 metros (3,40 m. en aguas vivas y 2,40 m. en aguas muertas). El río ha rellenado fundamentalmente la mitad norte del estuario y el mar ha tenido

verdadera influencia en el relleno de la mitad sur del mismo, es el caso de la zona de estudio.

El Guadalete, antes de la época romana debía desembocar en el Portal y los caños o canales de marea más importantes las constituyan el Caño de la Piedad, que desemboca en el Puerto de Santa María, y el de San Pedro. Dentro de dicha marisma se distinguen dos elementos fundamentales; el slikke y el schorre. El límite entre ambos es difícil de precisar, y numerosos autores han denominado a esta zona alto slikke.

El slikke, que coincide con la llanura tidal de algunos autores, es la zona de la marisma que esta cubierta por la marea, incluso las de aguas muertas. El agua que cubre la llanura durante la alta marea es llevada a través de un sistema de canales dispuesta como las ramas de un árbol. El schorre, que para algunos coincidiría con la marisma propiamente dicha, es la porción más elevada de la misma, que solo es alcanzada con marea de aguas vivas o tempestades. El nivel de marisma, como su nombre indica, está constituido por los retazos de una superficie antigua de la marisma que estuvo 1-2 m por encima de la actual. Una particularidad especial, en el estuario del Guadalete, lo constituye la zona que hemos denominado bajo slikke, que la forma una orla que bordea la Bahía, y que está por debajo de la marea baja, no aflorando nada más que durante el reflujó de la marea de agua viva.

Dominio continental

El dominio continental aparece en un pequeño sector situado al Sur del área de estudio, el sistema morfogenético representado en dicho sector es el de Terrazas Fluviales y Glacis.

El sistema de Terrazas Fluviales están muy bien representadas a un lado y a otro del río Guadalete, se trata de terrazas colgadas de las que sólo se suelen conservar las facies de canal; excepto las que se denominan “modernas”, que en realidad corresponden a una terraza compuesta o policíclica, formada por varios niveles que se solapan y cuyos escarpes han desaparecidos debido a que el río migraba hacia de Sur a Norte depositando a mayor velocidad de lo que se encajaba, dándose el fenómeno de derrame de ladera. Algo parecido ocurría con la terraza “antigua”. Ambos son las más desarrolladas, y dan el aspecto de un glacis. Los glacis representados en la zona son principalmente de cobertura, pertenecen a este tipo de glacis, las del Cuaternario antiguo, con industria lítica, que rodean las zonas de marismas. Su pendiente es de 1,14 por 100 próximo al Guadalete y 2,1 por 100 en la Bahía de Cádiz.

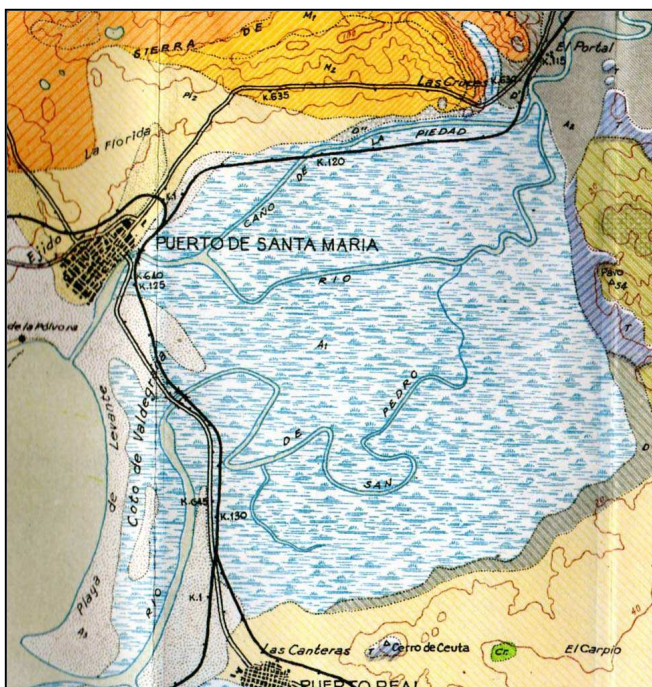
Edafología

Los suelos del área de actuación en su integridad son Marismas, Solonchaks takiricos y gleicos formados por sedimentación holocénica de arcillas, margas, limos y yesos, aportes fluviomarinos depositados en estuarios, donde forman extensas llanuras con drenaje muy deficiente. Sin embargo se localizan también en menor medida Ardisoles y Entisoles

2.4. Hidrología.

La red hidrográfica.

El área de estudio se encuentra en la parte final de la cuenca del río San Pedro, próximo a su desembocadura. Dicho curso, hasta hace unas décadas,



se integraba en la cuenca del Guadalete, representando un brazo del mismo en la desembocadura o lugar a la construcción de una serie de obras hidráulicas que tuvieron como resultado la creación de una subcuenca propia. Las principales obras en la zona han sido la corta del Caño del río San Pedro, el encauzamiento del Guadalete y la creación de una densa red de drenaje que impide el encharcamiento de la marisma.

Estuario del Guadalete según Gávala y Laborde¹.

La evolución reciente de las marismas tiene como hito más representativo la desconexión de brazo del río San Pedro del río Guadalete. Aun en 1956 el Guadalete poseía una importante red de canales mareales desde El Portal hasta su desembocadura que configuraban una extensa marisma de más de 4.000 Has. A mediados del siglo XX con las políticas de la autarquía y la reforma agraria se procede a desecar una amplia porción de la marisma para su puesta en cultivo, quedando este espacio tal como se observa en la actualidad.

¹ En Geología de la Costa y la Bahía de Cádiz. Edit. Diputación de Cádiz. 1992.

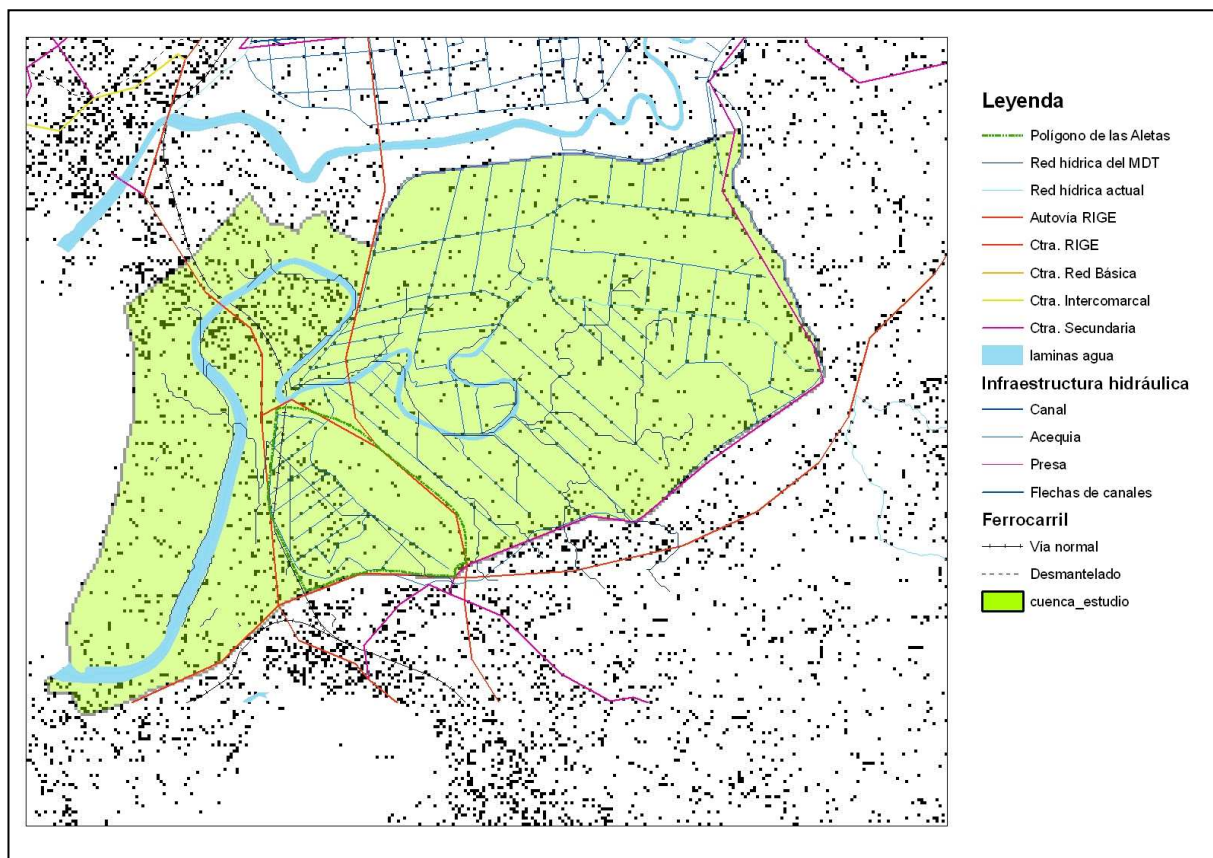


Fotografía aérea de las Aletas en 1956.



Ortofoto de las Aletas en 2003.

Además de las obras hidráulicas para poder poner la marisma en cultivo, la progresiva humanización del espacio y la construcción de una densa red de vías de comunicación han ido cercanando la cuenca del río San Pedro, hasta el punto de que se ha creado una subcuenca artificial perfectamente delimitada por las grandes infraestructuras de la zona. Los muros de elevación de estas vías han actuado como diques que desconectan en buena medida la red de drenaje natural de la marisma con el resto de los cursos fluviales. Un ejemplo gráfico de esta cuestión queda patente en la elaboración de la red hídrica a partir de un Modelo Digital del Terreno elaborado sólo con las cotas topográficas, en donde los cauces de dicha red respetan la topografía original y tienden a evacuar las aguas hacia el Guadalete. Sin embargo, tal como ya se ha explicado, no existe en la actualidad tal posibilidad dado que entre el Guadalete y el río San Pedro se ha creado una corta.

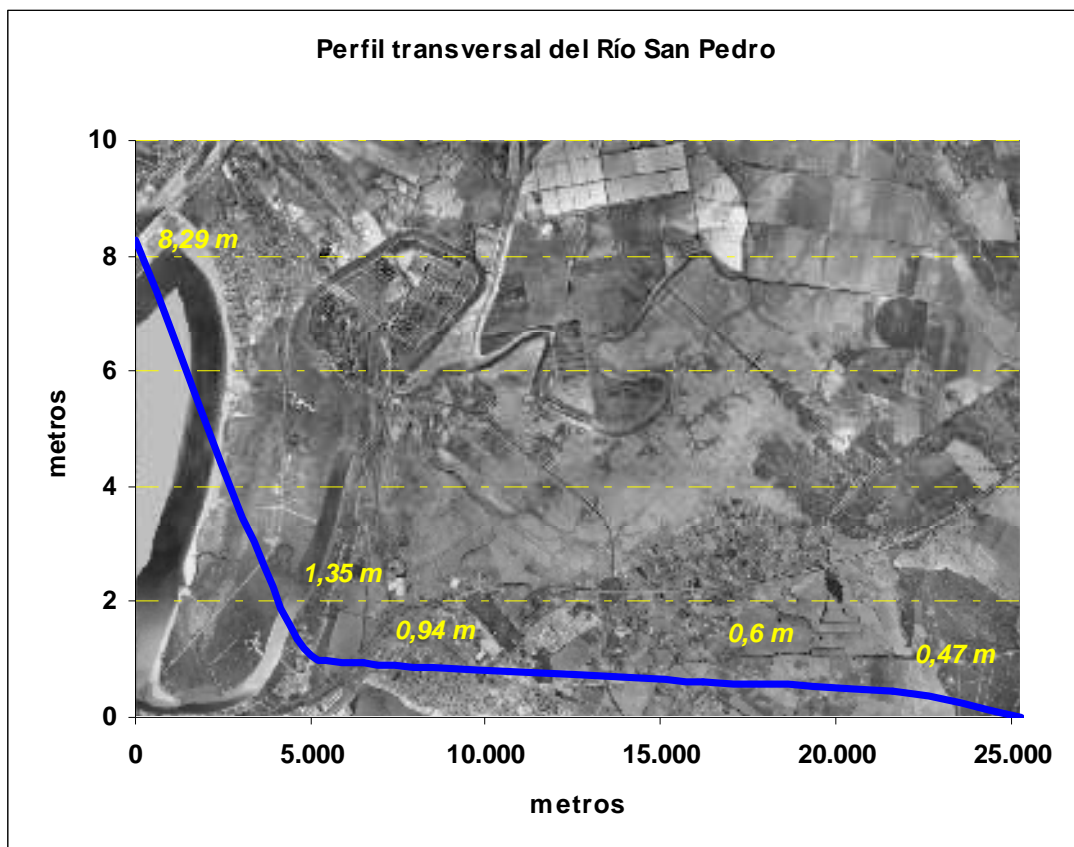


Cuenca de estudio y principales infraestructuras.

Tras las múltiples intervenciones sobre las marismas la red de drenaje ha quedado configurada por un sistema de canales que evitan el encharcamiento temporal de este espacio, caños mareales como el de San Pedro o La Marina, y pequeños arroyos que nacen sobre los relieves Mio-pliocenas de Puerto Real, siendo el más importante el de San Pedro.

La impermeabilidad de la zona, además de su morfología plana y su baja altitud sobre el nivel del mar provocan unas condiciones desfavorables de drenaje que junto con el abandono de los terrenos, han dado lugar a la aparición, de una red de pequeños surcos de drenaje sobre todo en las zonas menos transformadas, también aparecen encharcamientos temporales en suelos relativamente deprimidos, permitiendo la colonización de los mismos por especies hidrófilas como el ranúnculo *Ranunculus peltatus*.

Por su parte, el caño del río San Pedro, antiguo afluente del río Guadalete, es en la actualidad un brazo de mar con aportes del arroyo que lleva su mismo nombre. El funcionamiento hidráulico de este cauce está determinado principalmente por la acción de las mareas, siendo los aportes pluviales de menor consideración. A esta situación hay que añadir la topografía prácticamente llana y la baja permeabilidad de los materiales que conforman la marisma, que incrementan los coeficientes de escorrentía y provocan encharcamientos temporales. La longitud del cauce considerado es superior a 25 Km, en cuya distancia salva un desnivel de 8,29 m. En el primer tramo de la cuenca el río San Pedro es un pequeño arroyo que nace en los relieves Mio-Plioceno y es en este espacio de la marisma donde se dan las mayores pendientes. Sin embargo, una vez que se abre el brazo de mar las pendientes son muy bajas y el río precisa divagar por la marisma para poder alcanzar la costa.



El perfil de profundidades del río San Pedro es muy uniforme, disminuyendo paulatinamente a medida que se adentra en la marisma siendo su profundidad máxima de cuatro metros. Su desembocadura se encuentra protegida del oleaje y de la aportación de sedimentos fluviales por lo que el único movimiento en el interior es el flujo y reflujo de la marea.

En la margen derecha del río San Pedro (El Puerto de Santa María), se localiza una red de caños que drenan el agua de las mareas desde las marismas al río San Pedro. En los Toruños, los más importantes son el caño del Bote y el del Caserón, situados en los sectores norte y central respectivamente.

Aguas Subterráneas.

Las características hidrogeológicas de la mayor parte de la zona impiden la presencia de aguas subterráneas, pero constituyen un zócalo impermeable de arcillas y limos que sellan el conjunto detrítico que da lugar al acuífero Puerto Real-Conil.

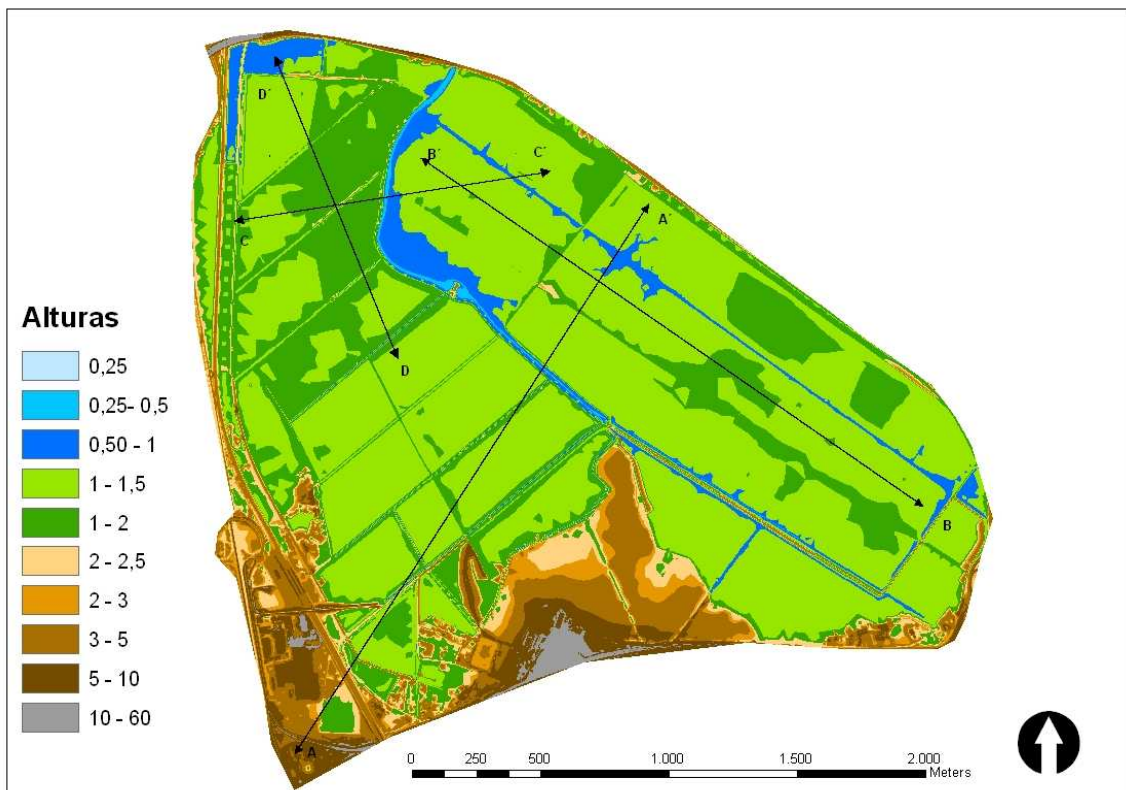
Este acuífero está presente sólo en el sector sur del área de estudio, en el que los materiales dejan de ser impermeables pasando a ser detríticos. Este acuífero se encuentra integrado en el sistema Guadalete-Bárbate, es un acuífero miopliocuaternario, detrítico, de potencia y permeabilidad medias, con arenas y calcarenitas. Su superficie es de unos 210 Km².

La cuenca del Polígono de las Aletas.

La marisma de las Aletas, dentro de la Cuenca del río San Pedro, posee a su vez una subcuenca diferenciada, que al igual que en el anterior caso, ha sido originada por las principales vías de comunicación que transcurren por el ámbito. Dichas infraestructuras constituyen importantes barreras físicas que limitan notablemente la conexión de la red de caños mareales de las Aletas con los del río San Pedro. Por otro lado, en dicho espacio, las obras de desecación de la marisma que se llevaron a cabo a partir de la segunda mitad del Siglo XX la han transformado de manera significativa de tal manera que el flujo superficial de agua, tanto el proveniente de las mareas como de los aportes pluviales, está muy determinado por la extensa red de canales de drenaje, muros y caminos rurales. Dichas infraestructuras han provocado una profunda transformación del funcionamiento hidráulico de la marisma, de tal manera que se ha buscado organizar el drenaje de la zona a través de sectores y parcelas que en su mayor parte derivan las aguas hacia los principales caños que transcurren por las Aletas.

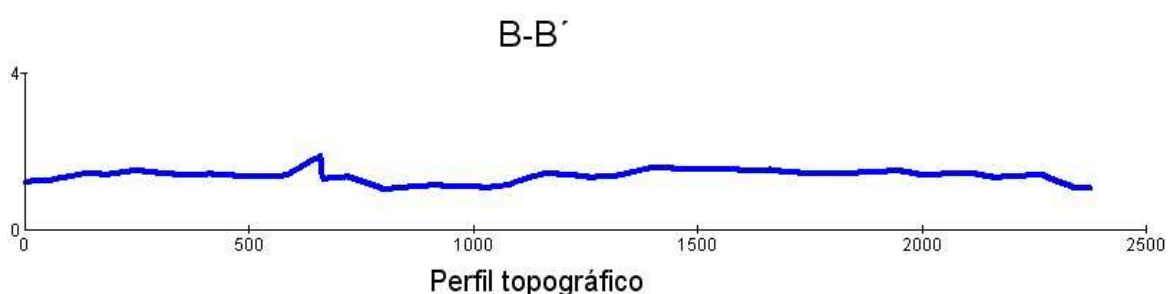
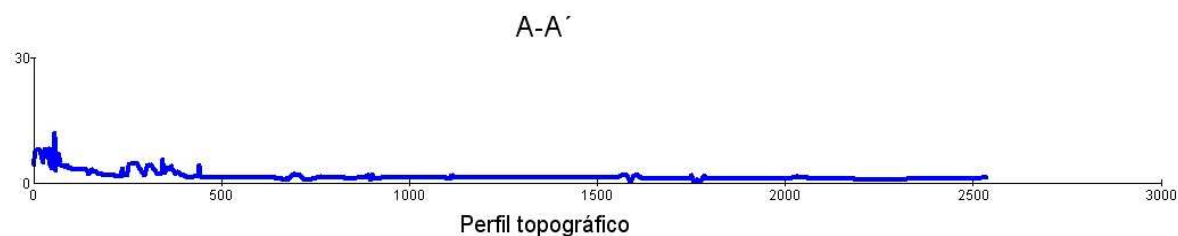


La marisma de las Aletas está atravesada transversalmente por el caño de La Marina, un brazo del río San Pedro, con el está conectado mediante tres tubos de 1,75 m de diámetro bajo la variante de la N-IV. Este caño recibe la mayor parte de las aguas evacuadas por los distintos canales de drenaje, adquiriendo mayor importancia en el tramo final, en donde la estructura rectilínea del canal se abre a un cauce con claras influencias mareales.



La topografía de la zona se encuentra ordenada en una serie de sectores delimitados por pequeños muros de contención y caminos rurales, que en su mayoría no superan los dos metros de altura. A grandes rasgos la pendiente de la zona buza en dirección SW-NE (perfil A-A') en dirección al caño de la

Marina. El espacio que queda en la margen derecha de este curso fluvio-mareal esta atravesado por un caño paralelo al de la Marina y que drena las aguas recogidas en este sector hacia la variante de la N-IV (perfil B-B').



2.5. Vegetación.

Vegetación potencial.

La zona de estudio se encuentra situada biogeográficamente, según el Mapa de Regiones Biogeográficas y el Mapa de Provincias y Sectores Corológicos de Rivas Martínez, dentro de la Región Mediterránea, Superprovincia Mediterráneo-atlántica, Provincia Gaditano-Onubo-Algarbiense (=Tingitano-Onubo-Algarbiense), Sector Gaditano. Para esta localización y en combinación con la geomorfoedafología, potencialmente, tendrían que darse en la zona, según el citado Mapa de Series de Vegetación, las siguientes Series de Vegetación:

Sobre los terrenos arenosos y areniscos propios de la terraza marina aparecería la Serie Termomediterránea Gaditano-Onubo-Algarbiense y Mariánico-Monchiquense y Bética subhúmedo-húmeda sicícola del alcornoque *Oleo sylvestris-Querceto suberis* (Serie 26. A).

Otra de las series que aparece en el área de estudio es la Geomacroserie de los Saladares y Salinas, esta serie es una de las tres series pertenecientes a las Geoserias edafólicas mediterráneas. Se extiende por la zona Norte del área de estudio, coincidiendo con las zonas que tuvieron influencia mareal.

Vegetación existente.

El espacio que ocupa la zona de estudio presenta un alto grado de alteración humana, de manera que la vegetación natural fue prácticamente sustituida por la ocupación agrícola, actualmente abandonada.

La vegetación actual característica viene determinada, fundamentalmente, por el tipo de sustrato sobre el que se asienta, por la desnaturalización sufrida tras la desecación para su puesta en cultivo y por el clima de la zona. Este último es de tipo Mediterráneo con influencia atlántica y de inviernos suaves, lo que posibilita un crecimiento casi continuo de la vegetación durante todo el año.

El sustrato está compuesto básicamente por materiales finos (limos y arcillas, con diámetro de partícula menor a 0,02 mm), que son aportados por los ríos y que son depositados en cada marea en las zonas de baja energía, al confluir aguas dulces con un gran contenido de partículas en suspensión y aguas marinas, de alta salinidad. Los depósitos fangosos así formados se van estabilizando y van aumentando en altura y, por tanto, independizándose de la influencia mareal- de forma cada vez más rápida una vez que han sido colonizados por la vegetación, al potenciar la acreción de nuevos sedimentos, esto permitiría abordar el estudio de la vegetación mediante la caracterización de una serie de unidades ambientales, en base a este proceso de sucesión ecológica desde ambientes marinos hacia los típicamente terrestres, pero las actuaciones transformadoras llevadas a cabo en la zona para su puesta en cultivo impiden una caracterización estricta de dichas unidades.



En la zona más antropizada del área de estudio el suelo se encuentra colonizado por un estrato herbáceo de plantas ruderales. Especies como la manzanilla *Anthemis arvensis*, la vinagreta *Oxalis pes-caprae* y otras como *Silene laeta*, candiles *Arisarum simorrhinum* y *Asphodelus ramosus* son algunas de las que se encuentran en este sector.

Los márgenes de los canales de drenaje que surcan la zona más antropizada de la marisma, se encuentran abrigados por unas formaciones helófitas lineales de juncos *Juncus acutus*, acompañados por algunos ejemplares de tarajes *Tamarix canariensis*, salado *Limoniastrum monopetalum* y retama *Retama monosperma*. A medida que los canales avanzan hacia el interior de la marisma los juncos se hacen menos presentes, dejando su lugar a otras especies más halófitas, como *Arthrocnemum macrostachyum*.



Los antiguos cultivos abandonados y sobre todo aquellos que fueron sometidos a una menor intensidad productiva han ido recuperando algunos de sus valores naturales, como la recolonización de las especies halófilas características de los ecosistemas de marismas, es el caso del salado *Limoniastrum monopetalum*, sosa *Arthrocnemum macrostachyum*, *Suaeda*

splendens (especie primicolonizadora característica de ecosistemas secundarios alterados), *Sueda vera* (especie característica de marisma alta) y otras como *Sarcocornia fruticosa*, *Sarcocornia perennis* que ocupan las áreas mas encharcadas del ámbito.



Las zonas situadas entre las edificaciones y las redes de comunicación existentes entorno al área de estudio están ocupadas por eriales donde dominan las ruderales nitrófilas acompañadas por manchas dispersas de retama *Retama monosperma*, también aparecen algunas formaciones lineales de eucalipto próximas al cementerio.

2.6. Usos del suelo.

Los usos del suelo existentes en la cuenca del Río San Pedro están asociados fundamentalmente a la agricultura de secano, las explotaciones salineras y las marismas desecadas abandonadas. Esta distribución está muy determinada por el carácter de Dominio Público Marítimo Terrestre de gran parte de la zona, con lo que el uso existente se debe acoger a las prescripciones de la Ley de Costas.

Los usos agrícolas de secano junto con un mosaico de usos formado por un pequeño diseminado rural, varias instalaciones agropecuarias de poca entidad y una serie de infraestructuras de diferente entidad como, el estadio de fútbol Ortega Pejito una parcela dedicada al almacenamiento de gas butano, una residencia de ancianos, la estación de las Aletas, el cementerio y las antigua instalaciones del Consorcio de la Bahía de Cádiz, ocupan la zona colindante al núcleo de Puerto Real y el vértice nordeste de la cuenca de estudio.

Superficie de los usos de la cuenca del río San Pedro			
Usos	M2	Ha	%
Marismas de las Aletas	16.760.352,56	1.676,04	30,28
Salinas	9.518.321,57	951,83	17,20
Marismas y esteros	7.048.014,52	704,80	12,73
Secano	4.695.898,37	469,59	8,48
Praderas de <i>Arthrocnemum</i>	3.540.937,97	354,09	6,40
Fondos y caños	3.161.554,52	316,16	5,71
Pastizal	2.669.657,71	266,97	4,82
Pinar	2.396.724,48	239,67	4,33
Urbano	1.440.600,98	144,06	2,60
Matorral*	1.223.625,40	122,36	2,21
Infraestructuras	1.179.964,33	118,00	2,13
Marisma pluvial	810.299,00	81,03	1,46
Riberas y zonas húmedas	656.784,12	65,68	1,19
Dotaciones	111.104,17	11,11	0,20
Diseminado	89.201,51	8,92	0,16
Industrial	48.815,62	4,88	0,09
Total	55.351.856,84	5.535,19	100,00

Fuente: elaboración propia a partir de ortofoto digital de Cádiz (2003).

Distribución de los principales usos del suelo en la cuenca.

Los usos del suelo urbano y dotacional ocupan pequeñas superficies en el conjunto de la cuenca, que junto a las infraestructuras no llegan a cubrir el 5 % del total. No obstante, estos últimos, pese a su menor peso específico, por su distribución juega un papel importante en la circulación de las aguas en la cuenca.

En cuanto a las formaciones arboladas, de matorral y pastizal representan en su conjunto un porcentaje superior al 10 %, localizándose fundamentalmente en las proximidades de Puerto Real y en la flecha de Valdelagrana. Asociadas a la margen derecha del brazo del río San Pedro aparecen las praderas de *Arthrocnemum*, cuyo funcionamiento, a efectos de escorrentía superficial es parecido al del pastizal.

A partir del Coto de la Isleta aparecen las marismas y los esteros funcionales, ocupando una importante superficie del tramo bajo del río San Pedro. La superficie con mayor profusión corresponde a las marismas de las Aletas, que con un 30 % del total, representa el uso del suelo dominante. En la margen derecha del río, entre el Coto de la Isleta y las marismas de las Aletas aparece una gran superficie de suelo destinada a la explotación salinera, que representa un 17,2 % de la superficie total.

3. ESTUDIO HIDROLÓGICO DE CAUDALES DE CRECIDA EXTRAORDINARIA

Introducción al método racional según la Instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial” (DGC,1990)

En este primer apartado, se determinan cuales son los caudales hídricos, para los cauces principales de la cuenca, con un periodo de retorno de 50, 100 y 500 años. A través de estos valores se halla las posibles zonas de inundabilidad que pudieran formarse al sobrepasar, dichos caudales hídricos, determinadas secciones de los cauces fluviales. Entre las distintas metodologías que existen, el método racional según la Instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial” (DGC, 1990), proporciona el cálculo de caudales hidráulicos para intervalos de tiempo futuros. Así:

$$Q = [(C * I * A)/3]^K \quad (1)$$

- donde:
- Q = caudal de referencia en el punto en que desagüe una cuenca o superficie. (Unidad m³/s).
 - C= coeficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie drenada, típicamente 0,2 a 0,7. (Unidad adimensional).
 - I = intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración. (Unidad mm/h).
 - A = superficie de la cuenca. (Unidad Km²).
 - K = coeficiente dependiente de las unidades en que se expresen Q y A, y que incluye un aumento del 20% en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. (Unidad adimensional).

Nota: La Instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial” (MOPU, 1990) incluye un factor de corrección de 1.2 (aumento del 20%), ya que si el área está en Km² y la Intensidad en mm/hora, para que el caudal Q se obtenga en m³/seg se debería dividir por 3.6 (por los 3600 segundos que tiene una hora); sin embargo dicha instrucción indica que se divida por 3, lo cual supone el factor de aumento de 1.2 citado.

3.1. Cálculo de la Superficie de las cuencas.

Cuenca del Ámbito de Las Aletas

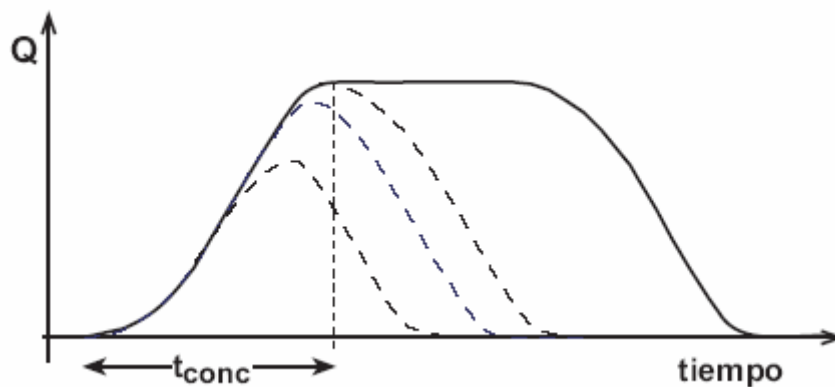
El ámbito de estudio de Las Aletas, además de englobarse dentro de la Cuenca del Río San Pedro, constituye en sí mismo, su propia cuenca hidrográfica, dada las infraestructuras viarias sobreelevadas y demás obras que rodean a la zona. Así, esta cuenca se extiende sobre, aproximadamente, $5.272.844 \text{ m}^2$ o 527,284 Ha.

Este es el factor más sencillo, se han medido, a partir de una base digital de la zona, mediante ordenador con el programa de sistemas de información geográfica ArcGIS 9.

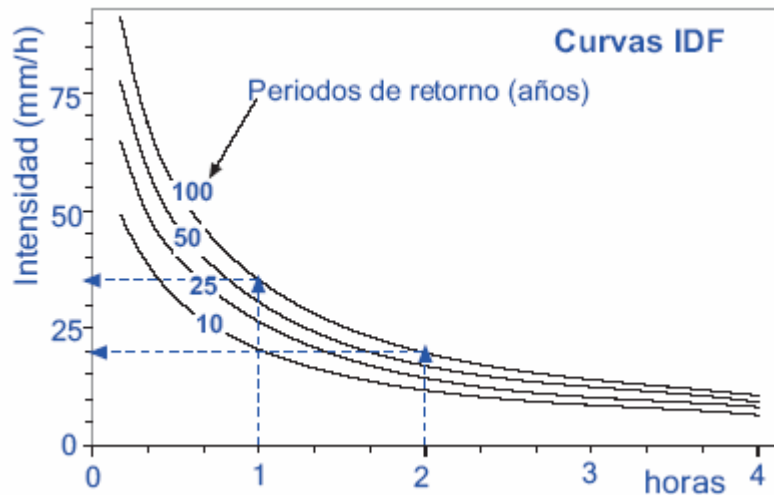
Cabe comentar que la aplicación de este método debería limitarse a cuencas lo suficientemente pequeñas para que se pueda suponer una precipitación homogénea en el espacio y el tiempo; algunos autores hablan de 30 ó 40 hectáreas (menos de 1 Km^2), aunque habitualmente se aplica a cuencas de muy pocos Km^2 .

3.2. Cálculo de la Intensidad de Precipitación

Es necesario conocer (o evaluar) la **Intensidad de Precipitación para el tiempo de concentración de la cuenca**. Si utilizamos un tiempo menor, no permitimos que toda la cuenca contribuya al caudal, y si utilizamos un tiempo mayor, la intensidad máxima será menor (es evidente: la intensidad, en mm/hora, de las dos horas más lluviosas siempre es menor que la intensidad de la hora más lluviosa).



Mediante la gráfica anterior, se observa que para que se alcance el máximo caudal es necesario que la duración de la precipitación sea mayor o igual que el tiempo de concentración de la cuenca.



En las curvas IDF, de la gráfica anterior, se aprecia que si consideramos un intervalo de tiempo mayor la Intensidad (mm/hora) disminuye.

Así, el riesgo y compromiso entre estas dos circunstancias anteriores, expresa la determinación de trabajar con valores de Intensidad de Precipitación producida en un tiempo igual al tiempo de concentración.

Esta intensidad de precipitación para aplicar la fórmula debería corresponder a una precipitación uniforme por toda la extensión de la cuenca durante el tiempo considerado. La limitación en la superficie, referida arriba, se debe principalmente a esto.

En cualquier caso, lo ideal sería disponer de unas curvas IDF bien elaboradas. En éstas, se determina la Intensidad de Precipitación para el periodo de retorno elegido y para un tiempo igual al tiempo de concentración, t_c (por ejemplo, vemos en la figura la lectura de la intensidad para 35 minutos y un retorno de 50 años).

Si no disponemos de curvas IDF, existen diversas soluciones "locales". Se trata de fórmulas válidas para un territorio determinado. Para España (MOPU, 1990; Ferrer, 1993), en los casos en que no dispongamos de curvas IDF, se realiza en dos pasos:

1º Obtención de la **intensidad máxima diaria para el periodo de retorno deseado**. Primero se calcula la precipitación diaria máxima. Este dato se puede obtener ajustando una serie de valores (el día más lluvioso de cada año de una serie de años) a una ley estadística, por ejemplo, la Ley de Gumbel. La intensidad máxima diaria (I_d) se puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$I_d = P \text{ máx día } / 24 \quad (2)$$

Para el cálculo de este parámetro $P \text{ máx día}$ (Precipitación máxima diaria), la aplicación de la Ley de Gumbel parte de una serie de valores anuales de pluviometría, concretamente el valor máximo de las precipitaciones diarias registradas durante un año determinado.

La variable x representa la pluviometría diaria máxima anual, cuyas unidades son mm/día.

Así, la hipótesis de partida determina que la distribución de probabilidad acumulada de precipitaciones máximas diarias anuales, representadas por la variable x , se ajustan a la ley de distribución de Gumbel, cuya expresión, entre otras aceptadas, es:

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-u}{\alpha}}} \quad (3)$$

Donde:

$$b = \frac{x - u}{\alpha} \quad (4)$$

Siendo:

e = base de los logaritmos neperianos = 2,718281828459...

α = $S_x / 1,2825$

$u = \bar{x} - 0.5772 * \alpha$

S_x y \bar{x} , representan la desviación típica y la media aritmética de las precipitaciones máximas diarias de una serie determinada de años.

Si se sustituye u por su valor en (4), se obtiene:

$$b = \frac{x - u}{\alpha} = \frac{x - (\bar{x} - 0,5772 * \alpha)}{\alpha} = \frac{x - \bar{x}}{\alpha} \quad (5)$$

Y sustituyendo ahora α en (5), resulta:

$$b = 1,2825 * \left(\frac{x - \bar{x}}{S_x} \right) + 0,5772 \quad (6)$$

Los valores o coeficientes de 1,2825 y 0,5772 son válidos para muestras de un número muy grande de valores. Para menos de 100 valores, hay que sustituir estos coeficientes por otros tabulados (Aparicio, 1997, p.264) en la siguiente tabla:

nº datos	μ_y	σ_y
10	0,4952	0,9496
15	0,5128	1,0206
20	0,5236	1,0628
25	0,5309	1,0914
30	0,5362	1, 1124
35	0,5403	1,1285
40	0,5463	1,1413
45	0,5485	1,1518
50	0,5504	1,1607
55	0,5521	1,1682
60	0,5548	1,1747
65	0,5559	1,1803
70	0,5569	1,1854
75	0,5578	1,1898
80	0,5586	1,1938
85	0,5593	1,1974
90	0,5600	1,2007
95	0,5772	1,2037
100	0,5600	1,2065
→ infinito	0,5772	1,2825

Por tanto, la ecuación (6) para un caso general resulta:

$$b = \sigma_y * \left(\frac{x - \bar{x}}{S_x} \right) + \mu_y \quad (7)$$

En la expresión (3), F(x) es la probabilidad de que se produzca una precipitación con un valor menor o igual que x , es decir, F(x) representa la probabilidad de que un valor dado de x no sea superado:

$$F(x) = \text{Probabilidad } (\xi \leq x) \quad (8)$$

Por tanto, la probabilidad de que se produzca una precipitación con un valor mayor que ese x dado será:

$$\text{Probabilidad } (\xi > x) = 1 - F(x) \quad (9)$$

Así, el Periodo de Retorno o lapso de tiempo $T(x)$, dentro del cual sería esperable que se produjese esa precipitación de valor x , llamado Periodo de Retorno para esa precipitación x , sería:

$$T(x) = 1 / (1 - F(x)) \quad (10)$$

Sustituyendo $F(x)$ en la ecuación anterior, se obtiene que:

$$T(x) = \frac{1}{1 - e^{-bx}} \quad (11)$$

Y sustituyendo ahora b , cuya expresión viene dada por la fórmula (7), en la ecuación anterior, resulta:

$$T(x) = \frac{1}{1 - e^{-\left[\sigma_y * \left(\frac{x - \bar{x}}{S_x} \right) + \mu_y \right]}} \quad (12)$$

De esta fórmula (12), la única incógnita sería x , la cual, como ya se ha mencionado, representa la pluviometría diaria máxima anual en unidades de

mm/día; puesto que los demás parámetros (\bar{x} , S_x , μ_y y σ_y) se pueden calcular a partir de los datos de las precipitaciones máximas diarias y del número que

forman éstos para cada serie de años. El parámetro **T(x)** hace referencia al periodo de retorno para una precipitación máxima diaria en concreto.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las precipitaciones máximas diarias en la estación meteorológica “Cortadura” del municipio de Cádiz. La elección de esta estación meteorológica se debe a su cercanía al ámbito de estudio, puesto que la estación meteorológica de Puerto Real se cerró en 1983.

Precipitaciones máximas diarias* (mm/día)

Estación meteorológica “Cortadura” - Indicativo: 5-973

Longitud: 06° 15' W; Latitud: 36° 29' N; Altitud: 8 m; Periodo:1955/2006

Municipio de Cádiz

SERIE CRONOLÓGICA		SERIE CRONOLÓGICA	
1955	66	1982	87,4
1956	26	1983	54,2
1957	63	1984	49,1
1958	60	1985	42,9
1959	28	1986	34,8
1960	103	1987	70
1961	84,3	1988	63,6
1962	76	1989	66
1963	62	1990	47,7
1964	41	1991	54,8
1965	55,5	1992	50,4
1966	45	1993	30,5
1967	64	1994	30
1968	53	1995	31,5
1969	142	1996	49
1970	68	1997	42,6
1971	48	1998	37
1972	45	1999	54,8
1973	55	2000	34,8
1974	30,5	2001	47,4
1975	71	2002	43,6
1976	49	2003	82,4
1977	80,7	2004	63,5
1978	68	2005	32,1
1979	32,1	2006	55,7
1981	29,3		

* Datos proporcionados por Centro Meteorológico Territorial en Andalucía Occidental y Ceuta a fecha de agosto de 2007

Los cálculos hallados son:

$$\bar{x} = 54,9254902$$

$$S_x = 21,43650012$$

nº datos	μ_y	σ_y
51	0,5504	1,1607

Así, aplicando la fórmula (12):

$$x (P \text{ máx día para } T(x)=50) = 116,82 \text{ mm/día}$$

$$x (P \text{ máx día para } T(x)=100) = 129,72 \text{ mm/día}$$

$$x (P \text{ máx día para } T(x)=500) = 159,52 \text{ mm/día}$$

En resumen, se observa:

PERIODO DE RETORNO (años)	PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA (mm/día)
50	116,82
100	129,72
500	159,52

A los valores de precipitación máxima diaria determinados, se les aplica un coeficiente reductor por área (ARF) que corrige el hecho de que la distribución de la precipitación no es uniforme geográficamente, es decir, que no es simultánea en toda la cuenca. La aceptación de este hecho se aborda con diversos métodos que utilizan el área de la cuenca y la duración de la precipitación. El método más simple (Témez, 1991) es:

$$ARF = 1 - \frac{\text{Log Superficie (Km}^2\text{)}}{15}$$

Así, dada la extensión de la **cuenca de Las Aletas**, de 5,27 Km², se obtiene un valor de **ARF** de **0,95186367**. Se obtienen, por tanto, los valores de precipitación máxima diaria corregidos, para los periodos de retorno determinados, los cuales son:

PERIODO DE RETORNO (años)	CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA CORREGIDA (mm/día)
50	111,20
100	123,47
500	151,84

Estos valores son el resultado del producto de las precipitaciones máximas diarias por el coeficiente reductor por área (ARF)

Luego:

$$I_d = P \text{ máx día } / 24 \quad (2)$$

PERIODO DE RETORNO (años)	CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO I_D (mm/h)
50	4,63
100	5,14
500	6,33

2º. Obtención de la intensidad máxima para un intervalo t_c .

La intensidad media I_t (mm/h) de precipitación a emplear en la estimación de caudales de referencia por métodos hidro-meteorológicos se podrá obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$I_t = I_d \left(I_1 / I_d \right)^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{28^{0.1} - 1}} \quad (13)$$

Donde:

I_d = Intensidad media diaria = P diaria / 24

I_1 = Intensidad media en la hora más lluviosa de ese día. En la fórmula se introduce el valor de I_1 / I_d observado directamente del mapa que se mostrará más adelante.

t = periodo de tiempo (horas) para el que se quiere evaluar la intensidad. Este valor se tomará igual al tiempo de concentración (t_c).

I_t = Intensidad media en el periodo t

Simplificando la fórmula anterior, se obtiene que:

$$I_t = I_d \left(I_1 / I_d \right)^{3.5287 - 2.5287*t^{0.1}} \quad (14)$$

Para el cálculo de t (periodo de tiempo –en horas– para el que se quiere evaluar la intensidad), en el caso normal de cuencas, en las que predomine el tiempo de recorrido del flujo canalizado por una red de cauces definidos, el tiempo de concentración t_c (horas) relacionado con la intensidad media de la precipitación se podrá deducir de la siguiente fórmula:

$$t_c = 0.3 * [(L/J^{1/4})^{0.76}] \quad (15) \quad \text{donde: } L(\text{Km}): \text{ longitud del cauce principal} \\ J (\text{m/m}): \text{ pendiente media}$$

Siendo la longitud del cauce principal de la cuenca, **3,10 Km** y la pendiente media de ésta **0,13%** (0,001327889), se obtiene que:

$t_c = 2,5$ horas

Respecto al valor del coeficiente I_1 / I_d (I_1 = Intensidad en una hora; I_d = Intensidad de un día), éste se tomará a partir del mapa adjunto (MOPU, 1990):



Así, para la zona de estudio $I_1 / I_d = 8$

Así, recopilando los siguientes parámetros, y aplicando la fórmula 11, se obtiene los valores de I_t para ambas cuencas:

- $I_1 / I_d = 8$
- $t_c = 2,5$ horas
- I_d (en la tabla siguiente)

PERIODO DE RETORNO (años)	CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO I_D (mm/h)
50	4,63
100	5,14
500	6,33

$$I_t = I_d \left(I_1 / I_d \right)^{3.5287 - 2.5287 * t^{0.1}}$$

PERIODO DE RETORNO (años)	CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO
	I_T (mm/h)
50	22,39
100	24,87
500	30,58

3.3. Cálculo del Coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía define la proporción de la componente superficial de la precipitación de intensidad I , y depende de la razón entre la precipitación diaria P_d correspondiente al periodo de retorno y el umbral de escorrentía P_0 a partir del cual se inicia ésta.

Si la razón P_d / P_0 fuera inferior a la unidad, el coeficiente C de escorrentía podrá considerarse nulo. En caso contrario, el valor de C podrá obtenerse de la fórmula siguiente:

$$C = \frac{(x - 1) * (x + 23)}{(x + 11)^2} \quad (16) \quad \text{donde: } x = P_d / P_0$$

El umbral de escorrentía P_0 se podrá obtener de la tabla 1,2 y 3 (en función de los Usos y clasificación de la tierra; o en función del Tipo de terreno); multiplicando los valores en ella contenidos por el coeficiente corrector, el cual se contempla en el mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía.

Este coeficiente refleja la variación regional de la humedad habitual en el suelo al comienzo de aguaceros significativos, e incluye una mayoración (del orden del 100%) para evitar sobrevaloraciones del caudal de referencia a causa de ciertas simplificaciones del tratamiento estadístico del método

hidrometeorológico, el cual ha sido contrastado en distintos ambientes de la geografía española.

Así, para el uso de la tabla 1, los suelos se clasificarán en los grupos de la tabla 2, en cuya definición interviene la textura definida por la figura de diagrama triangular. La tabla 3 también se utiliza en el cálculo de P_0 .

Tabla 1: **Estimación inicial del umbral de escorrentía P_0 (mm)**
(Respecto a los Usos y clasificación de la tierra)

Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	≥ 3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	< 3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	≥ 3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	< 3	R/N	28	19	14	11
Cultivos de invierno	≥ 3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	< 3	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	< 3	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	< 3	R/N	47	25	16	13
Praderas	≥ 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy buena	*	41	22	15
	< 3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
		Buena	*	*	22	14
		Muy buena	*	*	25	16
Plantaciones regulares	≥ 3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15

aprovechamiento forestal	< 3	Pobre	*	34	19	14
		Media	*	42	22	15
		Buena	*	50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc).		Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Muy espesa	*	65	43	33

Notas:

1. **N**: denota cultivo según las curvas de nivel.
R: denota cultivo según la línea de máxima pendiente.
2. * : denota que esa parte de cuenca debe considerarse inexistente a efectos de cálculo de caudales de avenida.
3. Las zonas abancaladas se incluirán entre las de pendiente menor del 3 %.

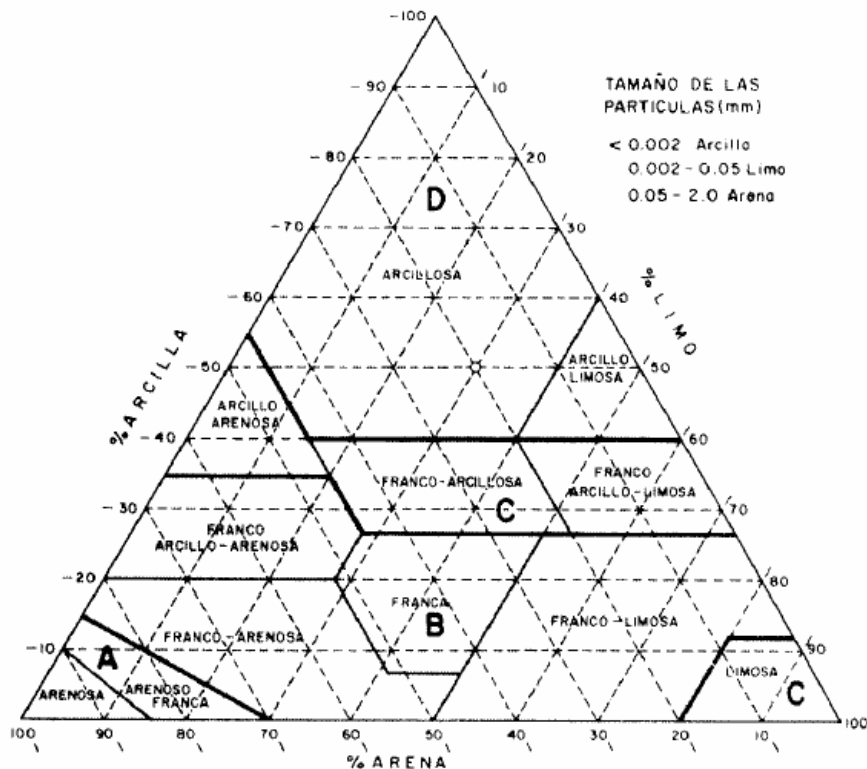
Tabla 2: **Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía**

Grupo	Infiltración (cuando están muy húmedos)	Potencia	Textura	Drenaje
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillosa-arenosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla		Pobre o muy pobre

Tabla 3: **Estimación inicial del umbral de escorrentía P_0 (mm)**
(Respecto al tipo del terreno)

Tipo de terreno	Pendiente (%)	Umbral de escorrentía (mm)
Rocas permeables	≥ 3	3
	< 3	5
Rocas impermeables	≥ 3	2
	< 3	4
Firmes granulares sin pavimento		2
Adoquinados		1.5
Pavimentos bituminosos o de hormigón		1

Diagrama triangular para determinación de la textura



Mapa del coeficiente corrector del umbral de escorrentía



La cuenca se divide a su vez en distintas áreas que tienen un valor P_0 determinado, el cual se multiplicará por el coeficiente corrector del umbral de escorrentía (indicado en el mapa anterior)

Cuenca de Las Aletas

Características fisiográficas (Vegetación/cultivo + tipo de suelo + pendientes)	Superficie (ha)	P_0 (mm)	Ocupación (%)
Salinas y marismas, pte<3, suelo B	455,56	0	0,86396996
Praderas, pte<3, características hidrológicas media, suelo C	354,09	10	0,13603004
Valor medio inicial ponderado P_0 1,36030037			

El valor, igual a cero, P_0 en salinas y marismas se encuentra determinado a partir del artículo "Propuesta metodológica para la adaptación del parámetro del número de curva a las nuevas fuentes de datos", realizado por Montserrat Ferrer Julia, Javier Blanco y Joaquín Ramírez.

Así, los autores Smith, P. N. y Maidment, D. R. (1995. Hydrologic data development system. Center of Research in Water Resources) consideran que los humedales, zonas pantanosas y marismas son áreas completamente impermeables, es decir, que el valor de umbral de escorrentía que se les debería asignar es 0 ya que todo lo que precipita en ellas se convierte en escorrentía. Así, dada las características del medio físico, se ha considerado este valor para las áreas de salinas y marismas que se localizan en el ámbito de las Aletas.

Aplicando un factor correcto de P_0 según la Instrucción (DGC, 1990), de 2.80, el resultado del umbral de escorrentía real medio es de **3,80884103 mm**

Luego:

$$x \text{ (PR 50 años)} = P_d \text{ (PR 50 años)} / P_0 = 29,19436997$$

$$x \text{ (PR 100 años)} = P_d \text{ (PR 100 años)} / P_0 = 32,41819614$$

$$x \text{ (PR 500 años)} = P_d \text{ (PR 500 años)} / P_0 = 39,86548449$$

Aplicando la fórmula (16), se obtiene que:

$$C \text{ (PR50)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,910868331}$$

$$C \text{ (PR100)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,92361309}$$

$$C \text{ (PR500)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,944343471}$$

3.4. Cálculo de Caudales de crecida extraordinaria.

Cuenca de Las Aletas

- **Periodo de retorno de 50 años**

Las intensidades horarias media diaria (I_d), máxima diaria (I_1) y máxima para t_c (I_t), resultantes para el periodo de retorno de 500 años (empleando el valor de $I_1 / I_d = 8$ y las fórmulas de la Instrucción, DGC, 1990) son:

Crecida extraordinaria	I_d (mm/h)	I₁ / I_d (mm/h)	t_c (h)	I_t (mm/h)
T = 500 años	4,63	8	2,5	22,39

El coeficiente de escorrentía (**C**) obtenido por la fórmula (16) de la Instrucción (DGC, 1990) es de **0,910868331** para la crecida de T = 50 años.

La aplicación final de la fórmula del método racional, según la Instrucción (DGC, 1990) ofrece finalmente los siguientes resultados de caudales punta (Q_p) para la crecida extraordinaria de 500 años de periodo de retorno:

$$Q = (C * I * A)/3$$

C (adimensional)	I (mm/h)	A (Km ²)	Q_p (m ³ /s)
0,910868331	22,39	5,27	35,85

Con la modificación de Témez (1991), se introduce un coeficiente corrector K, por lo cual los resultados diferirán en cierto grado. Así, como ya se ha comentado al inicio del estudio, K es un coeficiente que depende de las unidades en que se expresen Q y A, y que incluye un aumento del 20% en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. Su valor se encuentra determinado por la siguiente tabla:

Q en	A en		
	Km ²	ha	m ²
m ³ /s	3	300	3.000.000
l/s	0.003	0.3	3.000

Sin embargo también se puede calcular el coeficiente de uniformidad K, al considerarse que la precipitación neta no es uniforme en el tiempo (a lo largo del tiempo de concentración de la cuenca); esto mismo genera un error que puede corregirse con este coeficiente:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

donde: t_c = tiempo de concentración en horas
(calculado anteriormente)

Partiendo de un valor de $t_c = 2,5$, se obtiene un valor de k igual a **1,18315236**

Luego, considerando todos estos aspectos, se obtiene que:

C (adimensional)	I (mm/h)	A (Km ²)	K (adimensional)	Q_p (m ³ /s)
0,910868331	22,39	5,27	1,18315236	42,42

- **Periodo de retorno de 100 años**

Las intensidades horarias media diaria (I_d), máxima diaria (I_1) y máxima para t_c (I_t), resultantes para el periodo de retorno de 100 años (empleando el valor de $I_1 / I_d = 8$ y las fórmulas de la Instrucción, DGC, 1990) son:

Crecida extraordinaria	I_d (mm/h)	I₁ / I_d (mm/h)	t_c (h)	I_t (mm/h)
T = 100 años	5,14	8	2,5	24,87

El coeficiente de esorrentía (**C**) obtenido por la fórmula (16) de la Instrucción (DGC, 1990) es **0,92361309** de para la crecida de T = 100 años.

La aplicación final de la fórmula del método racional, según la Instrucción (DGC, 1990) ofrece finalmente los siguientes resultados de caudales punta (Q_p) para la crecida extraordinaria de 100 años de periodo de retorno:

$$Q = (C * I * A) / 3$$

C (adimensional)	I (mm/h)	A (Km ²)	Q_p (m ³ /s)
0,92361309	24,87	5,27	40,37

Con la modificación de Témez (1991), se introduce un coeficiente corrector K, por lo cual los resultados diferirán en cierto grado. Así, como ya se ha comentado al inicio del estudio, K es un coeficiente que depende de las unidades en que se expresen Q y A, y que incluye un aumento del 20% en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. Su valor se encuentra determinado por la siguiente tabla:

Q en	A en		
	Km ²	ha	m ²
m ³ /s	3	300	3.000.000
l/s	0.003	0.3	3.000

Sin embargo también se puede calcular el coeficiente de uniformidad K, al considerarse que la precipitación neta no es uniforme en el tiempo (a lo largo del tiempo de concentración de la cuenca); esto mismo genera un error que puede corregirse con este coeficiente:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

donde: t_c = tiempo de concentración en horas
(calculado anteriormente)

Al igual que en el caso anterior, partiendo de un valor de $t_c = 2,5$, se obtiene un valor de k igual a **1,18315236**.

Luego, considerando todos estos aspectos, se obtiene que:

C (adimensional)	I (mm/h)	A (Km ²)	K (adimensional)	Q _p (m ³ /s)
0,92361309	24,87	5,27	1,18315236	47,76

- **Periodo de retorno de 500 años**

Las intensidades horarias media diaria (I_d), máxima diaria (I_1) y máxima para t_c (I_t), resultantes para el periodo de retorno de 50 años (empleando el valor de $I_1 / I_d = 8$ y las fórmulas de la Instrucción, DGC, 1990) son:

Crecida extraordinaria	I_d (mm/h)	I_1 / I_d (mm/h)	t_c (h)	I_t (mm/h)
T = 50 años	6,33	8	2,5	30,58

El coeficiente de escorrentía (**C**) obtenido por la fórmula (16) de la Instrucción (DGC, 1990) es de **0,944343471** para la crecida de T = 500 años.

La aplicación final de la fórmula del método racional, según la Instrucción (DGC,1990) ofrece finalmente los siguientes resultados de caudales punta (Q_p) para la crecida extraordinaria de 50 años de periodo de retorno:

$$Q = (C * I * A)/3$$

C (adimensional)	I (mm/h)	A (Km ²)	Q_p (m ³ /s)
0,944343471	30,58	5,27	50,75

Con la modificación de Témez (1991), se introduce un coeficiente corrector K, por lo cual los resultados diferirán en cierto grado. Así, como ya se ha comentado al inicio del estudio, K es un coeficiente que depende de las unidades en que se expresen Q y A, y que incluye un aumento del 20% en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. Su valor se encuentra determinado por la siguiente tabla:

Q en	A en		
	Km ²	ha	m ²
m ³ /s	3	300	3.000.000
l/s	0.003	0.3	3.000

Sin embargo también se puede calcular el coeficiente de uniformidad K, al considerarse que la precipitación neta no es uniforme en el tiempo (a lo largo del tiempo de concentración de la cuenca); esto mismo genera un error que puede corregirse con este coeficiente:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14}$$

donde: t_c = tiempo de concentración en horas
(calculado anteriormente)

Al igual que en el primer caso y el anterior, partiendo de un valor de $t_c = 2,5$, se obtiene un valor de **k** igual a **1,18315236**

Luego, considerando todos estos aspectos, se obtiene que:

C (adimensional)	I (mm/h)	A (Km ²)	K (adimensional)	Q_p (m ³ /s)
0,944343471	30,58	5,27	1,18315236	60,05

3.5. Cálculo de Caudales de crecida extraordinaria tras la ejecución del Plan Especial.

En el caso de la Situación futura del ámbito tras la ejecución del Plan Especial de ALETAS, que implica la impermeabilización de buena parte del suelo mediante pavimento, la cuenca de ésta se divide a su vez en distintas áreas que tienen un valor P_0 determinado, el cual se multiplicará por el coeficiente corrector del umbral de escorrentía (indicado en el mapa anterior).

Cuenca de Las Aletas

Características fisiográficas (Vegetación/cultivo + tipo de suelo + pendientes)	Superficie (ha)	P₀ (mm)	Ocupación (%)
Salinas y marismas, pte<3, suelo B	242	0	0,45983033
Parcelas industriales y viario principal estructurante. (Pavimentos bituminosos o de hormigón)	284,82	1	0,54016967
Valor medio inicial ponderado P ₀ 0,54016967			

El valor, igual a cero, P_0 en salinas y marismas se encuentra determinado a partir del artículo "Propuesta metodológica para la adaptación del parámetro del número de curva a las nuevas fuentes de datos", realizado por Montserrat Ferrer Julia, Javier Blanco y Joaquín Ramírez.

Así, los autores Smith, P. N. y Maidment, D. R. (1995. Hydrologic data development system. Center of Research in Water Resources) consideran que los humedales, zonas pantanosas y marismas son áreas completamente impermeables, es decir, que el valor de umbral de escorrentía que se les debería asignar es 0 ya que todo lo que precipita en ellas se convierte en escorrentía. Así, dada las características del medio físico, se ha considerado este valor para las áreas de salinas y marismas que se localizan en el ámbito de las Aletas.

Aplicando un factor correcto de P_0 según la Instrucción (DGC, 1990), de 2.80, el resultado del umbral de escorrentía real medio es de **1,51247508 mm**

Luego:

$$x \text{ (PR 50 años)} = P_d \text{ (PR 50 años)} / P_0 = 73,51969992$$

$$x \text{ (PR 100 años)} = P_d \text{ (PR 100 años)} / P_0 = 81,63820813$$

$$x \text{ (PR 500 años)} = P_d \text{ (PR 500 años)} / P_0 = 100,3925914$$

Aplicando la fórmula (16), se obtiene que:

$$C \text{ (PR50)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,979842039}$$

$$C \text{ (PR100)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,983220377}$$

$$C \text{ (PR500)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,988394874}$$

Así, en el Estudio de Inundabilidad de Las Aletas, los datos referentes al cálculo del Coeficiente de escorrentía eran los siguientes:

Características fisiográficas (Vegetación/cultivo + tipo de suelo + pendientes)	Superficie (ha)	P_0 (mm)	Ocupación (%)
Salinas y marismas, pte<3, suelo B	455,56	0	0,86396996
Praderas, pte<3, características hidrológicas media, suelo C	354,09	10	0,13603004
Valor medio inicial ponderado P_0 1,36030037			

Aplicando un factor correcto de P_0 según la Instrucción (DGC, 1990), de 2.80, el resultado del umbral de escorrentía real medio es de **3,80884103 mm.**

Luego:

$$x \text{ (PR 50 años)} = P_d \text{ (PR 50 años)} / P_0 = 29,19436997$$

$$x \text{ (PR 100 años)} = P_d \text{ (PR 100 años)} / P_0 = 32,41819614$$

$$x \text{ (PR 500 años)} = P_d \text{ (PR 500 años)} / P_0 = 39,86548449$$

Aplicando la fórmula (16), se obtiene que:

$$C \text{ (PR50)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,910868331}$$

$$C \text{ (PR100)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,92361309}$$

$$C \text{ (PR500)} = [(x - 1) * (x + 23) / (x + 11)^2] = \mathbf{0,944343471}$$

Se observa, por tanto un aumento del Coeficiente de escorrentía (para los periodos de retorno indicados) en la situación futura respecto a la situación actual del ámbito. Este aumento se explica al aumentar, en todo el ámbito, las superficies con valores de P_o (Estimación inicial del umbral de escorrentía) bajos (0 a 1), dando lugar a una mayor escorrentía del ámbito, y por tanto, a dicho aumento del Coeficiente de escorrentía C .

En la situación actual, existe un porcentaje relativamente significativo de superficie ocupada por praderas (13,60% de la superficie total de Las Aletas) que presenta una valor de P_o igual a 10, dando lugar a una escorrentía alta pero menor, si se compara con la situación futura del ámbito (con toda la superficie con valores de P_o bajos, como ya se ha comentado).

Luego, la inclusión de estos valores de Coeficiente de escorrentía en la fórmula principal para el cálculo de caudales extraordinarios ($Q = [(A \cdot I \cdot C) / 3] \cdot K$), supone un ligero aumento de los valores obtenidos en la situación actual.

$$Q = [(C \cdot I \cdot A) / 3] \cdot K \quad (1)$$

- donde:
- Q = caudal de referencia en el punto en que desagüe una cuenca o superficie. (Unidad m^3/s).
 - C = coeficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie drenada, típicamente 0,2 a 0,7. (Unidad adimensional).
 - I = intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración. (Unidad mm/h).
 - A = superficie de la cuenca. (Unidad Km^2).
 - K = coeficiente dependiente de las unidades en que se expresen Q y A , y que incluye un aumento del 20% en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. (Unidad adimensional).

De todos estos parámetros, sólo cambiarían los relativos a coeficientes de escorrentía calculados arriba; el resto presentan valores exactamente idénticos a los obtenidos en el estudio de la situación actual. Así, los caudales extraordinarios para la Situación futura en el ámbito de Las Aletas son:

Q_p (PR = 50 años)	45,63 m^3/s
Q_p (PR = 100 años)	50,84 m^3/s
Q_p (PR = 500 años)	62,85 m^3/s

3.6. Cálculo del volumen a desaguar en la cuenca para el tiempo de concentración considerado.

Para el cálculo del volumen a desaguar por la cuenca de Las Aletas, deben considerarse factores como son el caudal extraordinario, o de crecida extraordinaria, más limitante (para el periodo de retorno de 500 años, en este caso) y el tiempo de concentración de la cuenca.

El tiempo de concentración se define como el tiempo transcurrido desde que la precipitación cae en el punto más alejado de la salida –tuberías de desagüe del caño de La Marina– hasta que llega a esta. Como ya se ha visto anteriormente, este tiempo se determina en función de ciertas características geográficas y topográficas de la cuenca.

De este modo, el volumen máximo a desaguar vendrá dado por la expresión:

$$\text{Volumen a desaguar cuenca Las Aletas} = t \text{ cont (seg)} * Q \text{ extraord (m}^3\text{/seg)}$$

Donde:

t conc: Tiempo de concentración considerado en segundos. Para la cuenca de Las Aletas, el tiempo de concentración determinado es de 2,497 horas, equivalente a 8.989,635 segundos.

Q extraord: Caudal extraordinario o de crecida extraordinaria (limitante) para el periodo de retorno considerado. En este caso, debe de considerarse, concretamente, el caudal extraordinario para un periodo de retorno de 500 años, tras la ejecución del Plan Especial.

Así:

Periodo de retorno (años)	Caudales de crecida extraordinaria (m ³ /seg)	
	Actualidad	Tras la ejecución del plan especial de Las Aletas
50	42,42	45,63
100	47,76	50,84
500	60,05	62,85

	Volumen a desaguar (m ³) en la cuenca para el tiempo de concentración $t_c = 2,49712102$ h	
	Actualidad	Tras ejecución P.E. Las Aletas
t cont (seg)* Q extraord PR50 (m ³ /seg)	381.317,46	410.191,98
t cont (seg)* Q extraord PR100 (m ³ /seg)	429.349,45	457.058,41
t cont (seg)* Q extraord PR500 (m ³ /seg)	539.832,48	565.014,40

Luego, el volumen a desaguar por precipitaciones y caudales máximos, para un periodo de retorno de 500 años y tiempo de concentración de la cuenca de 2,497 horas, se estima en, aproximadamente, **565.015 m³**.

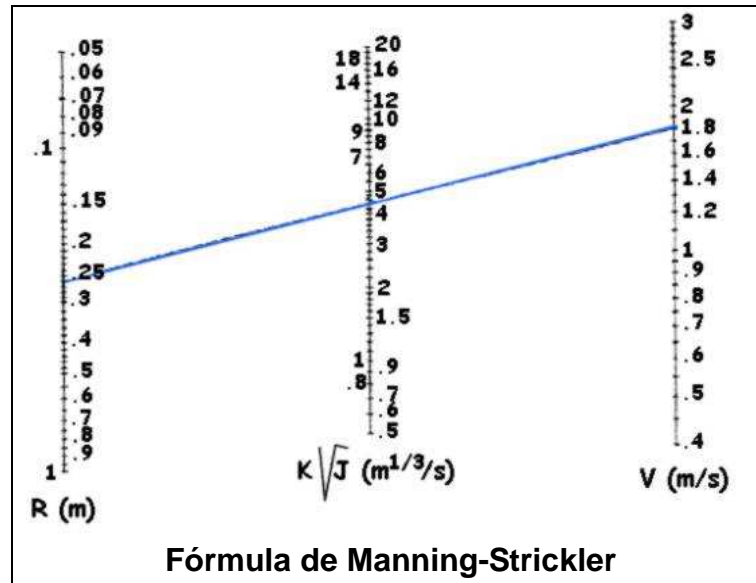
4. ESTUDIO HIDRÁULICO.

En todo punto de la red de drenaje superficial de la plataforma y sus márgenes deberá cumplirse que, para el caudal de referencia (en este caso, los caudales extraordinarios para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años) a éstos correspondientes, tanto el calado como la velocidad de la corriente a él asociada respeten las limitaciones funcionales exigidas, respecto a la velocidad de la corriente, nivel del agua y la sobreelevación del nivel de la corriente.

En relación con la capacidad de desagüe, se deberá distinguir entre elementos lineales (caces, cunetas y colectores) y elementos puntuales (sumideros e imbornales). En los primeros resulta determinante el rozamiento con las paredes del cauce o conducto, y podrá aplicarse, salvo justificación en contrario, la fórmula de Manning-Strickler. Los segundos podrán asimilarse a vertederos u orificios, según los casos. En una red de drenaje superficial, los calados de elementos contiguos deberán resultar compatibles: las insuficiencias de capacidad de desagüe de unos repercutirán en aumentos del calado en otros.

Fórmula de Manning-Strickler

Para llevar a cabo el estudio hidráulico del caño de la Marina, se ha recurrido a la metodología dispuesta en la Instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial” (DGC, 1990), que para estimar la capacidad de desagüe en elementos donde la pérdida de energía sea debida al rozamiento con cauces o conductos de paredes rugosas en régimen turbulento se utilizará la fórmula de Manning-Strickler.



Se han realizado dos cálculos para la determinación de los caudales hidráulicos en las diferentes secciones (de los caños principales y secundarios en el ámbito) a partir de las la Fórmula de manning-Strickler (Formulación tipo “A” según la Instrucción de carreteras 5.2-IC “Drenaje superficial” (DGC, 1990) y Formulación tipo “B” según la metodología para la resolución de alturas de inundación aproximadas cedida por el Departamento de Geología, Universidad de Salamanca).

Formulación tipo “A”

$$Q = V * S = S * R^{2/3} * J^{1/2} * K * U$$

$$\text{Velocidad} = R^{2/3} * J^{1/2} * K * U$$

Formulación tipo “B”

$$Q = \text{Sección} * \text{Velocidad} = \text{Sección} * (1/n) * \sqrt{(R(\text{exp } 4/3) * J)}$$

$$\text{Velocidad} = (1/n) * \sqrt{(R(\text{exp } 4/3) * J)}$$

Donde:

- **V:** la velocidad media de la corriente.
- **Q:** el caudal desaguado.
- Variables con el calado:
 - **S:** el área de la sección (para cada tramo)
 - **R = S/p** (sección/perímetro mojado). Radio hidráulico, variables con el calado.
 - **p:** el perímetro mojado.
- **J:** la pendiente de la línea de energía. Donde el régimen pueda considerarse uniforme, se tomará igual a la pendiente longitudinal del elemento.
- **K:** un coeficiente de rugosidad, dado por la tabla 4.1
- **U:** un coeficiente de conversión, que depende de las unidades en que se midan Q, S y R, dado por la tabla 4.2
- **n:** parámetro de rugosidad de Manning.

En tierra desnuda:	Superficie uniforme	40 – 50
	Superficie irregular	30 – 50
En tierra:	Con ligera vegetación	25 – 30
	Con vegetación espesa	20 – 25
En roca:	Superficie uniforme	30 – 35
	Superficie irregular	20 – 30
Fondo de grava	Cajeros de hormigón	50 – 60
	Cajeros encachados	30 – 45
Encachado		35 – 50
Revestimiento bituminoso		65 – 75
Hormigón proyectado		45 – 60
Tubo corrugado	Sin pavimentar	30 – 40
	Pavimentado	30 – 50
Tubo de fibrocemento	Sin juntas	100
	Con juntas	85
Tubo de hormigón		60 – 75

Tabla 4.1: Coeficiente de rugosidad K ($m^{1/3} / s$) a utilizar en la fórmula de Manning-Strickler

Cabe comentar que las obras de drenaje transversal deberán perturbar lo menos posible la circulación del agua por el cauce natural, sin excesivas sobre-elevaciones del nivel del agua –que pueden provocar aterramientos aguas

arriba– ni aumentos de la velocidad que pueden provocar erosiones aguas abajo, pudiendo peligrar su estabilidad de no adoptarse medidas adecuadas.

Las condiciones del cauce –sin la presencia de la carretera y de sus obras de drenaje transversal- al evacuar el caudal de referencia deberán ser comprobadas, sobre todo aguas abajo, por si hubiera obstáculos o circunstancias determinantes de las cotas de agua, tales como presas, azudes, cruces de vías de comunicación, estrechamientos bruscos del cauce, confluencia con otras corrientes, etc. Así, en ausencia de tales circunstancias, y si el cauce fuera razonablemente uniforme, se podrá estimar la relación entre el nivel del agua y el caudal desaguado utilizando la fórmula anteriormente mencionada de Manning-Strickler, para la que podrán usarse los coeficientes de la tabla 4.1. Si en la sección transversal representativa del cauce se diferenciase netamente un canal principal y un cauce de avenidas, deberán estimarse por separado los caudales correspondientes a ambos, para obtener por suma el caudal total que corresponda a la cota de agua considerada.

Q	S	R	U
m ³ /s	m ²	m	1
l/s	dm ²	dm	1.000
			464.159

Tabla 4.2 Coeficiente de conversión

El cauce estudiado en la marisma de las Aletas corresponde con el caño de la Marina, que, tal como ya se ha expresado con anterioridad, es el principal canal de la zona, y el encargado de evacuar la mayor parte de las aguas de la subcuenca. Para calcular la geometría del cauce se han tomado una serie de medidas de campo en los principales canales de la zona de estudio, tanto en el caño de la Marina como los distintos cauces tributarios. Además de los datos obtenidos en el campo se ha hecho una modelización del canal principal a partir del modelo digital de detalle disponible para la marisma de las Aletas, obteniéndose en total 27 secciones tipo. Para cada sección se ha calculado, aplicando la fórmula de Manning-Strickler, el caudal que es capaz de evacuar.

Las mayores secciones se encuentran aguas abajo, una vez pasado el molino de mareas, y próximas al punto de desagüe bajo la Variante de la N-IV. Por el contrario las secciones con menor capacidad se localizan en los tramos más altos de la cuenca, en donde el canal tiene menor cota y profundidad, y el cauce es más tendido.

Los caudales obtenidos según la fórmula “A” y “B” tienen notables variaciones según se aprecia en la tabla 4.3. En la primera de ellas, donde la velocidad del flujo hidráulico es menor aparecen nueve secciones críticas en el tramo alto del caño de la Marina. Sin embargo, en la segunda de ellas, en donde la velocidad del flujo hidráulico es mayor, sólo la primera sección (determinada por la sección total de las tres tuberías de 1,75 m de diámetro) muestra dificultades para evacuar los caudales máximos. No obstante, teniendo en cuenta que es la parte alta del caño es muy probable que en ese punto no se den los caudales máximos para el periodo de recurrencia de 500 años, ya que la cuenca de recepción de caudales es pequeña.

En la figura “Capacidad de evacuación de caudales I” aparecen las secciones críticas resultado de aplicar la fórmula “A”. Según estas, el tramo alto presenta una moderada eficiencia hidráulica y tiene dificultades para evacuar los caudales para los periodos de recurrencia superiores a 100 años. Sin embargo, el tramo medio y final presentan buena capacidad para evacuar los caudales recogidos, especialmente en la zona en donde se abre y forma un amplio cauce. Por otro lado, en la figura “Capacidad de evacuación de caudales II”, resultado de aplicar la fórmula “B”, se observa un comportamiento hidráulico eficiente en todo el caño, exceptuando el punto de intercepción con la variante de la N-IV y la primera sección (determinada por la sección total de las tres tuberías de 1,75 m de diámetro) del tramo alto.

Tras el análisis hidráulico se puede manifestar que la capacidad de desagüe del caño de La Marina resulta suficiente para evacuar incluso los caudales de Crecida Extraordinaria (tras la ejecución del Plan Especial) de 500 años cifrados en $62,85 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que su capacidad supera con creces este caudal. Sin embargo esta capacidad de desagüe se ve limitada por la presencia de la variante de la N-IV que solo permite el drenaje mediante tres tubos de sólo 1,75 m de diámetro, cuyo caudal máximo se cifra en $58,34 \text{ m}^3/\text{s}$ para la fórmula “A” y $48,62 \text{ m}^3/\text{s}$ para la fórmula “B”. Debe tenerse presente que este punto no es el único que sirve para drenar el ámbito ya que se dispone de otro tubo de 1 m de diámetro en su extremo Sureste, que desagua aproximadamente un cuarto de la superficie total. Así, ambos salideros resultan suficientes para drenar las crecidas extraordinarias de 50 años (según la formulación Tipo “A” y “B” para el cálculo del caudal en la secciones mencionadas) y 100 años (solamente según la formulación Tipo “A”); no obstante, resultan insuficientes para drenar las crecidas extraordinarias de 500 años por lo que será necesario aportar medidas de corrección de este déficit.

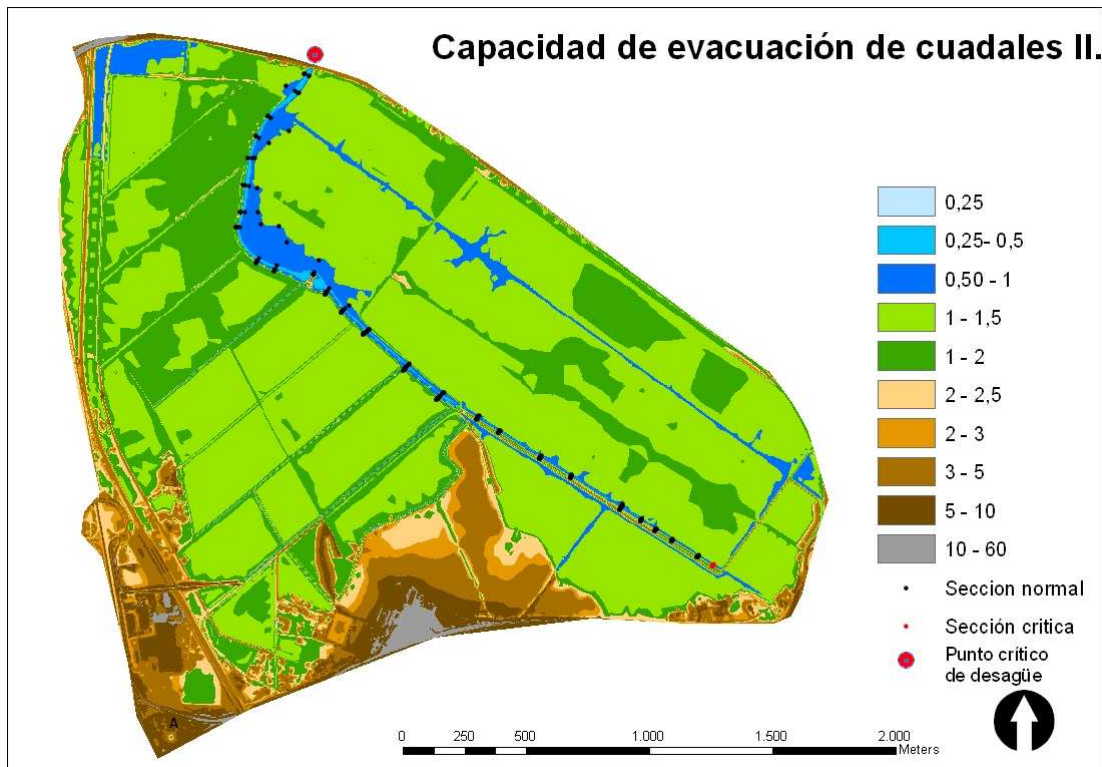
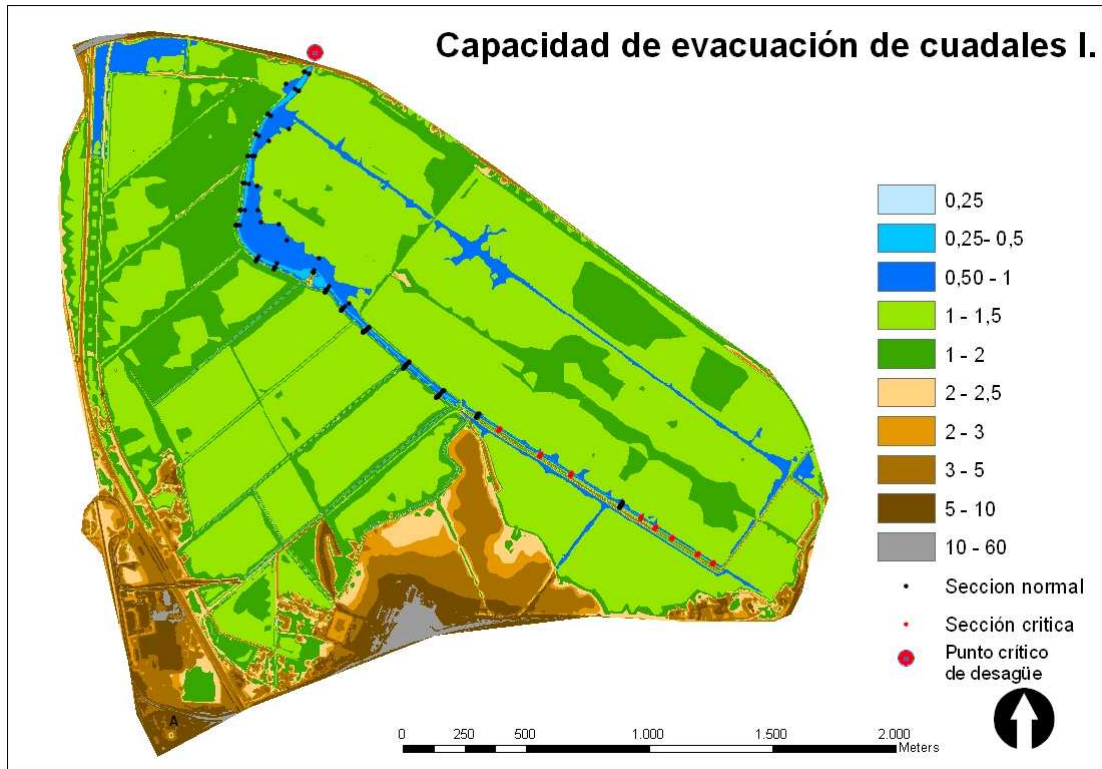
Dada la consideración de la Instrucción de carreteras como fuente oficial para el cálculo de los caudales de las secciones pertinentes, de aquí en adelante se

considerará el valor de 58,34 m³/s como el caudal límite para el salidero, en la parte Norte, del Caño de la Marina.

Se localizan, además, tres tuberías (a lo largo del límite oriental del ámbito) de 1 m de diámetro que ponen en comunicación los terrenos a ambos lados de la variante de la N-IV.

Tabla nº 4.3 Caudales máximos (m³/s)

Sección	Q "A"	Q "B"
T1	28,319	59,00
T2	40,367	84,10
T3	32,231	67,15
T4	40,673	84,74
T5	36,258	75,54
T6	100,229	208,81
T7	48,567	101,18
T8	53,147	110,72
T9	47,699	99,37
T10	89,979	187,46
T11	412,587	859,56
T12	334,443	696,76
T13	299,922	624,84
T14	127,695	212,83
T15	94,626	157,71
T16	192,687	321,15
T17	373,373	622,29
T18	504,835	841,39
T19	289,837	483,06
T20	202,381	337,30
T21	171,615	286,02
T22	88,559	147,60
T23	174,765	291,28
T24	304,412	507,35
T25	184,040	306,73
T26	70,538	117,56
3 Tuberías (1,75 m Ø cada tubería)	58,349	48,62



Es importante manifestar que la capacidad hidráulica referida tiene en cuenta exclusivamente el canal derecho de La Marina, separada por un muro de 1,5-2 m, del canal paralelo. Si se consideran ambos canales como unitarios la capacidad hidráulica del conjunto es más que suficiente para albergar los

caudales extraordinarios para cada uno de los periodos considerados. Además debe tenerse presente la existencia de un muro de 2 m a lo largo de todo el flanco izquierdo del caño, muro que protege de la inundación por desbordamiento de la porción Oeste del ámbito, forzando la laminación en la porción Este.

De la misma manera funciona el caño que drena el sector derecho de la marisma, que aunque presenta un comportamiento hidráulico eficiente, se encuentra con un punto de evacuación insuficiente (tubo de 1 m de diámetro).

En conclusión, el comportamiento hidráulico de la red de drenaje es aceptable pero los principales problemas se localizan en los tramos de conexión de los principales cauces de las Aletas con la cuenca del río San Pedro, derivados de la capacidad de evacuación limitada de las conducciones existentes en caso de afrontar avenidas extraordinarias para los periodos de retorno de 500 años. En tal situación es probable que la incapacidad de evacuación se traduzca en avenidas laterales que ocupan la zona más deprimida del ámbito, que normalmente se encuentra semiencharcada por la influencia de las mareas que entran por el Caño del Río San Pedro.

5. ESTUDIO DE INUNDABILIDAD COSTERA

La Inundación costera es un proceso por el cual se origina el desbordamiento del mar sobre la costa más arriba de la cota de marea alta. Se presenta de dos formas: a) por la aceleración elevada del nivel del mar como si se tratara de una marea rápida, aunque obedeciendo a causas diferentes a la atracción lunar que normalmente produce este fenómeno; y b) un oleaje que cabalga sobre la superficie de la elevación marítima y cuya altura va creciendo conforme se reduce el fondo marino.

Generalmente, estas condiciones extremas de oleaje vienen asociadas a los episodios de temporal. El efecto más significativo de un temporal en la zona litoral es el ascenso del nivel del mar, inducido por fuertes vientos dirigidos hacia la costa, que apilan grandes volúmenes de agua, y por las bajas presiones atmosféricas, que tienden a “bombear” verticalmente el agua actuando la superficie oceánica como un barómetro inverso. Otro factor de suma importancia es el aumento de la altura del oleaje y por tanto el aumento de la zona de alcance (*wave set-up*).

Finalmente hay que tener en cuenta la fuerte lluvia que comúnmente acompaña al temporal, de modo que el ascenso de los niveles de las aguas costeras inhibe el flujo de las precipitaciones del interior hacia el mar, lo que conlleva, como resultado, una inundación generalizada, fundamentalmente en zonas costeras asociadas a desembocaduras (estuarios y deltas).

Otro de los problemas asociados es el incremento del nivel del mar por otros factores, como el cambio climático.

Por ello, dicha cota de inundación vendrá determinada por el sumatorio de los siguientes parámetros:

- Marea astronómica
- Previsiones del aumento del nivel del mar (cambio climático, etc.)
- Influencia del oleaje
- Influencia de temporales y otros riesgos (descenso barométrico, apilamiento por viento)

5.1 Influencia por mareas. Datum y rango de mareas.

• Introducción

En España, existen varios organismos con responsabilidad en la observación del nivel del mar como Puertos del Estado (Clima Marítimo) con su red de mareógrafos REDMAR y el Instituto Español de Oceanografía (IEO).

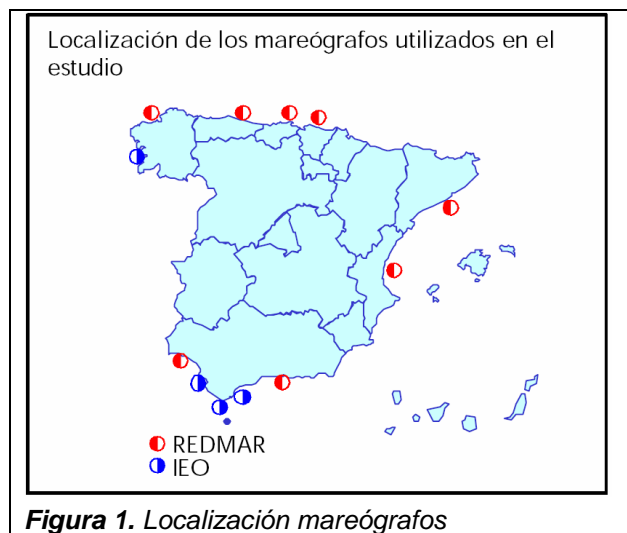
De la red REDMAR de Puertos del Estado, se dispone de:

- Constantes armónicas.
- Registros de datos horarios de nivel del mar.
- Registros de datos horarios de marea astronómica basada en el análisis armónico.
- Registros de datos horarios de residuo del análisis armónico.

Del IEO (Boletín anual 1993), se dispone únicamente de:

- Constantes armónicas.

En la Figura siguiente se presenta la localización de los mareógrafos utilizados para la realización del Atlas de Inundabilidad. Se observa que el área de Cádiz cuenta con mareógrafo del IEO.



En la siguiente figura y tabla, se determina la localización de la información instrumental junto con la información analizada, respectivamente:



MAREA ASTRONÓMICA		OLEAJE	
Mareógrafo	Cádiz	Boya	Cádiz
Situación	36°32' N 06°17' W	Situación	36°30'20"N 06°20'10"W
Período medida	1993	Profundidad	22 m
		Período medida	1992 / 1997
MAREA METEOROLÓGICA		OBSERVACIONES VISUALES	
Residuo Nivel del Mar del Mareógrafo de Huelva		Cuadrícula: 35°N - 37.1°N 5.6°W - 10°W	Período medida: 1950-1985

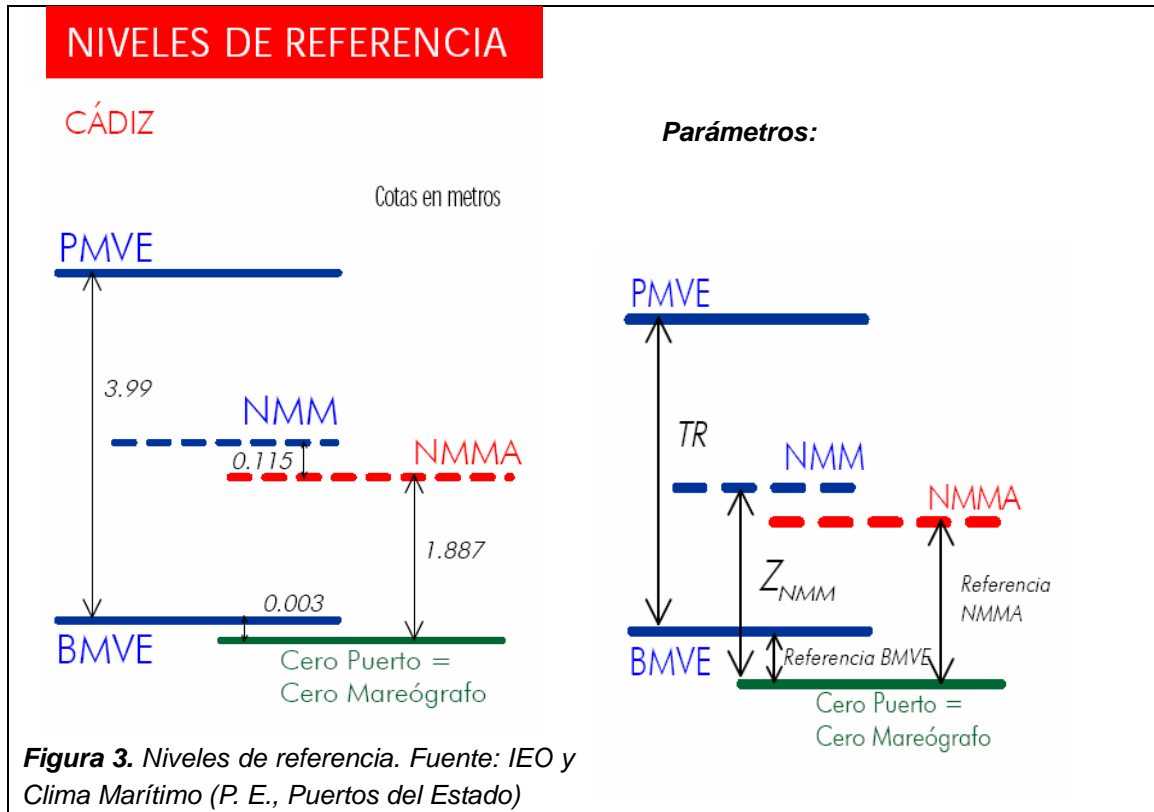
Tabla 1. Información analizada

- **Niveles de referencia**

Siempre que se hable de nivel del mar, es fundamental establecer una referencia respecto a la que se mide. Las referencias más usadas son el nivel

medio del mar en Alicante (NMMA), el cero del puerto o el cero del mareógrafo y la bajamar media viva equinoccial (BMVE).

Así, en la siguiente figura se presenta los distintos niveles de referencia para el mareógrafo de la zona de Cádiz, estableciéndose en la tabla posterior las referencias para dicho mareógrafo.



Parámetro del mareógrafo de Cádiz

Mareógrafo	Referencia NMMA	Nivel medio (Z _{NMM})	Carrera de marea (TR)	Referencia BMVE
Cádiz	-1,887	2,002	3,990	0,007

Tabla 2. Información analizada

Siendo:

Referencia NMMA: situación del cero del mareógrafo respecto al nivel medio del mar en Alicante.

Nivel medio (Z_{NMM}): situación del nivel medio respecto al cero del mareógrafo.

Carrera de marea (TR): diferencia de nivel entre la pleamar media viva equinoccial (PMVE) y la bajamar media viva equinoccial (BMVE). El valor de la

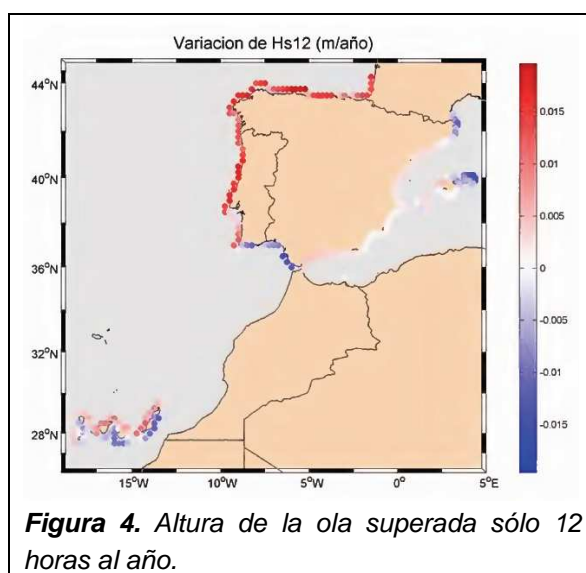
PMVE se ha calculado como la media de los niveles máximos de 50 años. La BMVE es la simétrica de la PMVE respecto al NMM.

Referencia BMVE: Situación de la BMVE respecto al cero del mareógrafo.

5.2. Previsiones sobre el aumento del nivel medio del mar.

El informe “Impactos en la costa española por efectos del cambio climático” de la estrategia española frente al cambio climático (junto con otros Estudios como el tercer informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático –IPCC–) cita para el golfo de Cádiz las siguientes repercusiones potenciales:

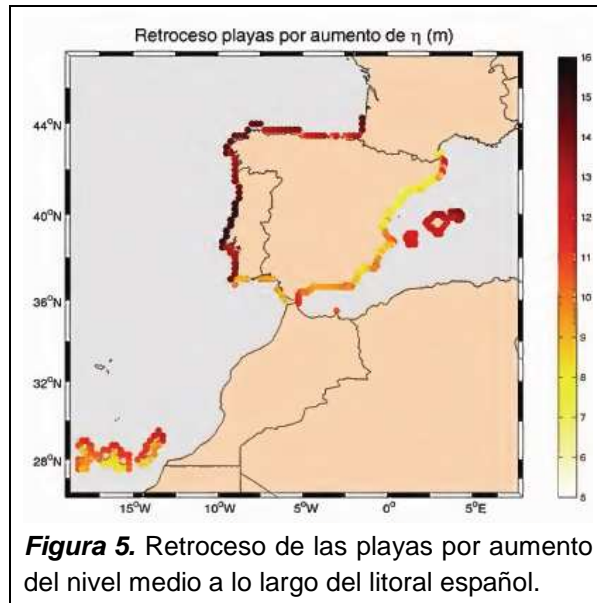
En cuanto a la subida del nivel medio del mar, a nivel global se asume que la tendencia actual de variación del mar en el litoral español es 2,5 mm/año, por lo que extrapolando al año 2050, se tendría un ascenso medio de +0,125 m. Esta información ha sido complementada con los modelos globales del tercer informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que prevén una variación del nivel del mar entre 9 y 88 cm para el periodo 1990-2100. En base a estos resultados se asume para el año 2050 un ascenso del nivel del mar en el litoral peninsular de +0,20 m.



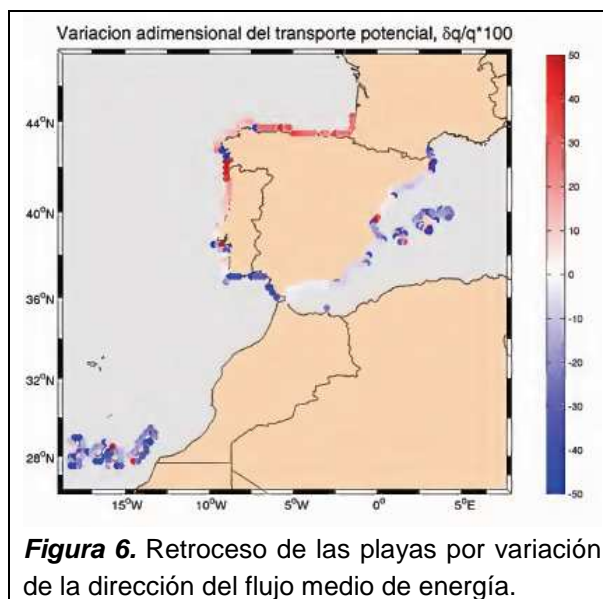
El Golfo de Cádiz presenta una tendencia negativa muy clara en energía del Oleaje, lo que confirma una tendencia a un clima marítimo más suave.

Sobre las playas, los principales impactos están asociados a la variación de la cota de inundación con el aumento del nivel medio del mar, y el retroceso de la línea de costa, que se puede ver inducido igualmente por el ascenso del nivel

medio del mar. Ello provocaría que el perfil activo de la playa tenga que ascender para llegar al equilibrio dinámico, cubriendo el déficit de arena a expensas de la playa seca y de la berma, produciéndose un retroceso de la línea de costa. En el golfo de Cádiz el retroceso de las playas sería el más bajo de la fachada atlántica ibérica, con valores comprendidos entre los 6 y los 10 m.



Otro efecto significativo es un posible cambio en el transporte potencial, que en la cornisa Cantábrica aumentaría un 30 %, mientras que en el Golfo de Cádiz se obtiene una reducción de las tasas de transporte potencial, con lo que la tasa de erosión será más lenta.



Los principales efectos en el estuario se centrarán en la afección sobre el balance sedimentario y el prisma de las mareas. Ello a su vez se traducirá en una serie de fenómenos:

- Pérdida de aportes sedimentarios en el interior de las bahías, que tenderá a restablecer el equilibrio aumentando la cota de las llanuras mareales.
- Incremento del área de la sección crítica de la desembocadura. Régimen de inundación, temperatura y salinidad en las zonas interiores de los estuarios y el avance de la cuña salina aguas adentro, desplazando los ecosistemas actuales.
- El aumento del prisma de marea generado por el aumento del nivel medio del mar, también generará modificaciones en el volumen del bajo exterior, que necesitará contener un mayor volumen de arena para restablecer la condición de equilibrio dinámico.

Dado que la zona exterior de los estuarios es la zona más activa, en cuanto a la dinámica sedimentaria se refiere, el déficit del bajo exterior será cubierto con arena disponible de las playa adyacentes, dando como resultado un retroceso adicional de la línea de costa, cuya magnitud dependerá del grado de desequilibrio generado en el bajo exterior, de la profundidad de corte del perfil de playa y de la longitud de la misma.

- Modificación del régimen de inundación, temperatura y salinidad de las zonas interiores del estuario y progresión de la cuña salina aguas arriba.
- En lo que se refiere a las marismas y zonas intermareales que conservan sus valores ecológicos cabe distinguir dos casos: si hay una costa baja adyacente estas zonas se desplazarían hacia el interior a medida que asciende el nivel marino; esto puede afectar especialmente a áreas antiguamente desecadas pero no rellenadas.

Un ascenso del nivel del mar del orden de 1 m significaría, sin embargo, la muy probable recuperación de una gran extensión de marismas abandonadas y zonas intermareales lo que representaría un impacto positivo.

5.3. Cálculo de isolíneas de cota de inundación en Playa de Levante. Metodología del atlas de inundación para el cálculo de cotas de inundación en playa abierta.

El siguiente procedimiento, para determinar cotas de inundación, se encuentra definido en el documento temático “Cota de Inundación: Atlas de Inundación en el litoral peninsular español”, elaborado por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria y editado por la Dirección General de Costas (Ministerio de Medio Ambiente).

Dicho documento forma parte de un conjunto de textos y modelos numéricos, denominados genéricamente “Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral”, que han sido desarrollados con el objetivo de:

- Evaluar con precisión la dinámica de los sistemas costeros.
- Diseñar con fiabilidad las estrategias de actuación necesarias.
- Establecer una metodología para el diseño, ejecución y seguimiento de las actuaciones a realizar en la costa.
- Recopilar la experiencia española en el campo de la Ingeniería Litoral.

Así, como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo específico de dicho documento temático es desarrollar una metodología que permita la determinación del régimen del nivel del mar, o régimen de cota de inundación, en un punto del litoral. Esta metodología es posteriormente aplicada a la base de datos instrumentales del litoral español y, con base en dichos datos, se presenta un atlas de inundación del litoral peninsular español, del cual se han tomado las tablas y gráficos pertinentes para el ámbito de estudio de Las Aletas.

1. Introducción

El régimen de inundación alcanzado por una playa por acción de la dinámica marina y meteorológica es un fenómeno especialmente complejo, tanto por el gran número de elementos que intervienen en el proceso de inundación, como por la interacción entre dichos elementos.

El fenómeno de inundación en una playa puede ser representado de acuerdo al siguiente esquema, Figura 1, en un instante determinado, la playa está caracterizada por un nivel de marea (NM) compuesto por la marea astronómica y la marea metereológica (MA+MM) y una batimetría. Sobre dicho nivel de marea se encuentra el oleaje que, en función de sus características y de la batimetría de la playa, se propaga hacia la costa. Al alcanzar la costa, el oleaje

rompe en la playa, produciéndose un movimiento de ascenso de la masa de agua a lo largo del perfil de playa *run-up* (RU). Todos estos factores están relacionados entre sí. Además de la interacción entre los elementos (oleaje batimetría- nivel de marea-ascenso), el fenómeno de la inundación presenta la complicación añadida de que algunos de los factores (oleaje, viento, etc., lo cual ocurre normalmente cuando se producen temporales) son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad.

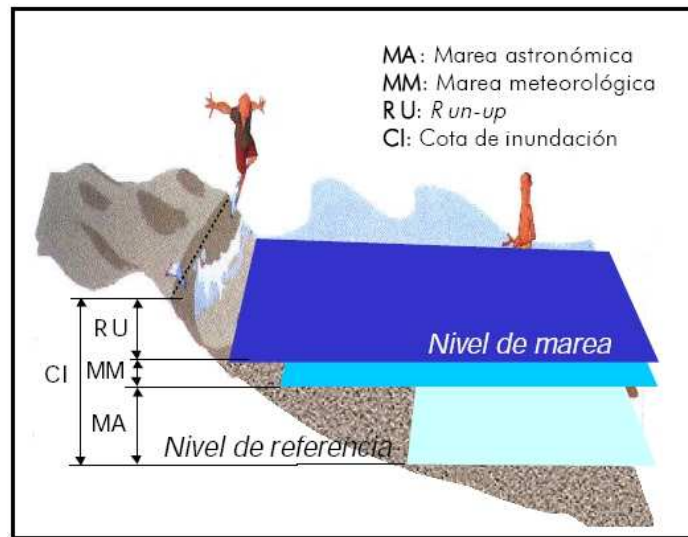


Figura 1. Factores que influyen en la inundabilidad costera

Por consiguiente, la determinación de la cota de inundación es un problema estocástico de extremos. Una de las consecuencias de que sea un problema estocástico, es que no existe un “límite determinista al que llegan las olas durante el peor temporal”, sino que cada nivel tendrá “una probabilidad de ser sobrepasado en un temporal determinado”. Por lo tanto, el objetivo que se plantea es la obtención de la función de distribución de la cota de inundación.

2. Metodología

La metodología utilizada para el cálculo del régimen de niveles de cota de inundación presentada en este documento ha consistido en la simulación del proceso físico de inundación con base en las funciones de distribución de las variables marea astronómica, marea meteorológica, altura de ola significativa y período de pico. Estas funciones de distribución se han determinado con base en la información disponible en las fuentes:

- Boyas pertenecientes a la REMRO (Red de Medida y registro del Oleaje)
- Mareógrafos pertenecientes a la REDMAR.

- Mareógrafos pertenecientes al IEO.
- Datos visuales del National Climatic Data Center de Asheville

El método de simulación se inicia con la realización de un test de independencia de las variables involucradas: marea astronómica, marea meteorológica, altura de ola significativa, período de pico. Los resultados obtenidos señalan que:

- La marea astronómica es independiente del resto de las variables. En algunos casos se ha encontrado una cierta correlación con la altura de ola significativa, si bien dicha correlación no es significativa estadísticamente.
- Existe una dependencia, en la mayor parte de las series analizadas, entre la marea meteorológica y el estado de mar (H_S).
- Existe una dependencia entre las series de alturas de ola significativa y las series de período de pico.
- Existe una dependencia entre datos consecutivos de marea meteorológica y entre datos consecutivos de oleaje.

Esta metodología aborda el cálculo del régimen (medio) y extremal de los niveles del mar y los niveles máximos esperados con periodos de retorno de 50, 100 y 150 años.

A) Régimen medio

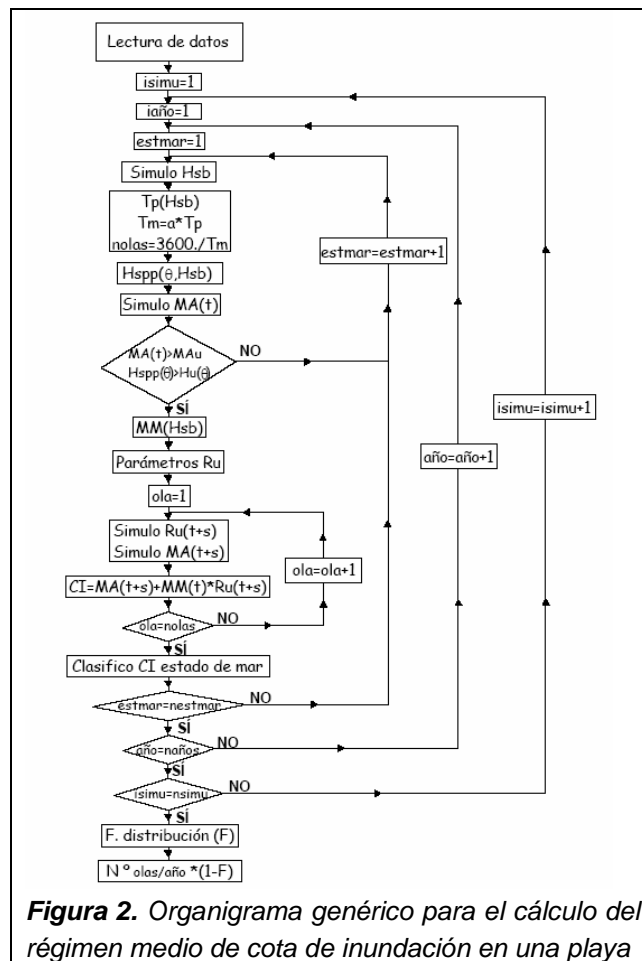
El programa que obtiene el régimen medio de cota de inundación en playas se denomina “**tcimed**”. En la figura 9 se presenta el organigrama genérico para el cálculo del régimen medio de cota de inundación en una playa.

En primer lugar se detallan las características del caso:

- Constantes armónicas.
- Referencia del cero del mareógrafo respecto al nivel medio del mar en Alicante.
- Tipo de constantes armónicas.
- Número de horas al año, número de años a simular, marea astronómica umbral, datos de número de olas por año.
- Incremento para cota de inundación, cota máxima permitida.
- Características de la dependencia entre período de pico y altura de ola significativa.
- Características del oleaje: relación entre período de pico y período medio, período medio mínimo,...

- Características de la distribución de *run-up*.
- Parámetros de los ajustes de la altura de ola significativa a pie de playa.
- Altura de ola significativa umbral (Período de retorno=500 años en la ROM 0.3-91).
- Parámetros de los ajustes de la altura de ola significativa en la boya.
- Características de la dependencia entre *SMM* y *Hsb*.

A continuación, se indica la duración del estado de mar. Para cada estado de mar, se simula aleatoriamente una H_{sb} en la boya que permanece constante en ese período de tiempo. La marea astronómica se obtiene de la serie temporal para ese instante. Si la marea astronómica o la altura de ola significativa no superan sus umbrales, se simula un nuevo estado de mar. Si los superan, se obtienen los valores de las alturas de ola significativa a pie de playa para cada dirección de propagación con idéntica probabilidad a la altura de ola significativa en la boya obtenida.



El valor de altura de ola significativa a pie de playa para una dirección determinada, nos definirá, junto con el período de pico, la distribución de *run-ups* consecutivos para el estado de mar. A partir de la altura de ola significativa

en la boya, se simulan los valores de la marea meteorológica y el período de pico. El valor del período medio se obtiene directamente a partir del período de pico. El número de olas que se van a simular dentro del estado de mar es:

$$N_{olas} = \Delta t / \bar{T}$$

Donde Δt es la duración del estado del mar y \bar{T} el período medio del oleaje.

Para cada ola del estado de mar, se obtiene un run-up condicionado al anterior y la marea astronómica que corresponde a ese instante, sumándose ambos valores al de marea meteorológica para obtener el valor de la cota de inundación.

Se simularán los estados de mar que correspondan a un período de tiempo del número de años a simular.

Con todos los datos, se procederá a introducirlos en clases de intervalo igual al incremento para cota de inundación definido anteriormente. A partir de esa clasificación, se obtiene la función de distribución del régimen medio de cota de inundación en una playa orientada en una cierta dirección en esa zona.

Para dar significado físico al resultado, se va a expresar el mismo en número de olas al año que, por término medio, superan una determinada cota. Para ello, se hace la transformación:

$$N_{horas/año} \bar{N}_{olas/hora} (1 - F)$$

Donde:

$N_{horas/año}$ es el número de horas del año, 8760.

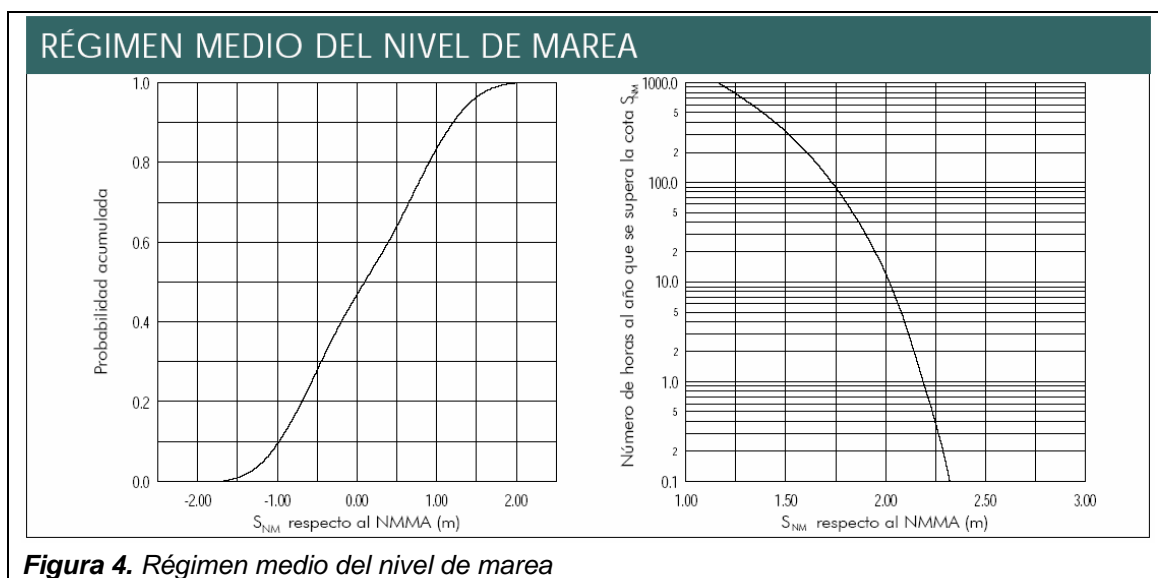
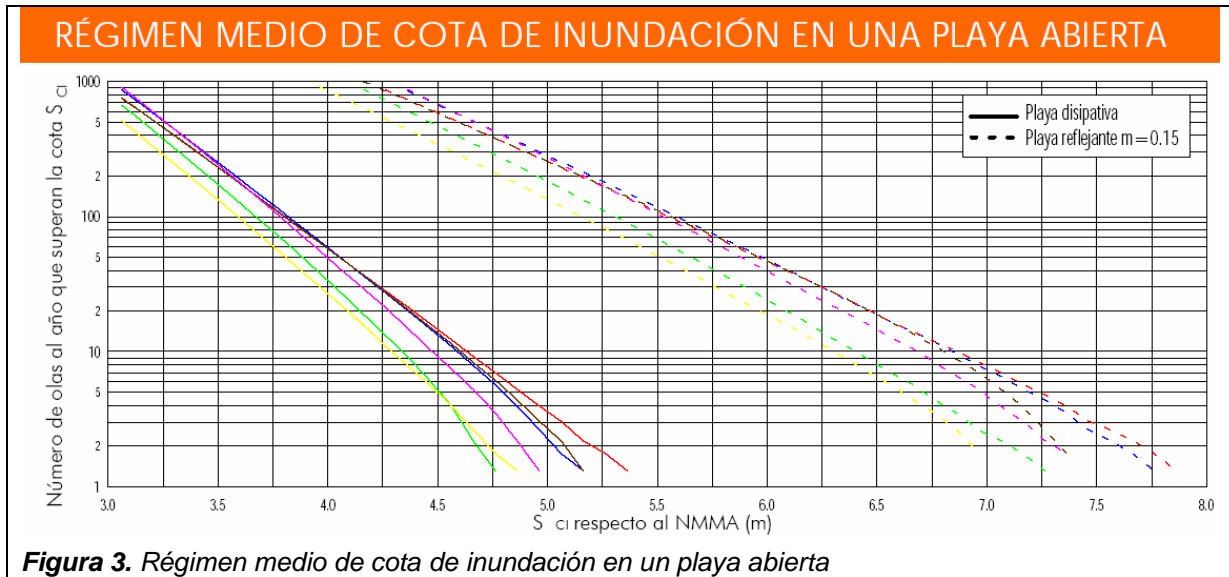
$\bar{N}_{olas/hora}$ es el número medio de olas por hora. En la tabla VI.1 se muestra el número medio de olas por hora para cada una de las boyas analizadas

($\mu = \bar{N}_{olas/hora}$) y su desviación típica (σ)

Así, para la zona de estudio:

	μ	σ
CÁDIZ	839	16,21

Así, aplicando los datos de boyas y mareógrafos de la zona de Cádiz mediante esta metodología, se obtiene las siguientes gráficas:

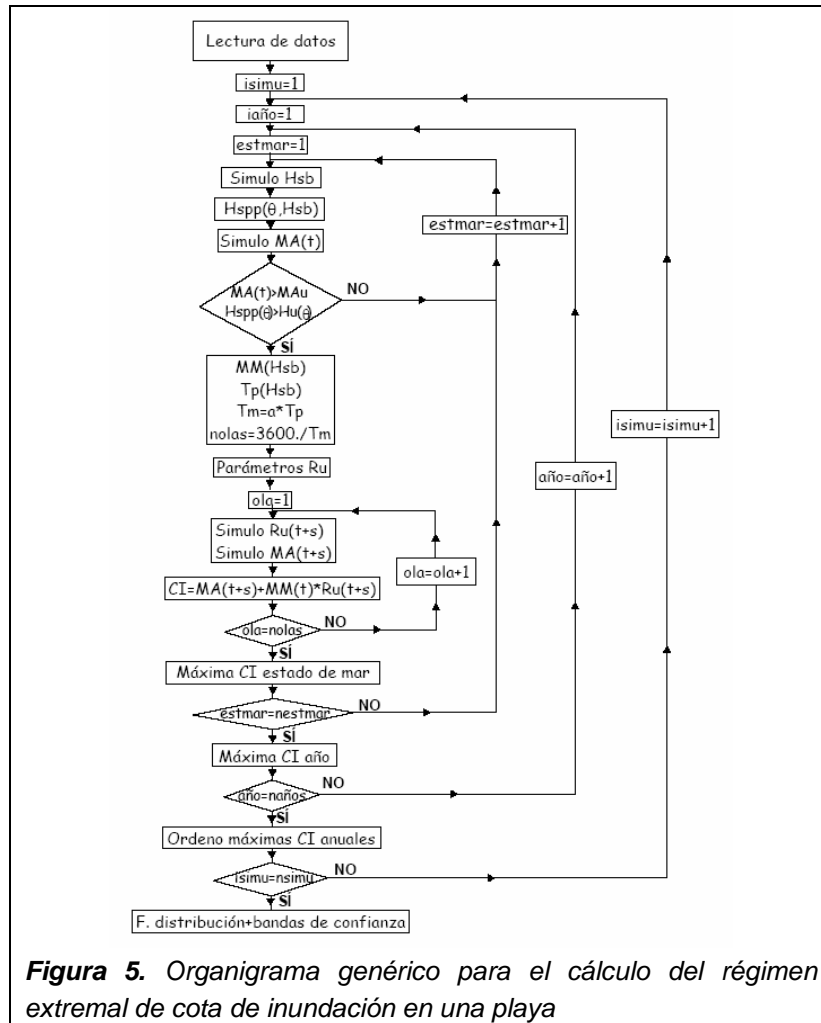


B) Régimen extremal

El programa que obtiene el régimen extremal de cota de inundación abierto se denomina "tciext". El organigrama del modelo para el cálculo del régimen extremal de cota de inundación en una playa está representado en la figura 11.

Al igual que en el caso de régimen medio, en primer lugar se den de definir las características del caso:

- Constantes armónicas.
- Referencia del cero del mareógrafo respecto al nivel medio del mar en Alicante.
- Tipo de constantes armónicas.
- Número de horas al año, número de años a simular, marea astronómica umbral, datos de número de olas por año.
- Incremento para cota de inundación, cota máxima permitida.
- Características de la dependencia entre período de pico y altura de ola.
- Características del oleaje: relación entre período de pico y período medio, período medio mínimo,...
- Características de la distribución de *run-up*.
- Parámetros de los ajustes de la altura de ola significativa a pie de playa.
- Altura de ola significativa umbral (Período de retorno=500 años en la ROM 0.3-91). Parámetros de los ajustes de la altura de ola significativa en la boya.
- Características de la dependencia entre meteorológica y altura de ola significativa.



A continuación, se realiza el mismo proceso que en el régimen medio, simulando los estados de mar que correspondan a un año y calculando el máximo anual. Se repite el mismo proceso tantas veces como número de años haya que simular.

Con los máximos anuales de cada simulación se obtiene la función de distribución del régimen extremal de cota de inundación para esa simulación.

Una vez realizadas todas las simulaciones, se obtiene, para distintos valores de probabilidad, la media y la desviación típica de los valores de cota de inundación de cada simulación que corresponden a la probabilidad. Con esos valores se obtienen la función de distribución final de régimen extremal de cota de inundación y sus bandas de confianza de la misma forma que se calculó el régimen extremal de nivel de marea. Así, para la zona de Cádiz, se obtiene:

RÉGIMEN EXTREMAL DE COTA DE INUNDACIÓN EN UNA PLAYA ABIERTA

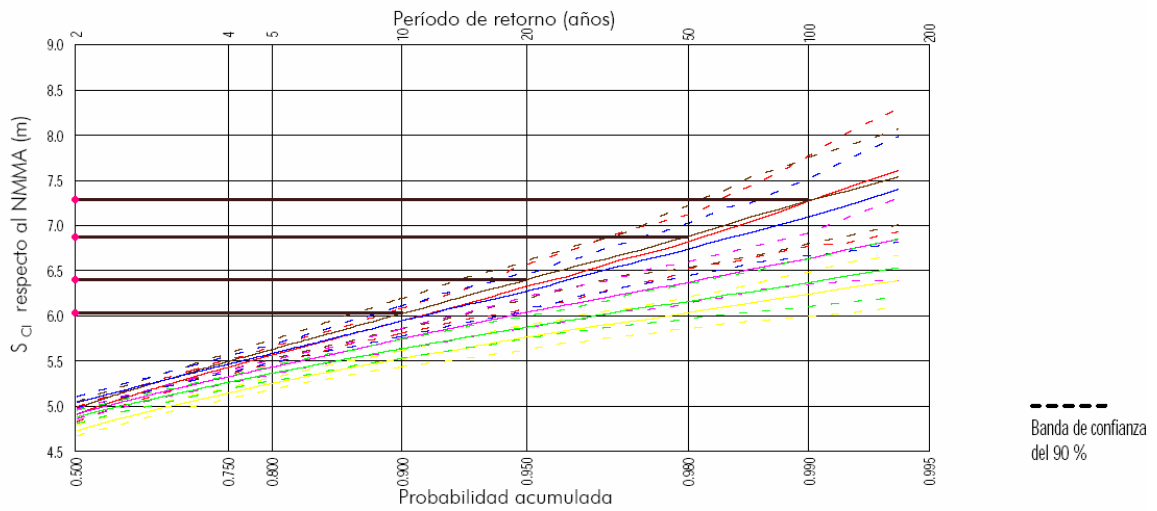


Figura 6. Régimen extremal de cota de inundación en un playa abierta

Donde:

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	S _{Ci} RESPECTO AL NMMA (M)
10	+6,02
20	+6,4
50	+6,88
100	+7,28

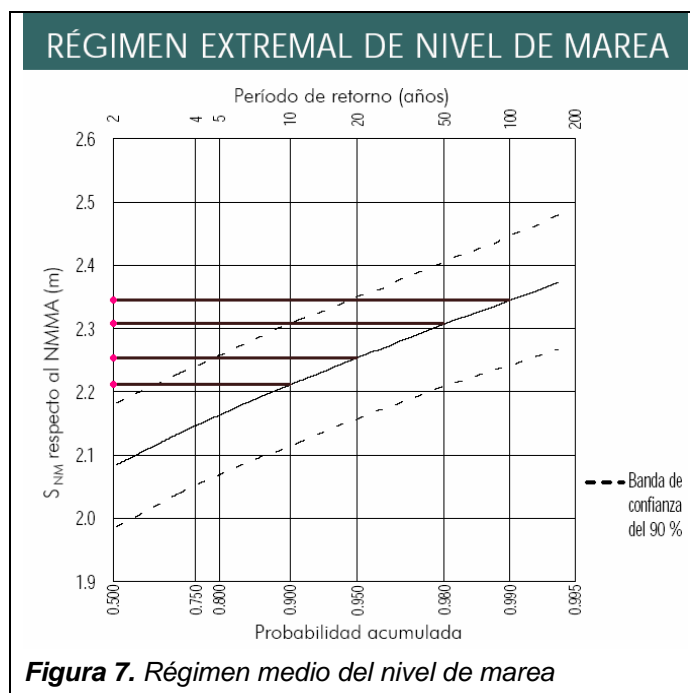


Figura 7. Régimen medio del nivel de marea

Donde:

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	S_{NM} RESPECTO AL NMMA (M)
10	2,213
20	2,253
50	2,311
100	2,347

ZONIFICACIÓN

Como resultado de la zonificación de las diferentes variables involucradas en el litoral peninsular, éste se encuentra constituido por doce zonas homogéneas. Dado que el oleaje es, en general, el fenómeno más relevante en la generación del nivel de una playa, la nomenclatura elegida en la zonificación ha sido la siguiente:

- Se utiliza la nomenclatura de “Área”, para designar las zonas de oleaje homogéneo. Estas Áreas coinciden con las utilizadas en la ROM 03-91.
- Dentro de cada Área, se establecen unas “subzonas” que recogen franjas del litoral con características de marea diferenciadas. La nomenclatura de las subzonas queda definida por una letra: (a, b, c, ...).

En la figura 15 se detallan las diferentes Áreas y subzonas analizadas, localizándose la Bahía de Cádiz en el Área IV, subzona b:

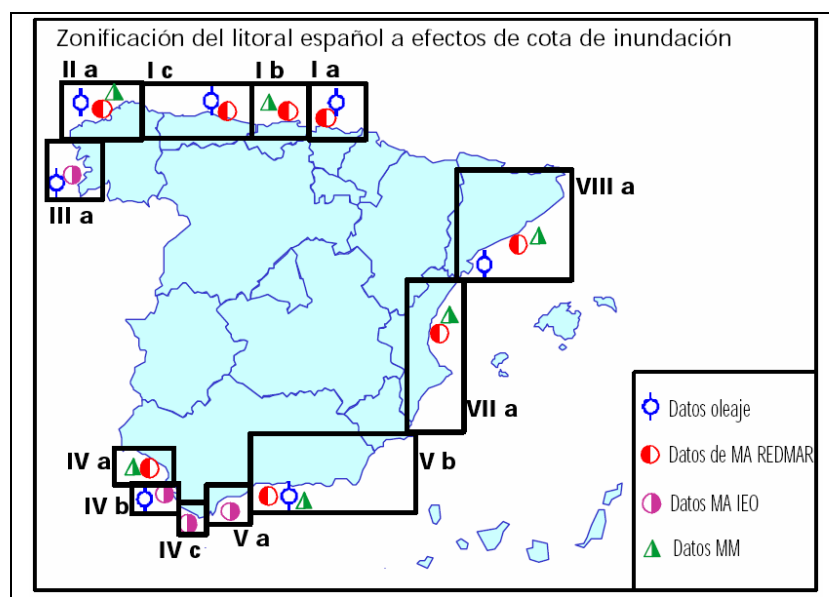


Figura 8. Zonificación del litoral español afectado por cota de inundación

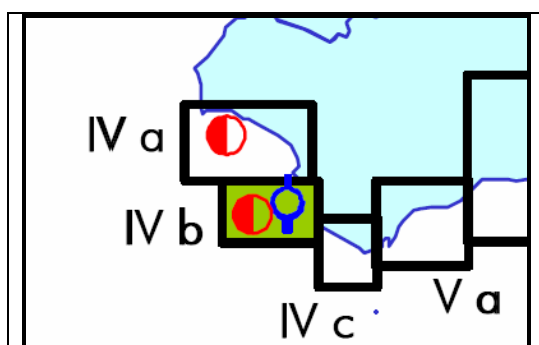


Figura 9. Zonificación específica del Área y subzona de Cádiz

Además, para cada Área del Atlas se han establecido las diferentes “direcciones significativas”, con intervalos de $22,5^{\circ}$, que sin posible en dicha área. Así, cada dirección u orientación significativa refleja la normal a las curvas batimétricas de un playa. De este modo, en cada Área del Atlas es posible evaluar la cota de inundación en playas con diferente orientación.

Para la Bahía de Cádiz, se han determinado las siguientes direcciones significativas:

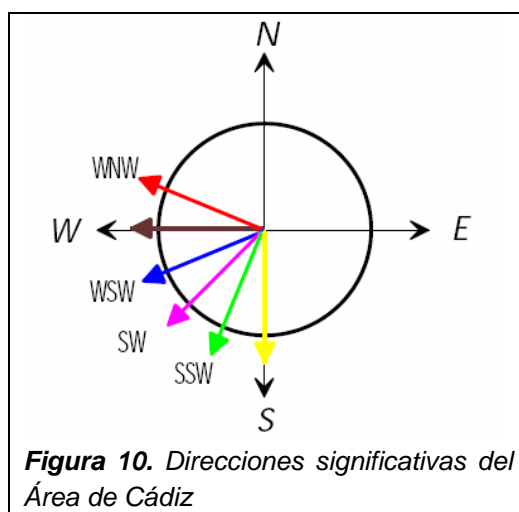


Figura 10. Direcciones significativas del Área de Cádiz

3. Consideraciones a tener en cuenta para el uso de resultados del Atlas de Inundación.

Los regímenes de inundación contenidos en el presente Atlas de Inundación constituyen una información de indudable valor para el diseño de actuaciones en el litoral. No obstante, es importante recordar que la elaboración de la

información se ha realizado con limitaciones en los datos y/o admitiendo una serie de simplificaciones que el usuario debe tener en cuenta al objeto de aplicar correctamente los resultados del Atlas. En concreto:

- La serie de datos instrumentales de mareógrafos es, hoy en día, corta. Por lo tanto, las extrapolaciones del régimen extremal del nivel de marea más allá de los 50-100 años de período de retorno, deben hacerse con cautela.
- Los regímenes de cota de inundación en playas se han realizado asumiendo que la propagación del oleaje que afecta a dicha playa puede ser calculado por la ley de Snell (batimetría recta y paralela). El usuario deberá verificar la validez de dicha hipótesis en cada playa objeto del estudio.
- La cota de inundación de la playa se obtiene bajo la hipótesis de que el talud de la misma es indefinido. En general, esto no corresponde con la realizada y a partir de una determinada cota del talud de playa cambiará y el perfil de la playa estará compuesto por una zona de berma, duna o paseo marítimo.

Al objeto de estimar de modo simplificativo la cota y/o distancia alcanzada por el *run-up* del oleaje en un talud compuesto por dos alineaciones, se recomienda utilizar la formulación de van der Meer y Janssen (1995). Esta formulación, figura 18, permite determinar el *run-up* R_u , en un perfil compuesto por dos alineaciones α y β conocido el *run-up* que tendría en la primera alineación R_{u0} (dado por el ATLAS) y las características de rugosidad y percolación de la segunda alineación.

Para obtener R_{u0} es necesario hacer una estima del nivel de marea (S_{NM}) por el cual se propaga la ola que llega a la cota (S_{CI}). En una primera aproximación, si Z_{CI} es la cota de inundación correspondiente a R años de período de retorno, se tomará como S_{NM} la correspondiente, también, a R años de período de retorno.

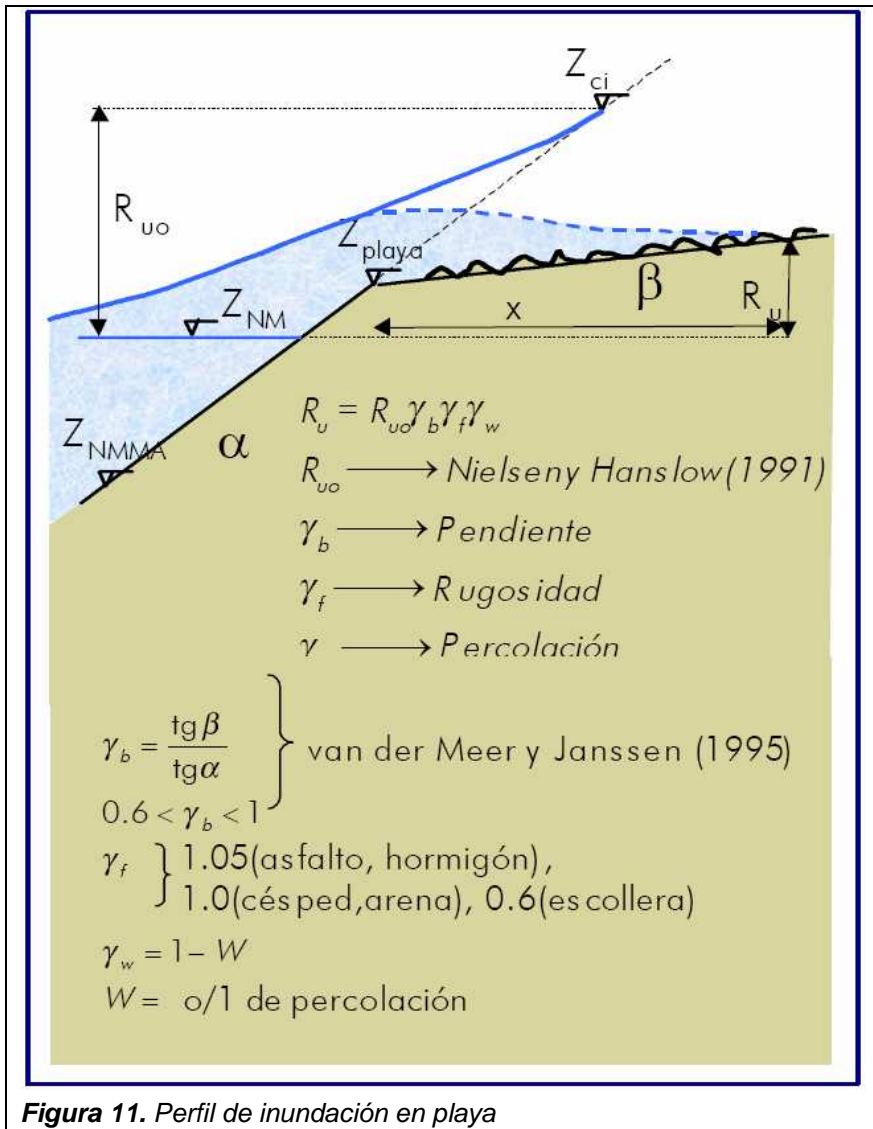


Figura 11. Perfil de inundación en playa

4. Cálculo de la Cota de Inundación en la flecha de Valdelagrana o playa de Levante.

A partir de la figura anterior (Perfil de inundación en playa) se puede estimar la distancia x que recorre la lámina de agua desde el inicio de la zona por la que discurre la carretera que atraviesa la flecha de Valdelagrana:

$$x \text{ (distancia en m)} = R_u / \text{tag } \beta$$

Donde:

Ru es el *run-up* que depende a su vez de los coeficientes de pendiente, rugosidad y percolación de (γ_b , γ_f y γ_w , respectivamente) y de **Ru_o**, determinado por la diferencia entre **S_{Cl}** (valor de la cota de inundación) y **S_{NM}** (valor del nivel del marea) para un instante dado (en esta caso, para los períodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años).

$$Ru = Ru_o * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_w$$

$$Ru_o = S_{Cl} - S_{NM}$$

Así, mediante los valores determinados en las tablas 1. y 2. del presente informe, se realizará el cálculo de **Ru_o**:

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	S _{Cl} RESPECTO AL NMMA (M)	S _{NM} RESPECTO AL NMMA (M)	RU _o (M) = S _{Cl} - S _{NM}
10	+6,02	2,213	3,807
20	+6,4	2,253	4,147
50	+6,88	2,311	4,549
100	+7,28	2,347	4,933

Respecto a los coeficientes de pendiente, rugosidad y percolación, se han determinado los siguientes valores:

$$\gamma_b = \text{tag } \beta / \text{tag } \alpha \quad (0,6 < \gamma_b < 1)$$

tag β = pendiente media de la zona alta de la flecha de Valdelagrana.

tag α = pendiente media de la playa = 0,03 y 0,008

Para determinar la pendiente media en la zona alta de la flecha de Valdelagrana, se promediaran diversos transeptos a lo largo de ésta. Los transeptos del 1 al 28 se encuentran en concordancia con la zona de la playa

con comportamiento disipativo-intermedio, mientras que los 29 al 33 lo están con la playa de comportamiento ultradisipativo.

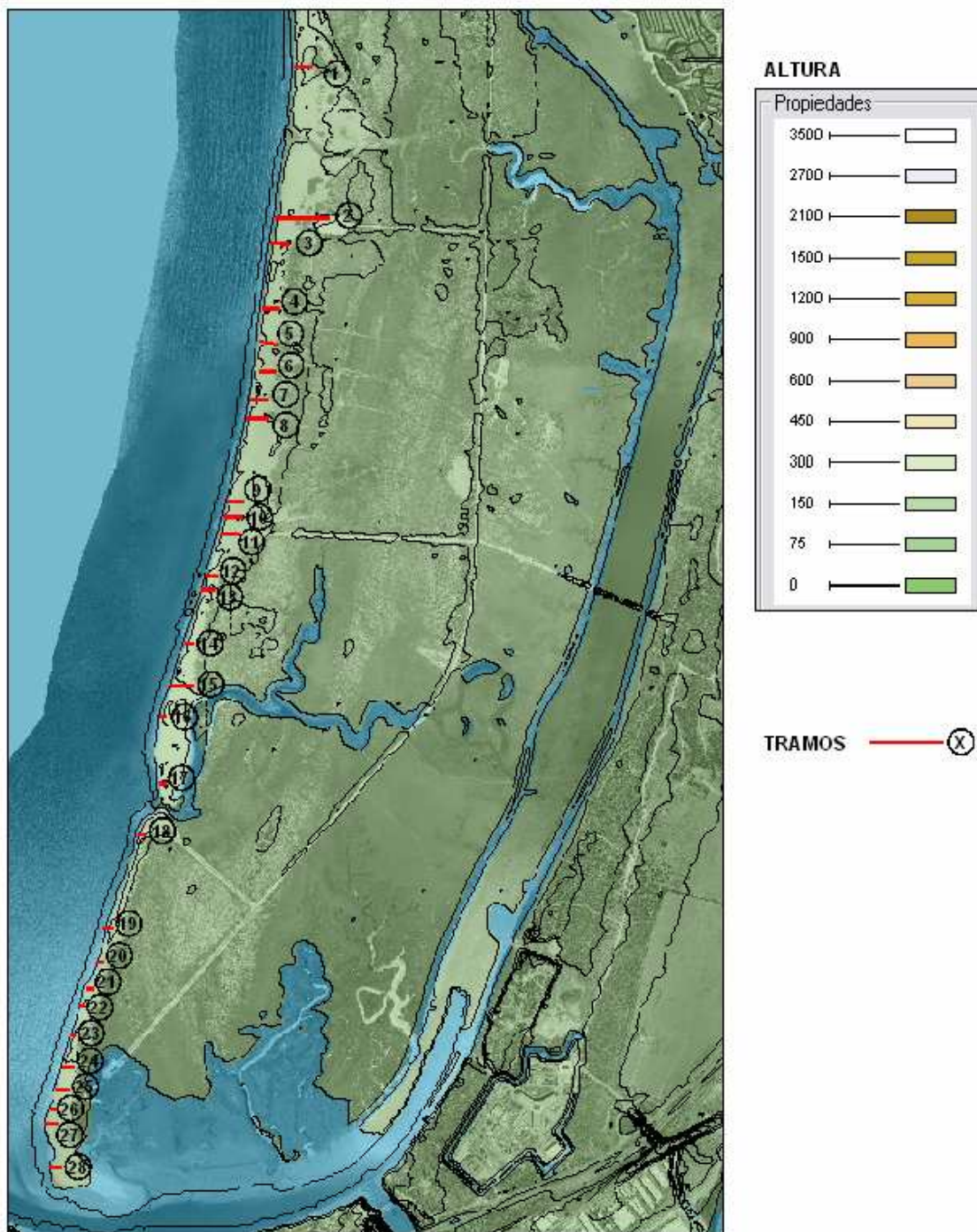


Figura 12. Trazado de perfiles a lo largo de la Flecha de Valdelagrana

Tramos	altitud 1	altitud 2	altitud 1 - altitud 2	distancia x	pendiente de la zona de marismas		promedio tag β	tag α	$\gamma b = \text{promedio tag } \beta / \text{tag } \alpha$
					tag $\beta = (\text{alt.1} - \text{alt.2}) / \text{distancia x}$				
1	1,73	4,04	2,31	54	0,042738205				
2	1,51	3,3	1,79	201	0,008903701				
3	1,66	3,46	1,8	63	0,028544244				
4	1,87	3,03	1,16	57	0,020343739				
5	1,74	2,86	1,12	57	0,019642231				
6	2,16	2,85	0,69	51	0,013526759				
7	1,67	2,89	1,22	57	0,021396001				
8	2,06	3,72	1,66	72	0,023039556				
9	1,85	2,62	0,77	51,01	0,015095079				
10	1,98	3,16	1,18	66,02	0,017873372				
11	1,79	2,75	0,96	57,01	0,016839151				
12	1,9	2,9	1	33,02	0,030284676				
13	1,61	3,49	1,88	48,05	0,039125911				
14	1,88	2,88	1	24,02	0,041631973				
15	1,16	2,81	1,65	90,02	0,01832926				
16	1,38	2,75	1,37	24,04	0,056988353				
17	1,57	2,29	0,72	24,01	0,029987505				
18	1,82	3,33	1,51	30,04	0,050266312				
19	1,05	2,3	1,25	21,04	0,059410646				
20	1,41	1,98	0,57	12,02	0,047420965				
21	1,45	1,95	0,5	21,01	0,023798191				
22	1,31	2,3	0,99	12,04	0,082225914				
23	1,35	2,24	0,89	18,03	0,049362174	0,032903214	0,03	1,096773795	
24	1,83	1,88	0,05	42	0,001190476				
25	1,46	1,86	0,4	39	0,01025641				
26	1,22	1,42	0,2	21	0,00952381				
27	1,25	1,61	0,36	36	0,01				
28	1,36	1,64	0,28	39	0,007179487	0,007630037	0,008	0,953754579	

Dada la ecuación:

$$\gamma_b = \text{tag } \beta / \text{tag } \alpha \quad (0,6 < \gamma_b < 1)$$

Se observan los siguientes valores:

- Playa disipativa-intermedia: $\gamma_b = 0,032903214 / 0,03 = 1,096773795$

Respecto al valor determinado, para este tipo de playa, se considerará $\gamma_b = 1$, ya que existen algunos tramos con pendientes un tanto más acusadas que en el resto.

- Playa ultradisipativa: $\gamma_b = 0,007630037 / 0,008 = 0,953754579$

Luego:

$$\begin{aligned} \gamma_b &= 1 && \text{(Playa disipativa-intermedia)} \\ \gamma_b &= 0,95 && \text{(Playa ultradisipativa)} \end{aligned}$$

Respecto a los demás parámetros:

$$\gamma_f = 1,0 \quad \text{(Se asume este valor dada las características de la zona: arena, vegetación, etc.)}$$

$$\gamma_w = 1 \quad \text{(Se asume que no existe percolación)}$$

Así:

$$Ru = Ru_o * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_w$$

$$\begin{aligned} Ru \text{ (PR = 10 años)} &= 3,807 * 1,0 * 1 * 1 = \mathbf{3,807} \text{ (Playa disipativa-intermedia)} \\ &= 3,807 * 1,0 * 1 * 0,95 = \mathbf{3,6166} \text{ (Playa ultradisipativa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ru (\text{PR} = 20 \text{ años}) &= 4,147 * 1,0 * 1 * 1 = \mathbf{4,147} \text{ (Playa disipativa-intermedia)} \\ &= 4,147 * 1,0 * 1 * 0,95 = \mathbf{3,9396} \text{ (Playa ultradisipativa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ru (\text{PR} = 50 \text{ años}) &= 4,549 * 1,0 * 1 * 1 = \mathbf{4,549} \text{ (Playa disipativa-intermedia)} \\ &= 4,549 * 1,0 * 1 * 0,95 = \mathbf{4,3215} \text{ (Playa ultradisipativa)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Ru (\text{PR} = 100 \text{ años}) &= 4,933 * 1,0 * 1 * 1 = \mathbf{4,933} \text{ (Playa disipativa-intermedia)} \\ &= 4,933 * 1,0 * 1 * 0,95 = \mathbf{4,6863} \text{ (Playa ultradisipativa)} \end{aligned}$$

Luego:

$$x \text{ (distancia en m)} = Ru / \text{tag } \beta$$

Respecto a la pendiente media de la zona alta de la flecha de Valdelagrana, se han determinado dos valores en función de la zona de playa junto a la que se localizan, así se calculará la distancia X que determina la cota de inundación, para los valores de $\text{tag } \beta$ 0,0329 y 0,0076 (pendiente media de la zona alta de la flecha de Valdelagrana en playa disipativa-intermedia –Zona A– y ultradisipativa –Zona B– respectivamente).

$$X = Ru (\text{PR} = 10 \text{ años}) / \text{tag } \beta \quad \left\{ \begin{aligned} &= 3,807 / 0,0329 = \mathbf{115,71 \text{ m}} \\ &= 3,6166 / 0,0076 = \mathbf{475,86 \text{ m}} \end{aligned} \right.$$

$$X = Ru (\text{PR} = 20 \text{ años}) / \text{tag } \beta \quad \left\{ \begin{aligned} &= 4,147 / 0,0329 = \mathbf{126,05 \text{ m}} \\ &= 3,9396 / 0,0076 = \mathbf{518,33 \text{ m}} \end{aligned} \right.$$

$$X = Ru (\text{PR} = 50 \text{ años}) / \text{tag } \beta \quad \left\{ \begin{aligned} &= 4,549 / 0,0329 = \mathbf{138,27 \text{ m}} \\ &= 4,3215 / 0,0076 = \mathbf{568,62 \text{ m}} \end{aligned} \right.$$

$$X = Ru (\text{PR} = 100 \text{ años}) / \text{tag } \beta \quad \left\{ \begin{aligned} &= 4,933 / 0,0329 = \mathbf{149,94 \text{ m}} \\ &= 4,6863 / 0,0076 = \mathbf{616,62 \text{ m}} \end{aligned} \right.$$

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	R_U (M)	Tag β	X (M) = $R_U / \text{Tag } \beta$
10	3,807	0,0329 (zona A)	115,71
	3,6166	0,0076 (zona B)	475,86
20	4,147	0,0329 (zona A)	126,05
	3,9396	0,0076 (zona B)	518,33
50	4,549	0,0329 (zona A)	138,27
	4,3215	0,0076 (zona B)	568,62
100	4,933	0,0329 (zona A)	149,94
	4,6863	0,0076 (zona B)	616,62

Las distancias x , determinadas en el tabla anterior, establecen las cotas de inundación para la playa de Levante (en la Flecha de Valdelagrana), observándose distintas cotas de inundación dada la diferencia de pendiente media de las zonas altas de la Flecha de Valdalagrana, respecto también al tipo de playa (0,0329 en gran parte de la flecha, y 0,0076 en la parte final de ésta).

Así, se observa que las distancia recorridas, durante inundación costera, en la zona A, son menores al tener que “alcanzar” las zonas más altas que se encuentran en la Flecha de Valdelagrana. Mientras que la zona B se caracteriza por tener una pendiente media (para las zonas más altas) menor que la anterior, dando lugar a una mayor inundación costera, en términos de distancias y extensión ocupada.

NOTA: El mapa de inundación que se muestra a continuación, determina **exclusivamente** las cotas de inundación previstas (para los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años) en la playa de Levante (playa abierta), sin tener en cuenta el comportamiento hidrodinámico del Río San Pedro ante tales inundaciones. Respecto a la línea de playa representada en este mapa, se ha cogido la curva de nivel de 1 m porque parece coincidir la marea alta en la playa de Levante.

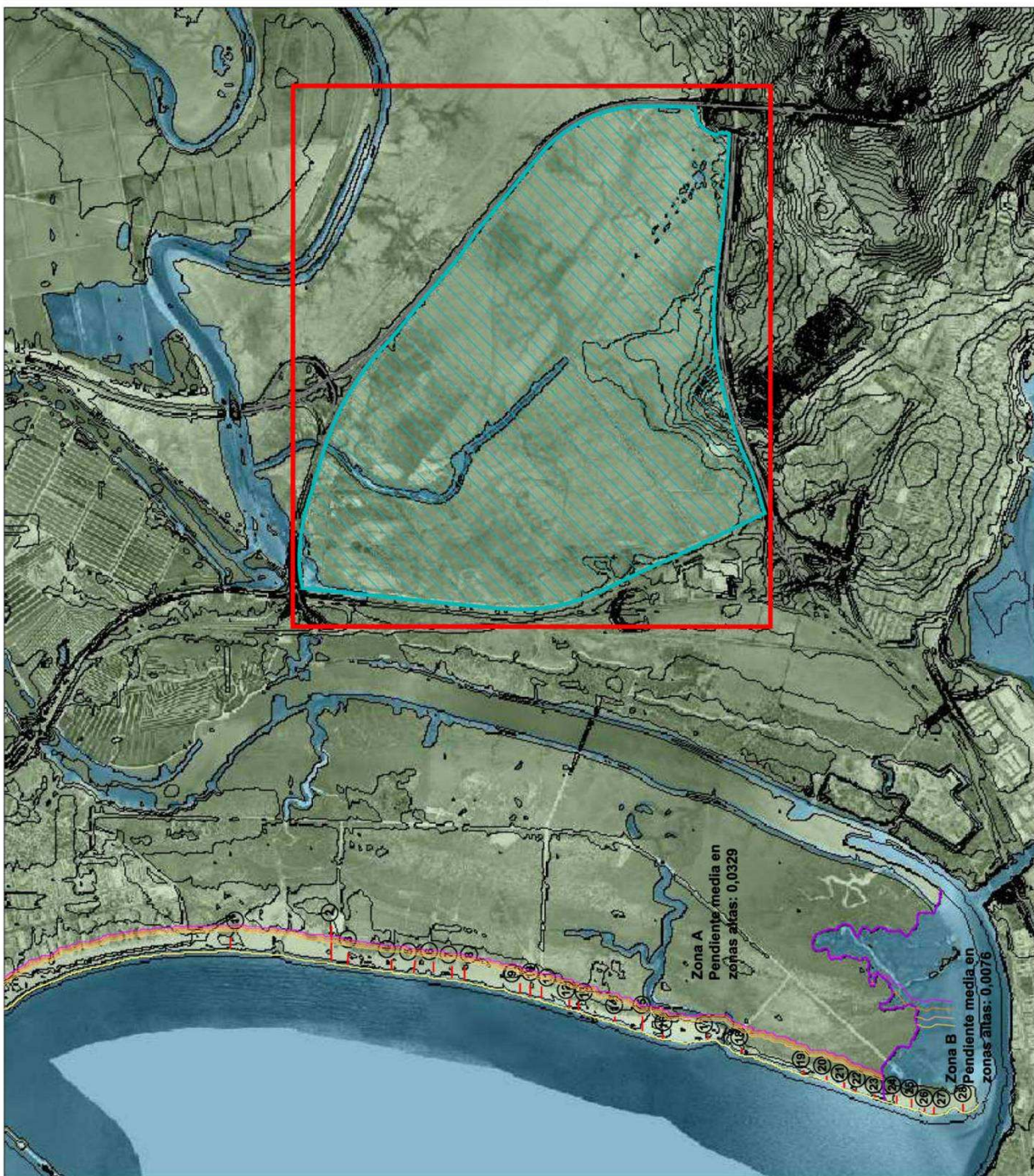
**MAPA DE COTAS DE INUNDACIÓN
DE LA PLAYA DE LEVANTE EN
FLECHA DE VALDELAGRANA**

- Cota de inundación para
Periodo de retorno 10 años
- Cota de inundación para
Periodo de retorno 20 años
- Cota de inundación para
Periodo de retorno 50 años
- Cota de inundación para
Periodo de retorno 100 años

- Limite de separación de
zonas altas de la flecha de
Valdeagrana con pendiente
media diferente
(0,0329 y 0,0076)
- Linea de playa

Limite de Las Aletas

Limite de ámbito de estudio



5.4 Niveles de referencia del nivel del mar en el ámbito de Las Aletas. Determinación de la pleamar máxima viva equinocial

1. Introducción

El Instituto Geográfico Nacional utiliza el origen de altitudes, que en la península corresponde al Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA) en la década 1870 - 1880. A él se refieren las altitudes geométricas de las señales geodésicas distribuidas por la geografía peninsular española. Constituye ésta la referencia nacional terrestre; no existe confusión posible hasta que se llega a la línea de costa, donde aparecen nuevos ceros ya dentro del agua. En las islas el IGN utiliza normalmente como cero el nivel medio del mar local.

Las cotas sobre el NMMA que aparecen en esta sección fueron proporcionadas por el IGN, tras la nivelación que este organismo realizó de todos los mareógrafos en el momento de su instalación. Durante 1998 el IGN llevó a cabo una compensación general de toda la red de nivelación nacional (Proyecto RNAP98), obteniendo para todas y cada una de las señales una nueva altitud homogénea con el resto de la red, que en ocasiones presenta discrepancias con respecto a la disponible hasta la fecha. En 1999 el IGN proporcionó estas nuevas cotas, que dan lugar a cambios sustanciales, de alrededor de 30 cm, en la relación con el NMMA en los puertos del Cantábrico y Galicia. Esto ha ocurrido en el pasado en otros países como Estados Unidos o Reino Unido y es una muestra de lo poco fiable que resulta la relación con las redes de nivelación nacionales para la determinación de la variación espacial del nivel medio. Hoy en día esto empieza a ser posible resolverlo mediante técnicas de geodesia espacial como el GPS.

El Instituto Hidrográfico de la Marina utiliza el **cero hidrográfico** para la publicación del Anuario de Mareas y la elaboración de las cartas náuticas. Este cero coincide aproximadamente con el nivel de agua más bajo y varía con las características de la marea a lo largo de la costa, ya que se obtenía hasta hace unos años restando al nivel medio del mar la unidad de altura multiplicada por 1,20.

En la última reunión del Bureau Hidrográfico Internacional (1996), a la que asistió el IHM, se ha definido un nuevo cero hidrográfico internacional, para evitar las diferencias de criterio entre los distintos países. Este nuevo cero se calculará en el futuro de la siguiente manera: nivel de marea más bajo que puede producirse en

condiciones meteorológicas medias, a partir del análisis de un período de datos no inferior a un año, y prediciendo no menos de 19 años de marea.

Referencia Local Revisada: se utiliza por convenio en las principales bases de datos internacionales de nivel del mar: GLOSS (*Global Sea Level Observing System*) y PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*). Se establece como el punto situado por debajo de una señal geodésica, el número de metros y decímetros enteros adecuado para que el nivel medio del mar de un año determinado sea lo más cercano posible a 7 m. Se nombra con las siglas RLR seguidas de dicho año: por ejemplo, si se escogen los datos de 1991, se llama RLR (1991).

Cada puerto, por su parte, define un nivel de referencia o cero conveniente para la realización de obras, dragados, etc; se conoce con el nombre de cero del puerto y puede coincidir o no con el cero hidrográfico.

Por último, el Instituto Español de Oceanografía (IEO) puede utilizar alguno de los ceros anteriores, u otro independiente, para referenciar las alturas registradas por sus mareógrafos.

Los mareógrafos de la REDMAR están en general referidos al cero del puerto.

Para controlar la estabilidad de la referencia de los mareógrafos, ésta debe estar materializada por al menos dos clavos o señales: una junto al mareógrafo y otra en un lugar más estable nivelada con la anterior (señal principal de referencia), aunque las últimas recomendaciones de GLOSS hablan de unas 5 señales auxiliares. Se trata de detectar posibles asentamientos del muelle en que se encuentra el sensor, que producirán una falsa elevación del nivel del mar. Tradicionalmente estos clavos deben pertenecer o estar atados a la Red Geodésica Nacional, para poder relacionar los niveles entre diferentes estaciones, aunque ya hemos visto que esto es insuficiente hoy en día.

El Instituto Geográfico Nacional realizó la nivelación de todos los mareógrafos de la REDMAR una vez instalados. El movimiento de estas señales debe ser controlado mediante nivelaciones periódicas en torno al mareógrafo. Las nuevas técnicas de referenciación por GPS, permitirán en el futuro disponer de un nivel de referencia internacional y conocer las variaciones absolutas del nivel del mar.

En el informe se incluye un capítulo de referencias para cada estación con una breve descripción de las instalaciones y las señales geodésicas más importantes dentro del puerto, así como las cotas con respecto a los distintos ceros.

2. Referencias. Puerto de Bonanza (Sanlúcar de Barrameda. Cádiz)

Coordenadas: Latitud: 36° 48' 14" *N* Longitud: 006° 20' 10" *W*

El mareógrafo más próximo al ámbito de ALETAS y representativo del comportamiento mareal de la Bahía de Cádiz está situado en el interior de una caseta en el Morro del Dique de Abrigo de Bonanza, en la desembocadura del Guadalquivir. Los datos se reciben por radio en el faro de Chipiona. Sus Coordenadas geográficas son:

Latitud: 36° 48' 14" *N*
Longitud: 006° 20' 10" *W*

El IGN implantó la señal NGU-76 frente a la caseta del mareógrafo e hizo una nivelación a lo largo de la carretera que une las poblaciones de Sanlúcar y Jerez hasta llegar a la señal NGS-720, situada sobre el puente del río Guadalete (35 Km).

Como señal estable alternativa se escoge la NGP-795 situada sobre el murete que rodea el edificio de la lonja, en su lado Sur.

El 21 de Marzo de 1999 un barco golpeó el muelle y desapareció el sensor. En el accidente pudo verse alterada la señal NGU-76, por lo que es necesario realizar una nueva nivelación, al menos desde el edificio de la lonja (señal NGP-795).

Referencias en Bonanza:

El cero del mareógrafo es el cero hidrográfico en este punto, que teniendo en cuenta las nuevas cotas proporcionadas por el IGN, está situado 1,419 m por debajo del NMMA (sólo ha cambiado 9 mm con respecto al valor de 1,41 m utilizado anteriormente).

Nombre:	NMMA (antes):	NMMA (1998):	Cero hidrográfico:
NGU-76	3,114	3,105	4,524
NGP-795	3,545	3,536	4,955

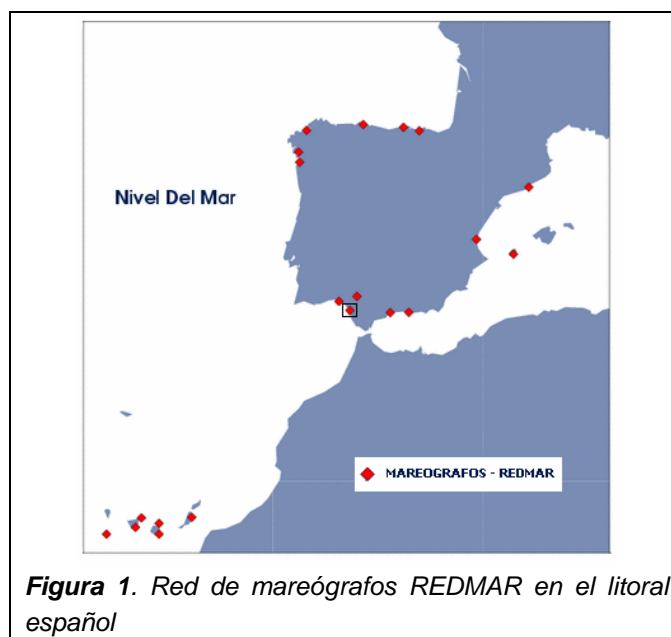
(Cotas de las señales de interés (en metros)).

3. Aproximación de cálculos y valores de Bonanza a la Bahía exterior de Cádiz.

Los siguientes apartados presentan, como producto de la Red de Mareógrafos de Puertos (REDMAR), en funcionamiento desde Julio de 1992, y para aquellas estaciones con más de 5 años de datos, un compendio único y fácilmente actualizable de los distintos parámetros relacionados con la marea y el nivel del mar en los puertos, que tienen gran incidencia en el diseño y ejecución de obras y en la explotación portuaria.

Algunos de estos parámetros se han venido utilizando históricamente para diferentes puertos sin una fuente bien definida de datos de partida, lo que dificultaba el conocimiento preciso de su fiabilidad y hacía necesaria su actualización en base a las series históricas de nivel del mar disponibles en la Base de Datos Océano-Meteorológica de Puertos del Estado.

Por ello, dada la localización del ámbito de estudio, se ha procedido a aproximar los datos del mareógrafo de Bonanza (encuadrado en la figura siguiente) al ámbito de la Bahía exterior de Cádiz,



Es de destacar, por su utilidad para la gestión y proyecto portuario, la inclusión en este documento de la distribución extremal de residuos meteorológicos de nivel del mar, o marea meteorológica, derivada de la información estadística de la componente no astronómica del nivel del mar.

4. Fuentes de información para los cálculos

Para el cálculo de los parámetros incluidos en este informe se utilizaron distintas fuentes de datos, todas directa o indirectamente derivadas de la REDMAR. Se diferenciará entre puertos con una marea claramente semidiurna (2 pleamares y 2 bajamares claramente diferenciadas y con amplitud apreciable cada día), como son todos los puertos del Atlántico, y los que tienen una marea mixta y de amplitud casi despreciable, en los que toda referencia a la pleamar y la bajamar no tiene sentido (la mayoría de los puertos del Mediterráneo).

- a) Series de datos de nivel originales: niveles del mar registrados por los mareógrafos con su intervalo temporal original (normalmente 5 min), depurados y sometidos a control de calidad.
- b) Series de extremos diarios registrados en torno a la pleamar y la bajamar: se trata de los extremos de nivel del mar diarios reales, registrados por los equipos de la REDMAR desde el inicio de su funcionamiento y que contienen

información tanto de marea astronómica como de otros efectos como la meteorología, variaciones de densidad, etc. Se obtienen a partir de la serie de datos original (punto a)) en los puertos con marea semidiurna. Nos referiremos a ellos como pleamares o bajamares observadas.

- c) Series de carreras de marea registradas: se trata de las series de diferencias entre una pleamar y una bajamar consecutivas (tres o cuatro por día) observadas por el mareógrafo (punto b)), de nuevo en aquellos puertos con marea semidiurna.
- d) Series de 19 años de pleamar/bajamar prevista: corresponden a las pleamares y bajamares obtenidas a partir de las mejores constantes armónicas disponibles en el puerto (derivadas a su vez de años de observaciones, incluyendo los principales períodos de la marea) para un periodo virtual de 19 años. Son series teóricas y contienen sólo la variación de nivel del mar por efecto de la marea astronómica.
- e) Series de 19 años de marea astronómica: niveles horarios del mar previstos de la misma forma que las series anteriores, que se utilizarán en el caso de puertos con marea mixta o de pequeña amplitud.
- f) Series de residuos meteorológicos horarios (conocida también como “marea meteorológica”): series de variación de nivel del mar tras eliminar la marea astronómica por medio de un análisis armónico. Se suele llamar “residuo” o “marea” meteorológica porque están fundamentalmente asociadas a la acción de la presión atmosférica y el viento, aunque también contienen otros efectos como son las variaciones de densidad del agua (“componente estérica”) y en definitiva, todo aquello que no tiene una clara componente armónica asociada a un periodo determinado.

5. Glosario y método de cálculo de los distintos parámetros de nivel del mar

A continuación se presenta una definición de cada uno de los parámetros incluidos en este informe, en función de a partir de qué datos han sido obtenidos. Salvo en el caso de los deducidos de 19 años de predicciones de marea, todos los parámetros dependen no sólo del punto de observación sino también del periodo de datos disponible.

a) A partir de las series de datos de nivel originales: válido tanto para puertos con marea semidiurna importante, como es el caso del Atlántico, o no, como es el caso del Mediterráneo.

- *Nivel medio del mar (NMM)*: nivel medio obtenido a partir de todos los datos históricos registrados en cada mareógrafo disponibles hasta la fecha. Se obtiene como media de los niveles medios anuales obtenidos para la REDMAR y presentados en los informes anuales. La descripción del cálculo de estas medias anuales se puede consultar en dichos informes.
- *Máximo nivel observado*: máximo nivel registrado por el mareógrafo durante su periodo de funcionamiento.
- *Mínimo nivel observado*: mínimo nivel registrado por el mareógrafo durante su periodo de funcionamiento.

b) A partir de las series de pleamares y bajamares observadas: (sólo para puertos con marea semidiurna).

- *Pleamar viva media observada*: media de todas las pleamares vivas registradas por el mareógrafo durante su periodo de funcionamiento (mareas de máxima amplitud coincidiendo con luna llena o luna nueva). Se obtiene a partir de los extremos diarios reales, es decir, contiene no sólo la componente de marea sino los demás forzamientos.
- *Bajamar viva media observada*: media de todas las bajamares vivas registradas por el mareógrafo durante su periodo de funcionamiento. Se obtiene de la misma forma que la anterior.
- *Pleamar muerta media observada*: media de todas las pleamares muertas registradas por el mareógrafo durante su periodo de funcionamiento (mareas de mínima amplitud coincidiendo con cuarto creciente o cuarto menguante). Se obtiene a partir de los extremos diarios reales, es decir, contiene no sólo la componente de marea sino los demás forzamientos.
- *Bajamar muerta media observada*: media de todas las bajamares muertas registradas por el mareógrafo durante su periodo de funcionamiento. Se obtiene de la misma forma que la anterior.

c) A partir de las series de carreras de marea observadas se presentarán también para los puertos con una clara marea semidiurna la *carrera máxima*, *mínima* y *media* durante el periodo de funcionamiento. Hay que tener en cuenta que aunque hablemos de “carrera de marea”, el término “observada” implica que lo

haremos a partir del nivel total u observado por el mareógrafo (no sólo componente de marea).

d) A partir de las series de pleamar y bajamar previstas (19 años): (sólo para puertos con marea semidiurna): se recuerda que en este caso sólo se tiene en cuenta la componente de marea astronómica de variación de nivel del mar.

- *Máxima pleamar astronómica* (“*Highest Astronomical Tide*”, *HAT*): máxima pleamar prevista en un periodo de 19 años.
- *Mínima bajamar astronómica* (“*Lowest Astronomical Tide*”, *LAT*): mínima bajamar prevista en un periodo de 19 años.

Todos estos parámetros aparecen de forma esquemática representados para cada uno de los puertos con respecto al cero del mareógrafo (normalmente el cero del puerto); la posición de éste viene especificada gráficamente con respecto al clavo de referencia o señal más cercana al mareógrafo; su descripción y situación, así como su relación con otras señales dentro del puerto, puede consultarse en los informes anuales de la REDMAR. Hay que tener en cuenta que el dibujo no está hecho a escala, y que la posición real del cero o referencia de las medidas, como muestra la existencia de registros negativos, en ocasiones está por encima del nivel registrado. En alguno de estos casos, el puerto ha decidido a posteriori adoptar un nuevo “cero del puerto” que no se quede en seco, como es el caso del puerto de Las Palmas, que el 21 de Mayo de 2004 bajó 17 cm su referencia; esta decisión se tomó teniendo en cuenta el mínimo registro histórico del mareógrafo de la REDMAR.

Además del esquema mencionado, se incluye también una tabla más exhaustiva con todos los parámetros estadísticos para las series de partida mencionadas (incluyendo máximos, mínimos y desviaciones estándar), así como el valor del “establecimiento de puerto”, o intervalo medio de pleamar (“*high water lunitidal interval*”), que corresponde al tiempo medio transcurrido entre el tránsito de la Luna por el meridiano local y la pleamar siguiente. Se obtiene a partir de la fase del armónico M2, para aquellos puertos con marea semidiurna.

6. Régimen extremal de las series de residuos o marea meteorológica

En una primera aproximación las variaciones de nivel del mar pueden representarse como la suma de la marea astronómica y la componente

meteorológica (residuo o marea meteorológica, como se la conoce a veces), que como hemos visto incluye todos aquellos efectos de variación de nivel no periódicos, incluyendo por ejemplo variaciones de densidad.

La marea astronómica, por su periodicidad, permite una caracterización determinista de los valores máximos debidos a esta componente de nivel del mar. Sin embargo, la caracterización extremal de la componente de residuo necesita un tratamiento probabilista en términos de periodos de retorno.

El comportamiento de los máximos de la serie de residuos o marea meteorológica se ha analizado siguiendo la técnica POT (Peak Over Threshold), donde se ha supuesto que el número de eventos extremos en un año sigue una distribución de Poisson y que la intensidad de dichos eventos sigue una distribución Weibull. Se incluye para cada puerto los parámetros de la distribución y los niveles asociados a distintos periodos de retorno, tanto para los residuos máximos como para los mínimos. Se incluyen los valores de nivel correspondientes a la “estima media o central” y a la “banda de confianza del 90%”.

7. Sugerencia para el cálculo de Pleamar Máxima Viva Equinoccial

Este parámetro (junto con el de Bajamar Mínima Viva Equinoccial) se encuentra muy solicitado desde que la REDMAR está en funcionamiento, y no existe una unanimidad sobre su método de cálculo. Dado que la accesibilidad a series históricas de nivel del mar es reciente, se entiende que los valores que se vienen utilizando en los distintos puertos para estos parámetros habrán sido obtenidos a partir de una información más pobre que la ahora disponible. Por esta razón, se ha considerado que, **con el fin de obtener un valor extremo de nivel del mar que tenga muy poca probabilidad de ocurrencia**, se puede asumir el siguiente convenio de cálculo:

- **Pleamar Máxima Viva Equinoccial (PMVE):** es igual a la suma de la Máxima Pleamar Astronómica y el Residuo Meteorológico Máximo cuyo periodo de retorno sea 300 años.

Este valor se puede obtener de forma directa y sencilla a partir de la tabla que se presenta en la siguiente página (y en cualquier caso suponen una estimación conservadora).

Este método de estimación se propone sin perjuicio de un cálculo más preciso y acorde con los criterios metodológicos que postula la ROM 0.0, en la cual se establecen los niveles de riesgo asumibles en las obras (probabilidad de fallo) teniendo en cuenta su vida útil, así como las condiciones socioeconómicas y ambientales.

Luego, para los datos de Bonanza, extrapolables a Las Aletas:

$$\text{PMVE (PR = 20 años)} = 358 \text{ cm} + 85 \text{ cm} = 443 \text{ cm} = \mathbf{4,43 \text{ m}}$$

$$\text{PMVE (PR = 50 años)} = 358 \text{ cm} + 95 \text{ cm} = 453 \text{ cm} = \mathbf{4,53 \text{ m}}$$

$$\text{PMVE (PR = 300 años)} = 358 \text{ cm} + 114 \text{ cm} = 472 \text{ cm} = \mathbf{4,72 \text{ m}}$$

Dado que los valores anteriores de Pleamar Máxima Viva Equinoccial son los correspondientes con respecto al Cero Hidrográfico de Bonanza, dichos valores han de corresponderse a su vez con respecto al Nivel Medio Del Mar en Alicante (NMMA) ya que, como se ha comentado en apartados anteriores, a éste se refieren las altitudes geométricas de las señales geodésicas distribuidas por la geografía peninsular española, constituyendo la referencia nacional terrestre.

Así, en el apartado “Referencias. Puerto de Bonanza” se determinaba que el Cero Hidrográfico en Bonanza se encuentra situado 1,419 m por debajo del NMMA.

Referencia	Nivel medio del mar al NMMA (m)
NGU-76	1,419
NGP-795	1,419

Luego, se predicen los siguientes valores de PMVE en Bonanza, respecto al NMMA:

$$\text{PMVE (PR = 20 años)} = 4,43 \text{ m} - 1,419 \text{ m} = 3,011 \text{ m}$$

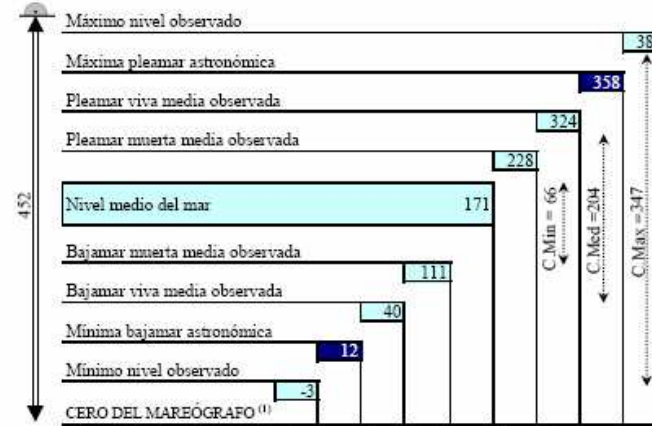
$$\text{PMVE (PR = 50 años)} = 4,53 \text{ m} - 1,419 \text{ m} = 3,111 \text{ m}$$

$$\mathbf{\text{PMVE (PR = 300 años)} = 4,72 \text{ m} - 1,419 \text{ m} = 3,301 \text{ m}}$$



Ubicación del mareógrafo en el puerto (punto rojo)

NGU 76 Referencia geodésica más cercana



Valores expresados en cm; con signo negativo si están por debajo del cero

(1) cero del mareógrafo = cero hidrográfico

ANÁLISIS DE NIVELES OBSERVADOS (1)

	NIVEL TOTAL				NIVEL MAREA ASTRON. (2)			
	Max.	Min.	Med.	D.E.	Max.	Min.	Med.	D.E.
Pleamar	386	189	276	33	358	187	273	33
Bajamar	165	-3	72	26	138	12	75	24
Pleam. Viva	381	279	324	30	358	283	319	23
Bajam. Viva	117	-3	40	17	74	12	45	15
Pleam. Muerta	366	189	228	23	254	187	223	18
Bajam. Muerta	160	61	111	18	138	79	112	10

RESIDUO = Nivel total - Nivel marea astronómica

RESIDUO MÁX. 97 RESIDUO MÍN. -38

(1) valores expresados en cm

(2) simulación de un ciclo nodal (18,6 años)

ESTADÍSTICA EXTREMAL DE RESIDUOS

(Marea meteorológica)

PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL

RESIDUO MAX.				RESIDUO MIN.			
α	β	γ	λ	α	β	γ	λ
17.9	17.0	1.2	8.7	-9.4	9.3	1.5	25.2

$$X_r = \beta \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda Pr} \right) \right)^{\frac{1}{\gamma}} + \alpha$$

$$X_r = -\beta \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda Pr} \right) \right)^{\frac{1}{\gamma}} + \alpha$$

Pr: P. Retorno (años)	RESIDUO MAX.				RESIDUO MIN.			
	20	50	300	600	20	50	300	600
Xr: Residuos (cm)	85	95	114	121	-42	-46	-52	-54
Banda sup. 90% (cm)	104	120	153	166	-47	-51	-59	-62

5.5 Hidrodinámica mareal del caño mareal Río San Pedro.

1. Conceptos básicos

Los procesos hidrodinámicos generados por la marea están relacionados con su propagación y transformación en el estuario. Estos procesos se pueden describirse, fundamentalmente, por la distribución espacial y temporal de: (1) la amplitud de la onda, (2) su fase, y (3) el campo de velocidades asociado. La distribución espacial y temporal de la tensión tangencial de fondo inducida y la viscosidad son parámetros de interés por su importancia en la evaluación del transporte de sedimentos.

Debido a que la relación entre la amplitud de la marea y las profundidades características del estuario es próxima a la unidad (profundidades reducidas), el campo de velocidades inducido por la marea es fundamentalmente horizontal. En el caso de propagarse a través de un canal, la dirección del campo de velocidades está fundamentalmente alineado al eje principal del canal y es uniforme en profundidad.

La propagación y transformación de la marea en el estuario es un fenómeno no-lineal debido a la existencia de fricción y a la interacción entre los distintos armónicos de marea. El carácter no lineal de la propagación induce:

- la deformación de la onda durante su propagación por la variación de su amplitud y celeridad:

o La fricción a lo largo de un canal produce, salvo en el caso de estrechamiento excesivo del cauce, la disminución de la amplitud de la onda y la disminución de la celeridad en función de un parámetro local definido como **coeficiente de amortiguamiento** μ . Dicho parámetro es función de la celeridad local de la onda de marea C y del coeficiente de Chezy.

o La presencia de fricción también afecta a la simetría de la onda debido a la disminución de la celeridad de la onda C con la profundidad total ($\eta + h$). Esta dependencia produce que la cresta de la onda progresiva se desplace con una celeridad mayor que el seno. En consecuencia, el ciclo de llenante se acorta y el ciclo de vaciante se alarga (ver **figura 1**), como resultado la onda de marea se hace asimétrica.

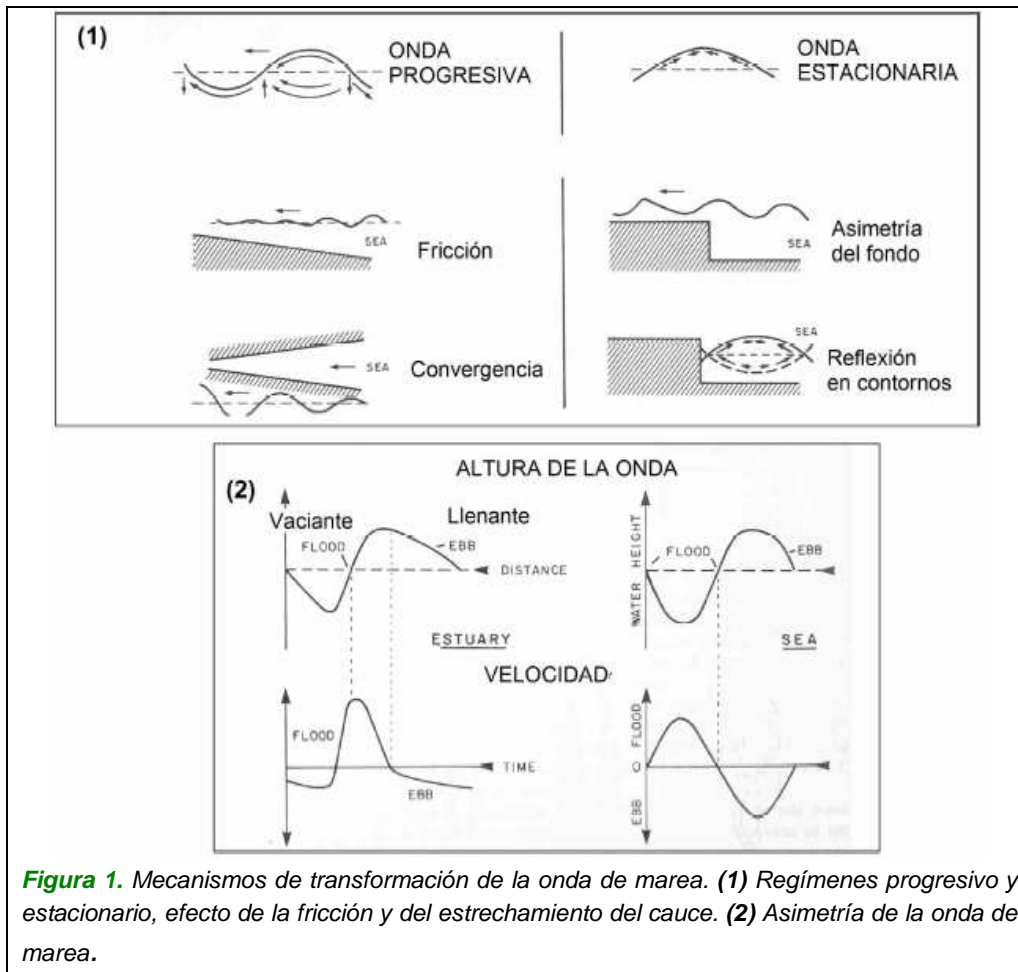


Figura 1. Mecanismos de transformación de la onda de marea. (1) Regímenes progresivo y estacionario, efecto de la fricción y del estrechamiento del cauce. (2) Asimetría de la onda de marea.

- la generación de sobremareas. La presencia de distintas componentes de marea y su interacción no lineal da lugar a la aparición de corrientes residuales conocidas como sobremareas. Aunque su amplitud es pequeña pueden producir efectos significativos en el balance neto de masa a lo largo de muchos ciclos de marea.

Además, puede producirse la reflexión de la onda de marea. La reflexión de la onda de marea puede producirse debido a la presencia de un corte o contorno reflejante en la zona de propagación. La reflexión de la onda de marea, su transformación en una onda estacionaria y su amortiguamiento puede dar lugar a cambios significativos en las distribuciones de amplitud y celeridad de la onda (ver **figura 1. anterior**).

La variación del nivel de marea ocasiona la inundación y almacenamiento de masas de agua en el estuario. La existencia de armónicos de distintas frecuencias (semidiurnos, diurnos,...) y sobremareas, permite definir distintas escalas de tiempo para el cálculo del balance de masas de agua que se introduce y sale del estuario. Habitualmente, este balance se realiza en la escala de tiempo igual al periodo del armónico principal. El volumen total de

agua así intercambiada durante el ciclo de llenante y vaciante del armónico principal se conoce como prisma de marea.

2. Particularidades de la propagación de la onda de marea en el estuario del río San Pedro

El río San Pedro se encuentra conectado al área de la Bahía Exterior en la frontera con el Estrecho de Puntales. Está sometido, pues, a su régimen hidrodinámico de mareas de carácter estacionario, ya que se halla condicionado por el forzamiento inducido desde la Bahía de Cádiz.

La componente principal de marea es de tipo semidiurno (M2). ***Las amplitudes de elevación medias son de 107 cm y las vivas equinocciales de 182 cm. Las probabilidades asociadas a cada nivel de inundación se han calculado a partir del régimen medio de mareas local.***

En la actualidad, la zona de estudio se caracteriza por:

- un cauce principal (caño del río San Pedro) con profundidad media de 4 m, exceptuando la zona cercana a la desembocadura, en donde existen zonas que superan 7 metros de profundidad.
- y una amplia zona intermareal en ambas orillas pertenecientes al Parque Natural de la Bahía de Cádiz.

Al inicio del estudio, el cauce se encontraba limitado a los 6 Km aguas arriba de la desembocadura por la Presa de la Cortá que posteriormente (Mayo de 2004) fue parcialmente abierta. ***A pesar de la apertura de la misma, la presa permite un intercambio de flujo de agua restringido entre los dos tramos del cauce y limita sustancialmente la superficie inundable aguas arriba de la misma.***

Aquí se ha modelado con el programa UCA2D la hidrodinámica de marea en las dos configuraciones recientes del caño:

- Con la Presa cerrada, que desde el punto de vista hidrodinámico equivale a una condición de contorno impermeable y reflejante.
- Con la presa parcialmente abierta.

En los dos casos se analizan:

- (1) las propiedades cinemáticas de la onda: amplitud, fase y velocidad.
- (2) Las propiedades dinámicas de la onda de marea: coeficiente de amortiguamiento, flujo de energía disipada, etc.

(3) Superficie inundada y prisma de marea.

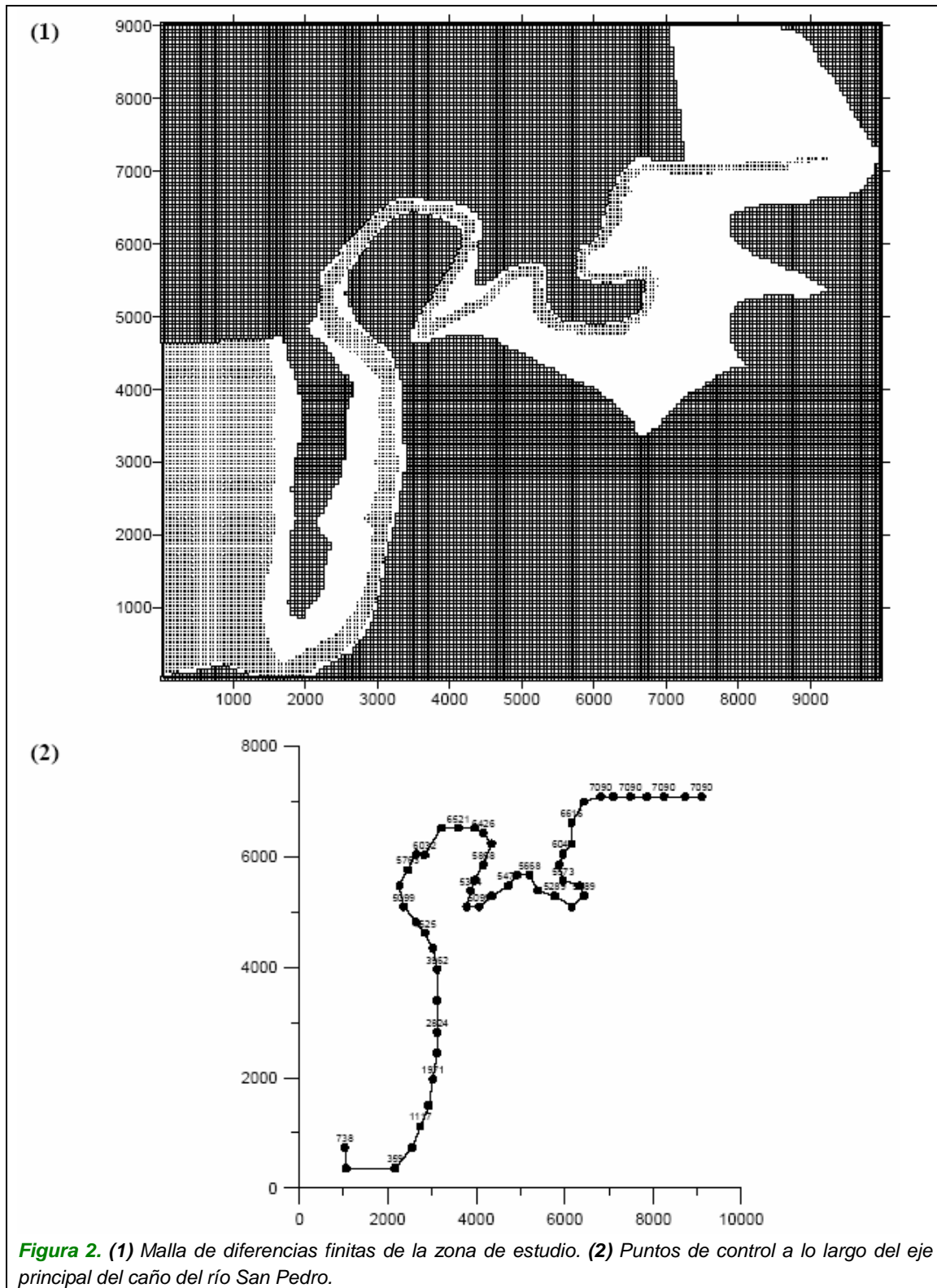
La topografía y batimetría consideradas corresponden a las medidas en sendas campañas específicas realizadas para este estudio:

- **Topografía de la marisma.** Las medidas, con precisión centimétrica, han permitido determinar las pendientes topográficas características del área de estudio y la implementación de las isolíneas de nivel con un alto grado de fiabilidad. ***Los valores están referidos al nivel medio del mar local (+20cm NMMA).***
- **Batimetría del caño del río San Pedro en su tramo navegable mediante** ecosondas de alta resolución, y complementadas con las cartas 443 A y 443 B publicadas por el IHM. Con el fin de referir los datos batimétricos al mismo sistema de referencia topográfico, se midieron cotas respecto a la lámina de agua simultáneamente en el vértice 305 situado en la Cabezuela, el mismo que fue utilizado en la determinación de las cotas topográficas.

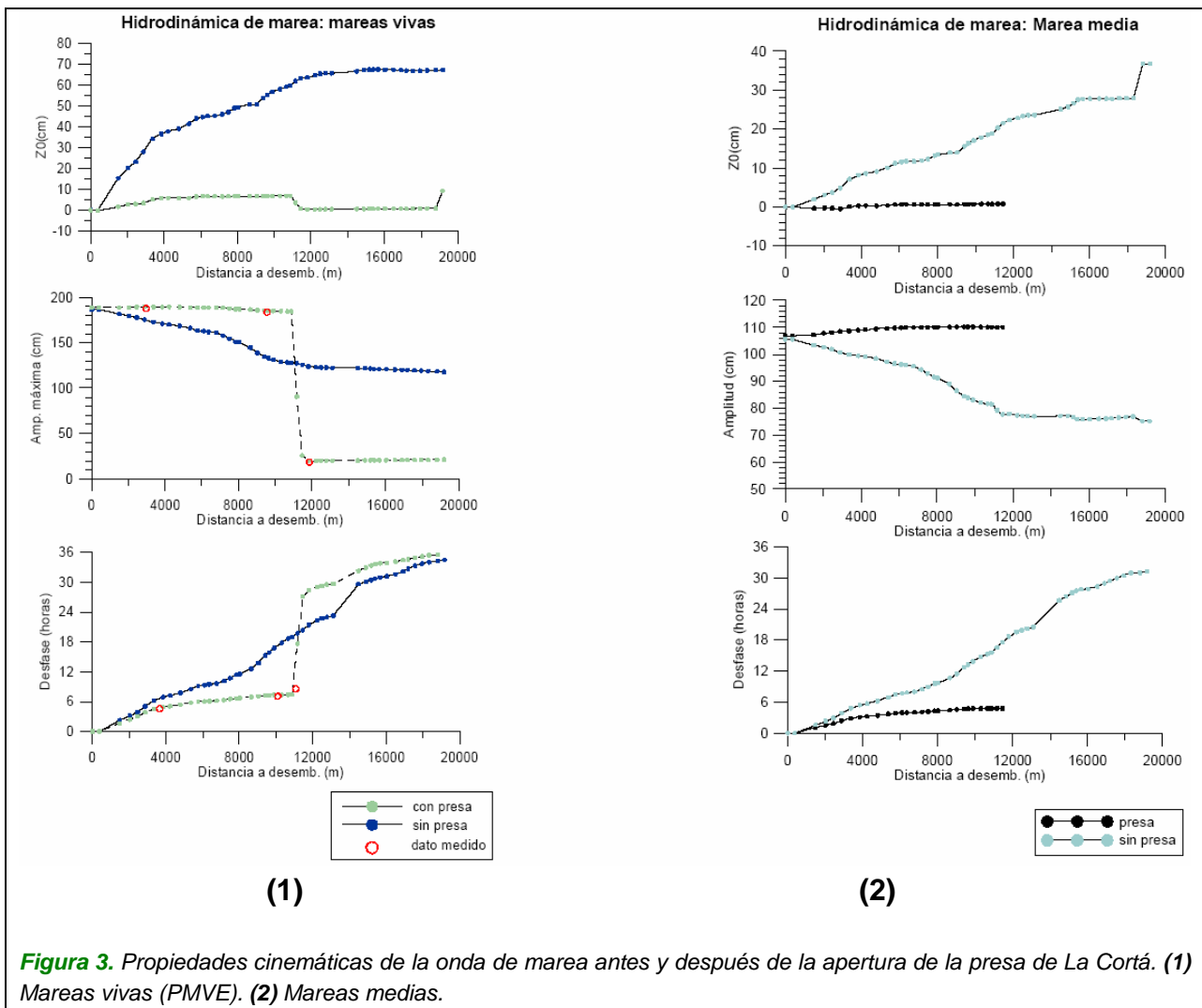
La propagación de la onda de marea por el caño y marismas del río San Pedro se ha simulado con el modelo UCA-2D. Las principales características del modelo se describen en el **apartado “Características Hidrodinámicas del río San Pedro”**. Con el fin de apreciar más claramente las pendientes y estructura morfológica de la zona intermareal, las cotas han sido sometidas a un proceso de suavizado respecto a los datos topográficos reales obtenidos. El modelo ha sido calibrado y validado con las campañas hidrodinámicas realizadas por la Universidad de Cádiz para el presente estudio.

El detalle de los resultados del modelo se describe en el **apartado “Características Hidrodinámicas del río San Pedro”**. A continuación se determinan los resultados más relevantes para las dos configuraciones consideradas. Para facilitar su análisis se han representado a lo largo del eje principal del río San Pedro (ver **figura 2.**) las:

- Las características cinemáticas (amplitud, fase y velocidad), y
- dinámicas (coeficiente de amortiguamiento, tasa de disipación energética)



Así, para las dos configuraciones consideradas, los resultados se muestran en la **figura 3**.



3. Hidrodinámica de marea previa a la apertura de La Cortá

En presencia de La Cortá la hidrodinámica de la onda de marea corresponde al régimen de una onda estacionaria.

Sus principales características cinemáticas son (ver **figura 3. anterior**):

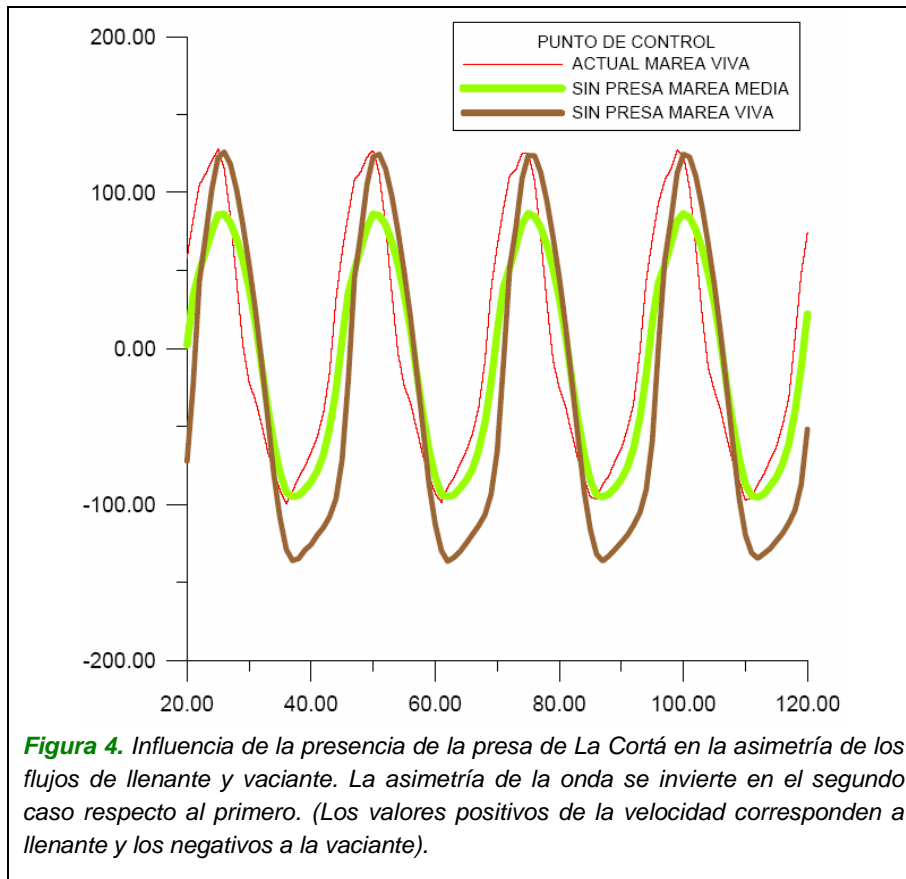
- **Fase**
 - El desfase de la onda es de aproximadamente 40 min desde la Bahía Exterior hasta la presa, situada aproximadamente a 6 Km de la desembocadura.
- **Amplitud**
 - Los niveles medios de la amplitud son aproximadamente constantes a lo largo de todo el tramo aguas debajo de la presa.

Para mareas medias la amplitud sobre al nivel medio local es de aproximadamente 107 cm con variaciones de 2 cm a lo largo del cauce. En mareas vivas este valor cambia a 150 cm en el caso de mareas vivas (quincenales y mensuales) y a 70 cm en el caso de mareas muertas. **Los valores de estas elevaciones en pleamares máximas vivas equinociales muestran, sin embargo, una variabilidad superior, disminuyendo su amplitud desde 1.85 m en la región fronteriza con la Bahía Exterior hasta 1.78 m en la presa de la Cortá. La razón de esta variabilidad debe buscarse en el mayor efecto de la disipación energética que supone la fricción con el fondo debido a las mayores velocidades asociadas, así como en la mayor extensión anegadiza que supone la presencia de mayores amplitudes.**

- **Aguas arriba de la presa la amplitud de la onda de marea no supera 40 cm respecto al nivel medio local.**

- **Velocidad**

- La mayor velocidad con independencia del régimen de mareas se produce en la región acodada de la desembocadura. En PMVE las corrientes en esta zona alcanzan 150 cm/s. Este valor es de 100 cm/s para mareas medias (70% de la PMVE).
- A lo largo del cauce aguas debajo de la presa, la velocidad máxima asociada a la onda disminuye progresivamente conforme se acerca a la presa en la que la velocidad horizontal es cero. Esta característica es independiente de la fase.
- Por otro lado, la asimetría de la onda (ver **figura 4.**) debido a la fricción y a las componentes M2, M4 y M6 produce corrientes de flujo mayores que las de refluo lo que sugiere la existencia de un transporte neto de sedimento desde la desembocadura hacia el interior del cauce. Este aspecto se discutirá en detalle cuando se analice el estado sedimentario de la marisma.



- Esta asimetría induce la presencia de una corriente residual dentro del ciclo del armónico M2 hacia el interior del río de aproximadamente 4 cm/s.

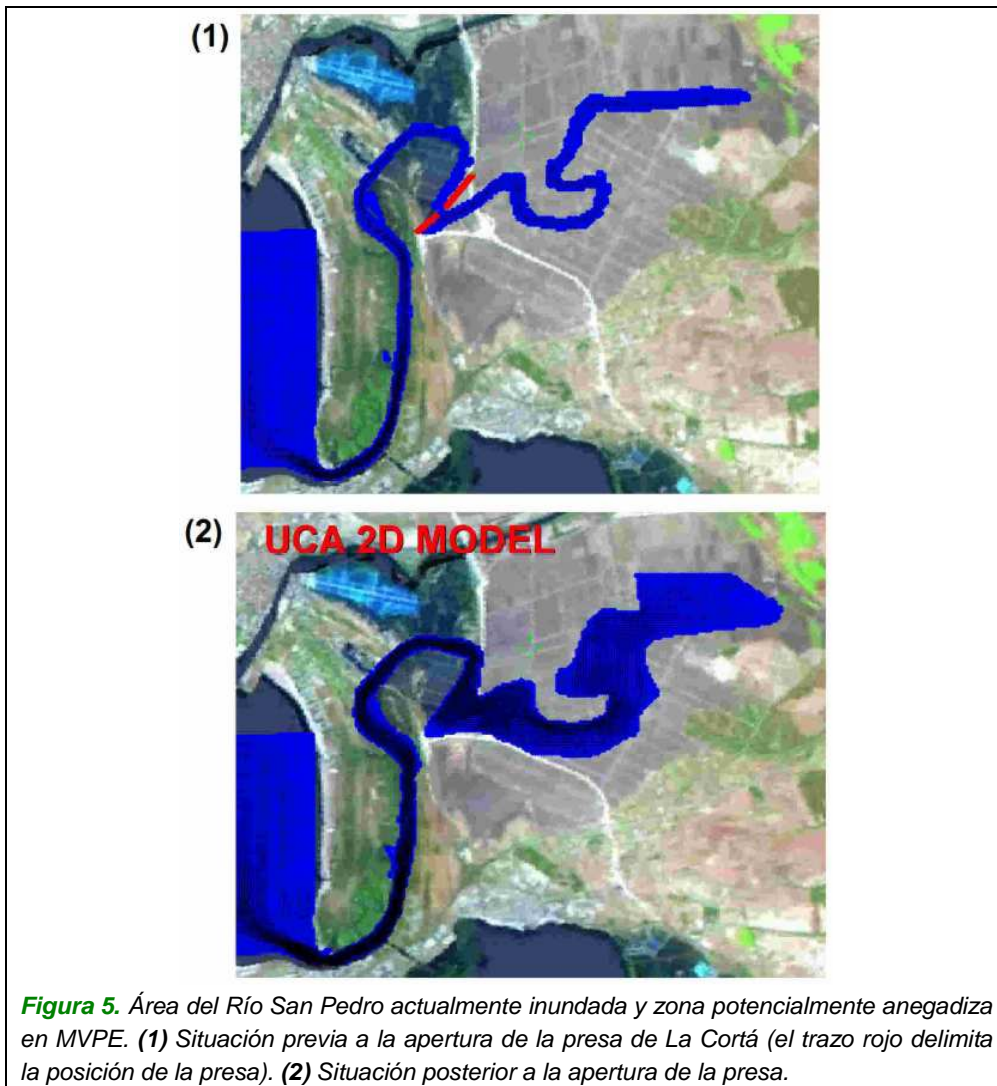
Los datos medidos confirman el comportamiento estacionario de la onda de marea. Así se observa que:

- En mareas medias (dato experimental) el comportamiento estacionario de la corriente se manifiesta en una diferencia de fase entre la corriente máxima y la máxima altura del nivel del mar de 82° , lo que es equivalente a 2.84 horas.
- En mareas vivas (dato experimental) la variación del nivel del mar y la componente longitudinal de la corriente indica que el comportamiento es cuasiestacionario con una diferencia de fase entre la componente longitudinal de la corriente y las elevaciones para la banda semidiurna de 63° lo que equivale a 2.17 horas.
- Aguas arriba de La Cortá (dato experimental), la constituyente M4 presenta una amplitud máxima, siendo su amplitud tres veces inferior que la que presenta el armónico que representa la banda semidiurna, es decir la M2. Lo que implica que en esta zona la

asimetría de la onda de marea muy acentuada. Se deduce por tanto que la corriente en el flujo es mayor y de menor duración, siendo la velocidad de la corriente en el flujo 7 cm/s superior a la del reflujó. El periodo de vaciante es superior al de llenante.

Asumiendo una relación lineal (Davies, 1989) entre el prisma de marea, la velocidad y la sección del área de la desembocadura se ha estimado que:

- ***La superficie inundada máxima en la marisma desecada en presencia de La Cortá era de 270 Has. Teniendo en cuenta que el máximo valor de la amplitud es de 40cm y la pendiente media en la zona es de 0.01%, la anchura media de la superficie inundada (zona intermareal) en torno al caño del río San Pedro aguas arriba de La Cortá era de 40 m en cada margen. En presencia de caños secundarios esta distancia puede ser mayor. En la figura 5. se muestra el aspecto de la superficie inundada en la marisma desecada próxima al caño.***



4. Hidrodinámica de marea tras la apertura de La Cortá

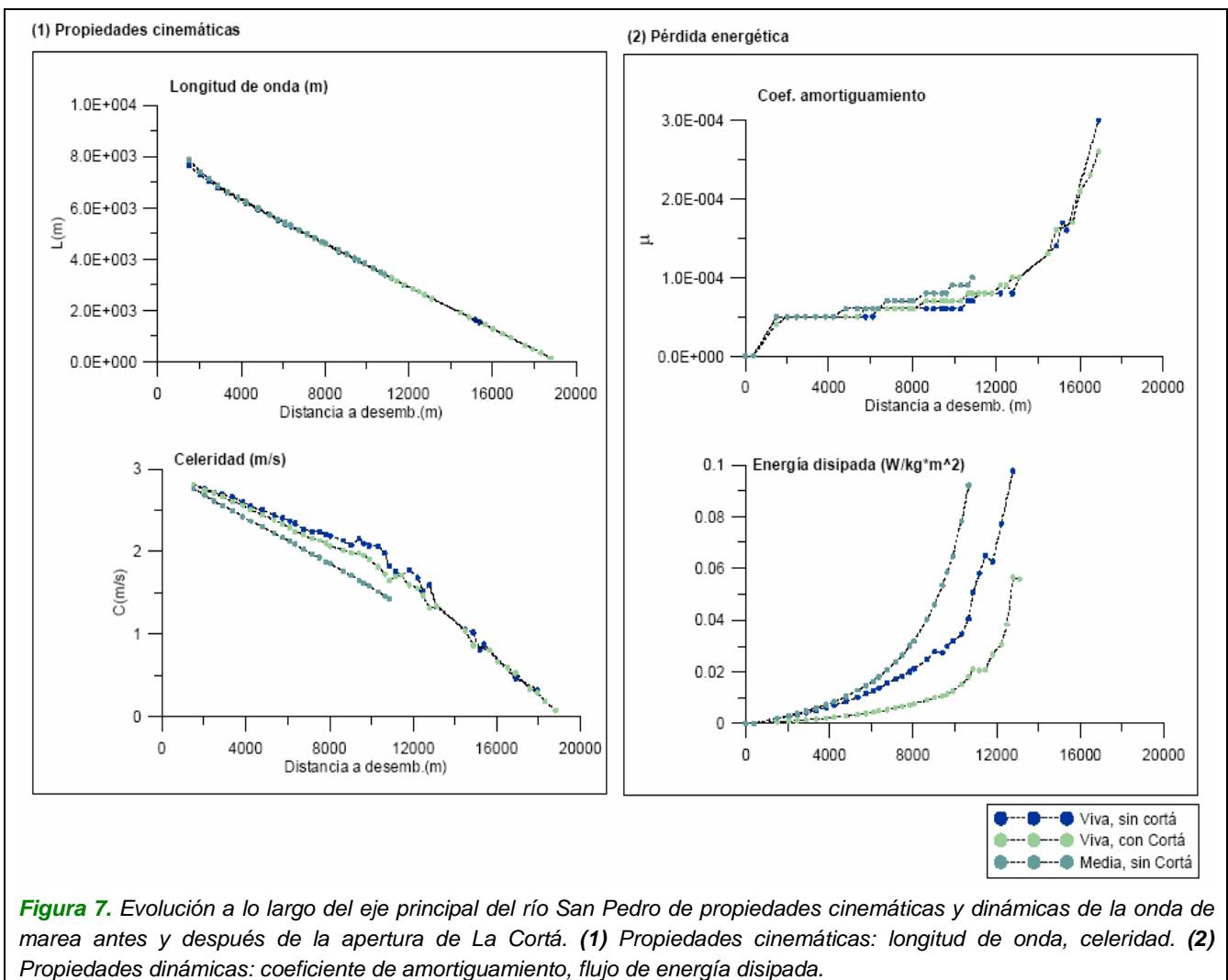
Con la apertura parcial de La Cortá (situación actual) en Mayo del 2004, la hidrodinámica de la marea a lo largo del caño del río San Pedro pasa a ser la característica de una onda estacionaria a una onda fundamentalmente progresiva.

A continuación se presentan los resultados para la onda de marea considerando el levantamiento de la presa de la Cortá. Se han respetado el resto de taludes existentes, tanto de las salinas adyacentes como de la variante de la carretera nacional IV y del ferrocarril.

Las principales características cinemáticas de la onda de marea en este caso son (ver **figura 3. anterior**):

- **Amplitud**

- **Se observa una paulatina disminución de la amplitud de marea desde la desembocadura aguas arriba. En mareas vivas equinociales, este descenso de amplitud varía desde 185 cm en la desembocadura hasta 135 cm en el área intermareal por encima de la presa eliminada. Superficies por debajo de esta cota quedan anegadas en periodos de pleamar. Esta cota de inundación podría ser superada por el efecto conjunto de la marea astronómica y meteorológica (asociada a borrascas) y por la acción del viento local.**
- **La razón del descenso en la amplitud de la onda es fundamentalmente el efecto disipativo (figuras 6. y 7.) de la fricción es muy pronunciado por la mayor extensión cubierta por las aguas y la escasa profundidad media que supone la región intermareal (en torno a 0.75 m).**

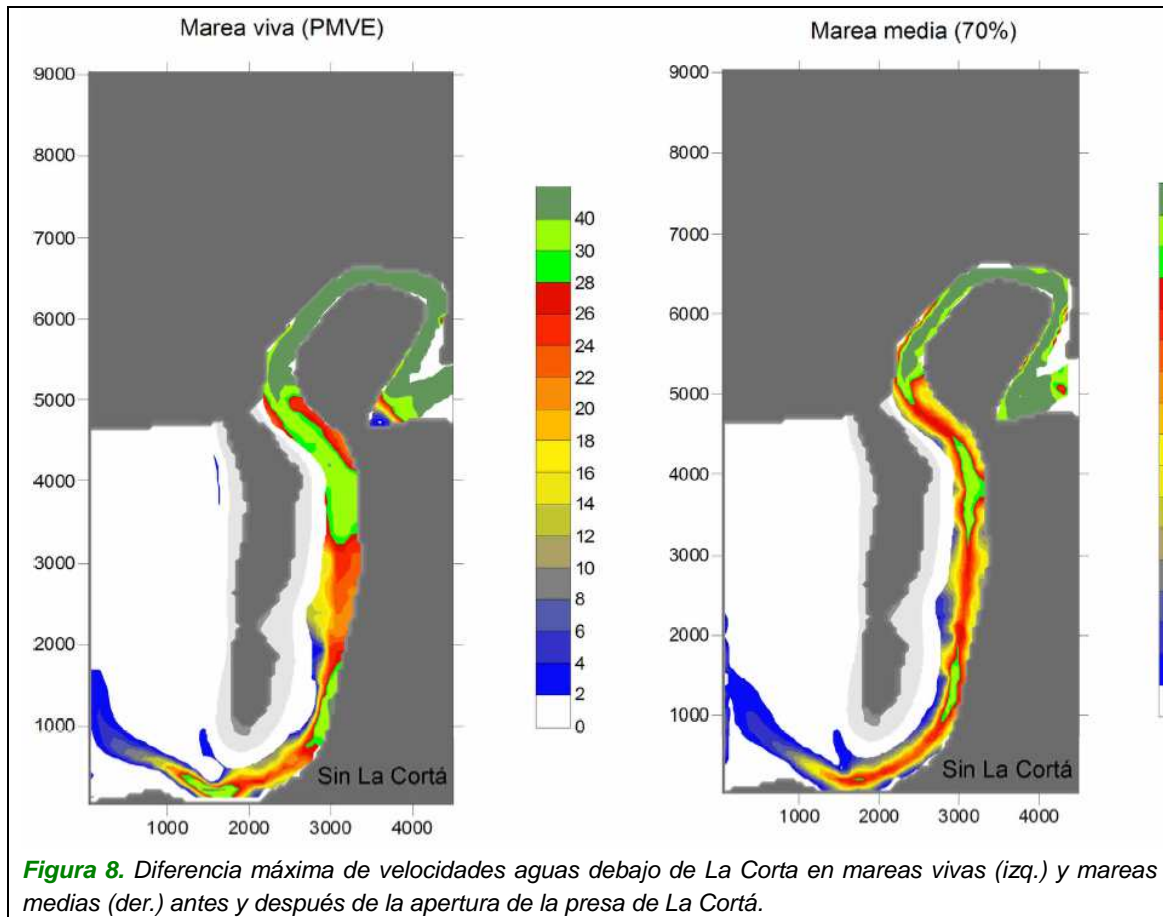


- **Fase.**

- Por las mismas razones que la amplitud, la onda de marea es decelerada durante su propagación. Este efecto se traduce en diferencias de fase de la onda desde 60° en las inmediaciones de la desembocadura hasta 140° en la región más oriental de la llanura intermareal. En estas condiciones, las pleamares no se alcanzan simultáneamente, sino que existe una diferencia horaria en torno a dos horas y 30 minutos entre ambos puntos (1 grado de diferencia corresponde aproximadamente a 2 minutos de retardo para una onda semidiurna).

- **Velocidad**

- Respecto a las corrientes de marea pronosticadas en el río con ausencia de la presa, los máximos valores se encuentran, al igual que con la presa presente, en el codo adyacente a la desembocadura de la Bahía exterior. Estas corrientes alcanzan valores máximos ligeramente superiores tanto en vivas equinociales como en mareas medias respecto a sus respectivos casos considerando la presa. Concretamente, estos valores alcanzan 160 cm s^{-1} durante las mareas vivas equinociales y 110 cm s^{-1} en mareas medias.
- La distribución de velocidades en presencia y ausencia de la presa cambia significativamente tal y como se pone de relieve en la **figura 8**.



En ausencia de La Cortá, el caudal medio necesario para inundar la zona intermareal en mareas vivas se estima del orden de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, que supone $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ en un semiperiodo llenante de 6 horas. Este resultado está de acuerdo con el obtenido considerando la profundidad media de la zona de 0.75 m y su área (aproximadamente 400Has). En este caso el volumen resultante es de $4 \times 10^6 \text{ m}^3$. En el periodo de mareas medias típicas el caudal total representa el 60% del generado en mareas vivas equinocciales máximas.

Como consecuencia del aumento del caudal medio y de la superficie de inundación se observa:

- El aumento significativo (ver **figura 4. anterior**) de las velocidades de flujo y reflujos en el cauce del río San Pedro. Se ha estimado que estas velocidades serían del orden de 150 cm/s en mareas vivas y 1 m/s en mareas medias.
- La inversión de la asimetría en las corrientes. En ausencia de La Cortá, las máximas corrientes se generarán durante el reflujos, al contrario que en presencia de La Cortá en las que las máximas velocidades se producen en el flujo. Este resultado ha sido observado en otras bahías

en el que las zonas intermareales predominan respecto a las permanentemente inundadas.

Estos cambios pueden tener consecuencias importantes desde el punto de vista del balance sedimentario y el equilibrio morfológico en la zona. En concreto, la configuración de corrientes inducida tras la apertura de La Cortá sugiere la existencia de un transporte neto de sedimento (fundamentalmente fino y en suspensión) en cada ciclo de marea hacia la Bahía Exterior. Este hecho, entre otros, está siendo evaluado por la estación de monitorización ARGUS instalada en la desembocadura del río San Pedro y operativa desde Junio de 2004.

5. Características hidrodinámicas del río San Pedro

Este estudio ha sido realizado por el Grupo de Oceanografía Física UCA y el Grupo de Oceanografía Interdisciplinar ICMAN-UCA de la Universidad de Cádiz, en Diciembre de 2004, siendo su autor Oscar Álvarez Esteban.

A) Aspectos generales de la Hidrodinámica de marea del Río San Pedro

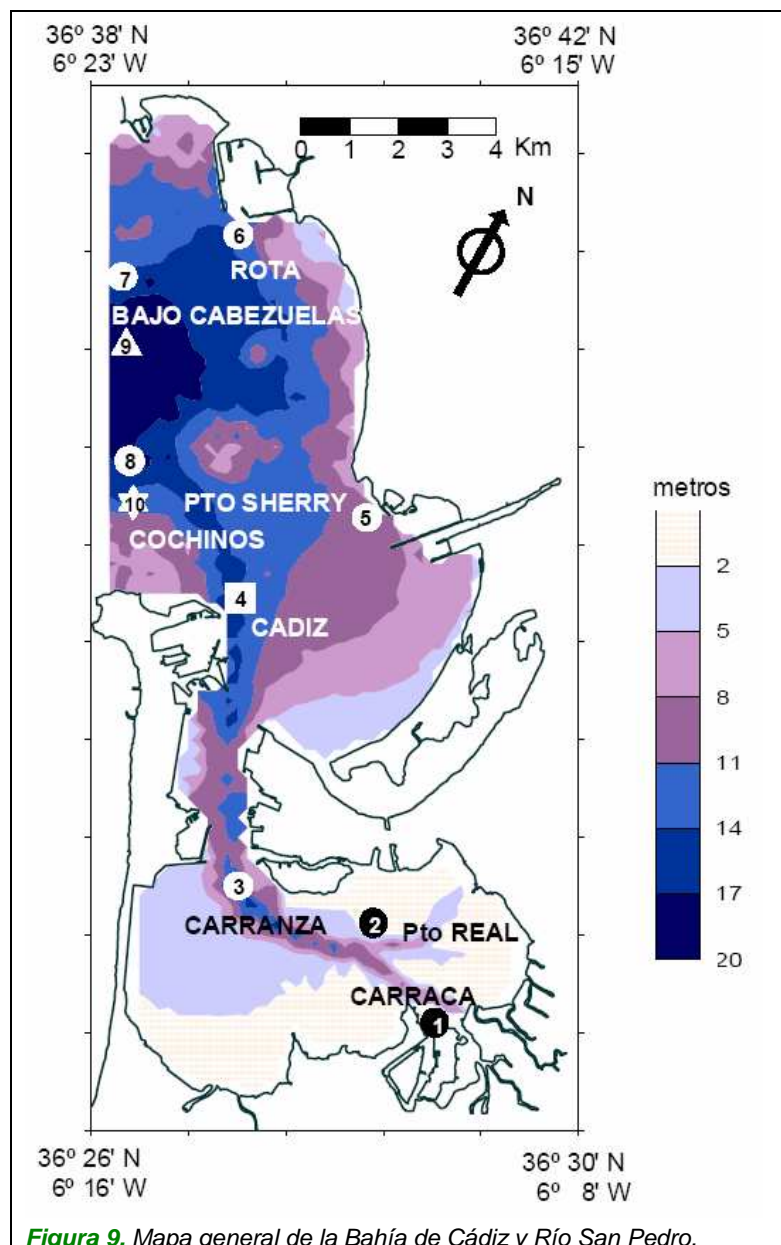
En el transcurso de los tiempos, la región de la Bahía de Cádiz ha estado sometida a un constante proceso evolutivo, lo cual ha provocado sucesivas transformaciones hasta alcanzar la configuración morfobatimétrica actual. El principal antecedente sobre el origen y evolución de la Bahía se encuentra en los estudios realizados por D. Juan Gavala y Laborde. Según Gavala (1958), la génesis morfológica de la Bahía de Cádiz y alrededores se debe a la acción erosiva y posterior sedimentación del estuario de río Guadalete, otrora portador de grandes avenidas. El gran caudal del Guadalete erosionó, en la época Diluvial, los materiales pliocenos depositados, desarrollando un amplio estuario en el que Cádiz y San Fernando constituirían dos fragmentos aislados del zócalo costero. La posterior regresión del régimen de precipitaciones provocó un proceso de sedimentación y relleno del estuario, en donde arenas y limos comenzaron a depositarse en la amplia ensenada, dando lugar a la actual configuración.

En la actual configuración, tres zonas aparecen claramente diferenciadas en la Bahía de Cádiz (**figura 9.**): Bahía exterior, Estrecho de Puntales y la Bahía Interior.

Así, respecto a la **Bahía Exterior**, cuya frontera natural con el Océano Atlántico - trazada en la línea imaginaria que une la Punta de Rota con Cádiz-, marca el

inicio de la misma, que se extiende hasta el Estrecho de Puntales y la desembocadura del brazo de marea que constituye el Río San Pedro.

Su extensión, entorno a 8000 Hectáreas y profundidad máxima de 18 metros, se encuentra delimitada por dos formaciones lobulares que la caracterizan: la primera, desde Punta de Rota hasta Santa Catalina conforma la playa del Chorrillo y de Santa Catalina, cuya continuidad natural se deshace por la presencia de la Base Aeronaval de Rota; la segunda, constituida por una formación en concha, forma las playas de Levante y la Puntilla, separadas ambas por el río Guadalete. Este lóbulo interior, de menor profundidad que el exterior, termina en el angosto Estrecho de Puntales del cual le separa el río San Pedro que se comporta, desde el punto de vista hidrodinámico, como un canal de marea tal y como se desarrollará posteriormente.



El río San Pedro se encuentra conectado al área de la Bahía Exterior en la frontera con el Estrecho de Puntales (**figura 10.**). Está sometido, pues, a su régimen hidrodinámico de mareas de carácter estacionario, ya que se halla condicionado por el forzamiento inducido desde la Bahía de Cádiz. ***El espectro de mareas es, por tanto, de tipo semidiurno (dos plemares y dos bajamares por día), con amplitudes de elevación medias de 107 cm y vivas equinocciales de 182 cm*** y velocidades de flujo y reflujo en su interior superiores, en algunos puntos de su trazado, a 1 m s^{-1} . La intervención antrópica en el curso del Río y sus peculiares características morfométricas configuran unas características propias que deben ser consideradas, y que se comentan a continuación.

B) Características morfológicas del Río San Pedro

El Río San Pedro representa un caño sometido al régimen de mareas de la Bahía, con características de flujo y reflujo mareal propias de un comportamiento típicamente estacionario. En la actualidad su cauce está configurado por un canal principal de 4 m de profundidad media, y una amplia zona intermareal en ambas orillas que sigue el curso ascendente 6 Km aguas arriba hasta la Presa de la Cortá atravesando el parque natural de la Bahía de Cádiz. La Presa, de origen antrópico, permite en la actualidad, a pesar de la apertura parcial de la misma, un mínimo intercambio de agua entre esta zona y la amplia región intermareal actualmente desecada potencialmente anegadiza, cuya extensión estimada es de 4 Km^2 . ***Debido a la presencia de la presa la marea, por encima de este punto, no supera cotas superiores a 40 cm por encima del nivel medio local, por lo que la planicie, exceptuando el cauce principal del río, no se inunda en la actualidad.***



Figura 10. Área del Río San Pedro actualmente inundada y zona potencialmente anegadiza. El trazo rojo delimita la zona considerada.

Topografía y batimetría de la zona de estudio

Respecto a la topografía, para la obtención de las características morfológicas se han realizado observaciones topográficas de muy alta precisión, cubriendo las secciones radiales desde el cauce del río en el área de interés (**figura 11**). Los resultados han permitido determinar las pendientes topográficas características del área de estudio y la implementación de las isolíneas de nivel con un alto grado de fiabilidad y precisión centimétrica. Las figuras representan las secciones observadas y la extrapolación efectuada de los valores para la obtención de las curvas de nivel. **Los valores están referidos al nivel medio del mar local, el cual se halla 20 cm por encima del nivel medio del mar en Alicante. (figura 12).**

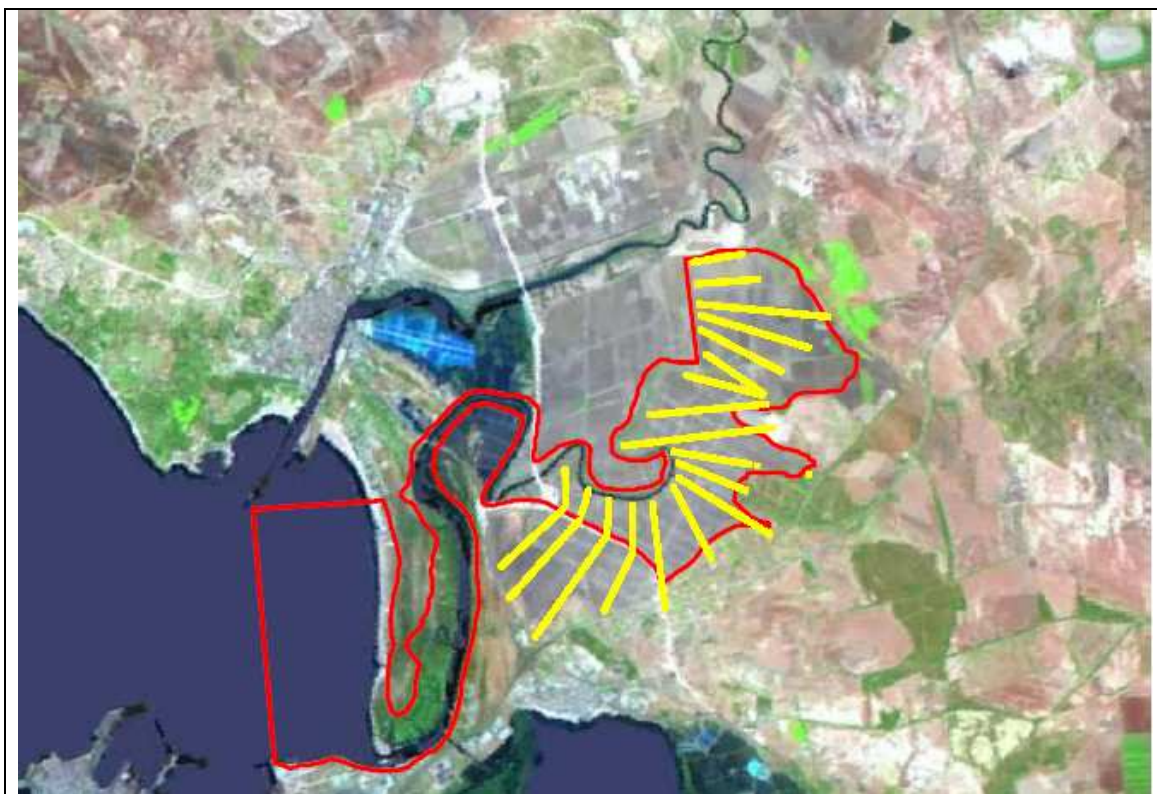


Figura 11. Localización espacial de las medidas topográficas. Los puntos amarillos representan los emplazamiento en los cuales se efectuaron las medidas, que incluyen más de 2000 observaciones de muy alta resolución.

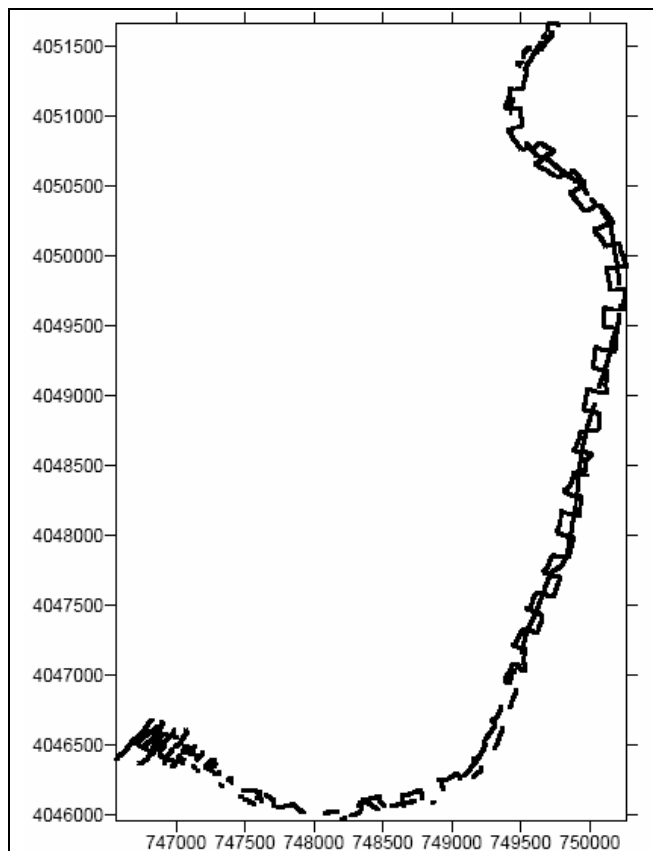


Figura 12. Localización espacial de las observaciones batimétricas. (coordenadas UTM, Huso 30)

En relación a la batimetría, en los tramos navegables del río San Pedro, ésta se ha medido explícitamente a través de ecosondas de alta resolución, y completadas con las cartas 443 A y 443 B publicadas por el IHM. La localización espacial de las observaciones baimétricas efectuadas se representa esquemáticamente en la **figura 12**. Con el fin de referir los datos batimétricos al mismo sistema de referencia topográfico, se midieron cotas respecto a la lámina de agua simultáneamente en el vértice 305 situado en la Cabezuela, el mismo que fue utilizado en la determinación de las cotas topográficas.

En la actualidad su cauce está configurado por un canal principal de 4 m de profundidad media, exceptuando la zona cercana a la desembocadura, en donde existen zonas que superan 7 metros de profundidad. La representación gráfica de la topobatimetría total, referida al nivel medio, se presenta en las **figuras 14 y 15**. Con el fin de apreciar más claramente las pendientes y estructura morfológica de la zona intermareal, las cotas han sido sometidas a un proceso de suavizado respecto a los datos topográficos reales obtenidos.

C) Información experimental preliminar

Durante los meses de enero, febrero y julio de 2004, se realizaron campañas de campo consistentes en la adquisición de datos de elevación y corrientes en lugares estratégicos del área de interés. La **figura 16** representa los emplazamientos en donde se registraron los datos. El anexo correspondiente contiene toda la información relativa a estas campañas y tratamiento de datos. Para obtener las características hidrodinámicas de elevación y velocidad asociada en todo el dominio de interés, se ha utilizado además un modelo numérico de muy alta resolución resuelto en diferencias finitas, el cual ha sido convenientemente validado con estos datos de campo para asegurar la fiabilidad de los resultados. Éstos se presentan a continuación.

D) Simulación numérica de la dinámica de marea.

• Características básicas del modelo numérico UCA2D

En regiones de aguas someras no estratificadas, los movimientos de agua son fundamentalmente horizontales, por lo que la formulación matemática que describe el comportamiento de los procesos hidrodinámicos en aguas someras, basada en las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de conservación de la masa, puede reducirse a un sistema bidimensional. En el Río San Pedro, la presencia de flujo estratificado podría ser debida al aporte de agua dulce procedente del drenaje terrestre y a la influencia exterior de las plumas

estratificadas que provienen del estuario del Guadalquivir, del Río Guadalete o del Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar. Sin embargo, el escasísimo caudal de agua dulce de drenaje y el proceso de mezcla en mar abierto que sufren las plumas del Guadalquivir y el Estrecho de Gibraltar hacen que en la región del río San Pedro no se detecte la presencia de flujos estratificados. Este comportamiento ha sido corroborado experimentalmente a partir de los datos de corriente registrados con un correntímetro doppler durante el mes de julio de 2004 en el área de la desembocadura. Este instrumento es capaz de medir la distribución de la corriente a lo largo de toda la columna de agua en el punto de coordenadas horizontales en el que se halla instalado. Los datos (**figura 17**) muestran un comportamiento similar en toda la columna de agua, como corresponde al caso de un flujo no estratificado o verticalmente homogéneo, por lo que la aproximación bidimensional está plenamente justificada.

Las ecuaciones que rigen el proceso, pueden escribirse por tanto como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{ru\sqrt{u^2 + v^2}}{H} &= \frac{\rho_a C_D w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho H} + \frac{A_h}{H} \nabla(H\nabla u) , \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{rv\sqrt{u^2 + v^2}}{H} &= \frac{\rho_a C_D w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2}}{\rho H} + \frac{A_h}{H} \nabla(H\nabla v) , \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial uH}{\partial x} + \frac{\partial vH}{\partial y} &= 0 , \end{aligned}$$

En donde u , v son las componentes cartesianas de la velocidad promediadas verticalmente; ξ la elevación de la superficie libre del agua sobre el nivel medio h ; $H = h + \xi$ la profundidad total; f el parámetro de Coriolis; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ y A_h representa el coeficiente de viscosidad numérica.

El método de las diferencias finitas aproxima cada una de las derivadas de la ecuación diferencial por sus expresiones finitas en forma de incrementos. Con esta aproximación, la región de variación continua de las variables del dominio original se sustituye por un conjunto discreto de puntos llamados nodos. El conjunto de todos los nodos del dominio, que representa el dominio discreto, se denomina malla. Las funciones originales de variable continua se transforman en sus correspondientes funciones de variable discreta, definidas sólo en cada nodo de la malla. Las condiciones iniciales y de contorno también se aproximan por sus correspondientes condiciones en diferencias. La ecuación final queda convertida con esta aproximación a una algebraica, la cual se resuelve numéricamente.

La malla de cálculo utilizada para el estudio se ha desarrollado en muy alta resolución con 75.000 nodos, tomando como referencia las características topobatómetricas suavizadas representadas en la **figura 14**. Con esta malla se obtiene un dato representativo de cada porción de área de 7 x 7 m. Para los contornos representativos de la presencia de costa se ha utilizado la condición de impenetrabilidad, por lo que se ha considerado el flujo perpendicular a costa nulo. Para establecer las condiciones de contorno dinámicas de velocidad y elevación en la frontera del dominio con la Bahía de Cádiz se han utilizado los datos observados y simulaciones numéricas efectuadas considerando todo el ámbito de la Bahía de Cádiz. Esta condición se ha prescrito como una condición radiativa en términos de las desviaciones de los datos observados respecto a los calculados en la frontera, para asegurar que las perturbaciones que pudieran generarse en el interior del dominio sean radiadas fuera de éste. Los resultados obtenidos han sido contrastados con los observados registrados en las diversas campañas de campo realizadas para la realización de este Estudio. Las diferencias obtenidas al simular numéricamente los intervalos temporales coincidentes con la instalación de instrumentos no ha mostrado diferencias de los datos calculados frente a los observados superiores a 4 cm para la amplitud 5 cm/s para la velocidad en todas las series, lo cual representa la bondad y representatividad de las simulaciones efectuadas.

Los resultados y la interpretación de los mismos se presentan a continuación, en el siguiente apartado.

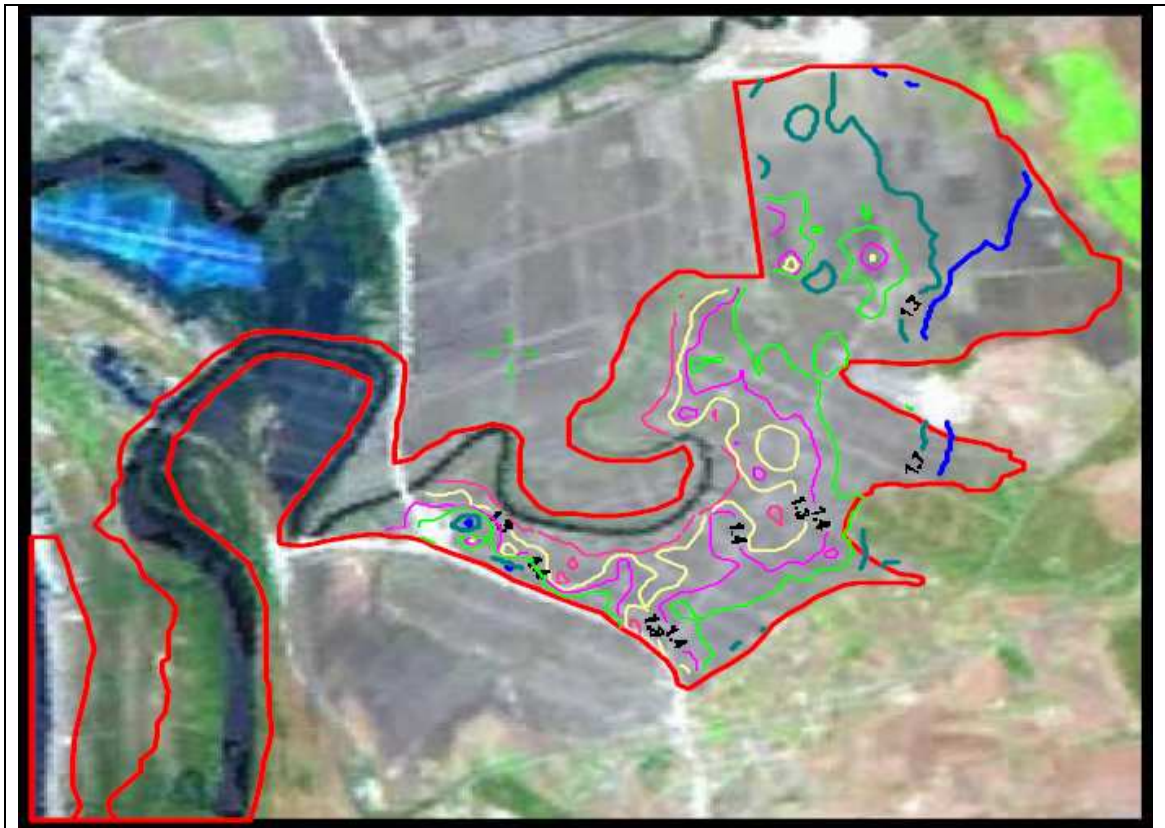


Figura 13. Representación topográfica de los valores observados. El valor representativo de la isolinea, expresado en metros, aparece sobre la misma. El nivel de referencia se encuentra situado en el nivel medio local.

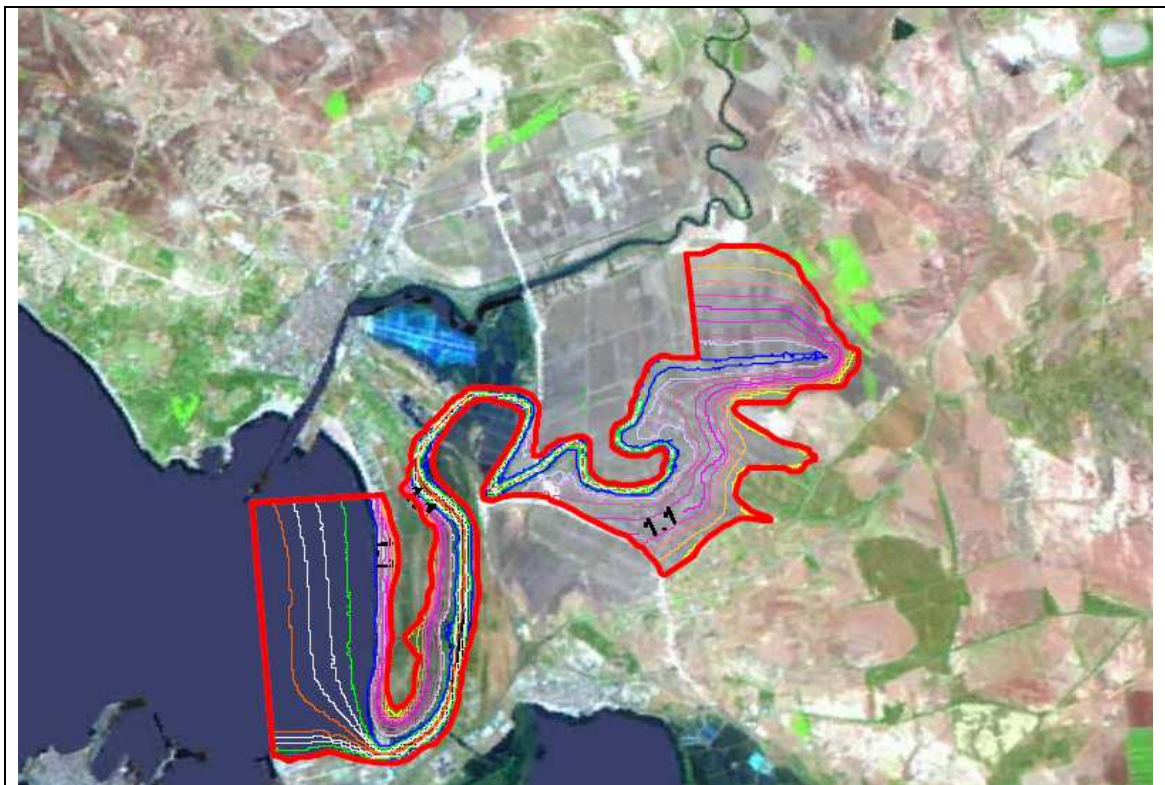


Figura 14. Representación batimétrica y topográfica de la zona de estudio. En esta representación, referida al nivel medio local, se han suavizado las pendientes topográficas para apreciar con más claridad

la morfología de la zona. Las isólinas se representan a intervalos de 0.25 m en tierra y 0.5 m en el agua. La isólinas azul representa la cota de nivel 0 (nivel medio local). La isólinas amarilla corresponde a la cota 1.85 m. La cota 1.1 m aparece expresada numéricamente en la isólinas correspondiente.

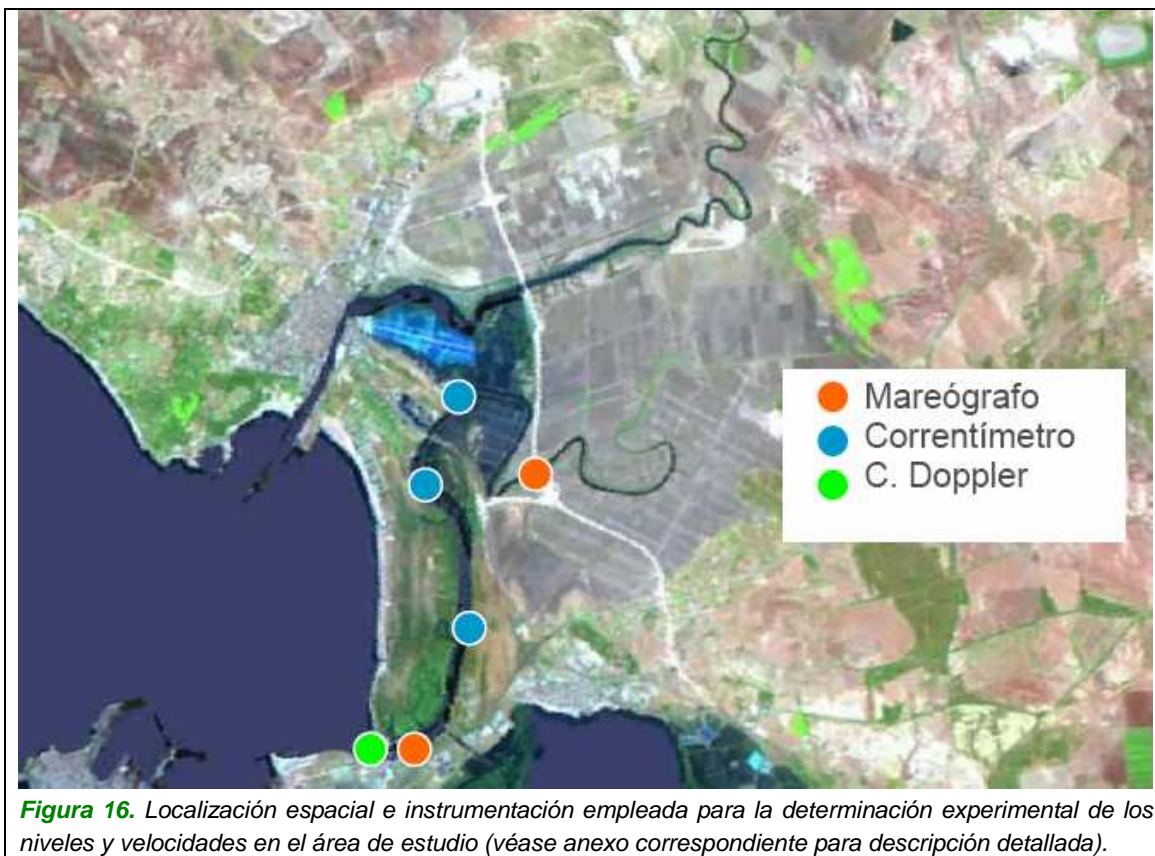


Figura 15. Imagen tridimensional de la representación topobatimétrica con las mismas características de la figura 14.

- **Características hidrodinámicas**

- Fase de diagnóstico: régimen de marea actual*

El régimen de marea actual está condicionado por la influencia antrópica de la presa de la Cortá, la cual, desde el punto de vista hidrodinámico, representa una pared establecida como condición de casi-impenetrabilidad. Los resultados obtenidos muestran el carácter predominantemente estacionario que presenta la onda en el interior del río, en donde los instantes de máxima elevación se producen en instantes cercanos a la transición de corrientes de flujo a reflujos. Debido al importante efecto de la fricción existente asociado a la escasa profundidad del recinto, la fase de la onda crece aguas arriba, lo cual se traduce en un retardo en la propagación de la onda entorno a 40 minutos desde la bahía exterior hasta la presa de la Cortá (**figura 21**). Los niveles medios a lo largo de la misma zona representan valores de 107 cm de amplitud respecto al nivel medio local, con variaciones máximas entorno a 2 cm a lo largo del cauce (**figura 17**). Esta característica cualitativa se mantiene también en los periodos mareas vivas-muertas quincenales y mensuales, si bien en mareas vivas la amplitud media es de 150 cm y en mareas muertas de 70 cm.



Los valores de estas elevaciones en pleamares máximas vivas equinocciales muestran, sin embargo, una variabilidad superior, disminuyendo su amplitud desde 1,85 m en la región fronteriza con la Bahía Exterior hasta 1,78 m en la presa de la Cortá. La razón de esta variabilidad debe buscarse en el mayor efecto de la disipación energética que supone la fricción con el fondo debido a las mayores velocidades asociadas, así como en la mayor extensión anegadiza que supone la presencia de mayores amplitudes. (figuras 20 y 21)

Aguas arriba de la presa de la Cortá, las corrientes de flujo y reflujo disminuyen sustancialmente por el impedimento que supone ésta, y por tanto las elevaciones, que no superan en la actualidad 40 cm.

Especial mención merece la distribución de flujo y reflujo a lo largo del río. El mayor régimen de velocidad, independientemente del periodo de mareas astronómica presente, se produce en la región del cauce de la región acodada próxima a la desembocadura. Estas corrientes deben representar una importante acción erosiva en la zona y se corresponde con las áreas efectivas de mayor profundidad observadas en las campañas batimétricas. En periodos de pleamar viva (figura 20) equinoccial las corrientes alcanzan 150 cm/s, mientras que las velocidades en un periodo de marea medio llegan a superar 1m/s en esta zona (figura 23).

La segunda característica relevante de las corrientes es la progresiva disminución de la velocidad máxima en puntos más cercanos a la presa. Esta característica, propia de los regímenes estacionarios e independiente de la fase astronómica de la marea, se debe al impedimento que supone la presa para la libre circulación de la onda, provocando la reflexión de la misma. La tercera característica relevante de las corrientes, que se refleja tanto en los datos observados (figura 24) como en los calculados, es la asimetría que se genera en la onda de marea, dando lugar a corrientes de flujo superiores a las de reflujo en la situación actual. Este proceso, debido al papel de la fricción, es un parámetro indicador muy eficaz de las características asociadas al transporte de sedimento, y sugiere la ausencia de equilibrio morfosedimentario en las condiciones hidrodinámicas actuales.

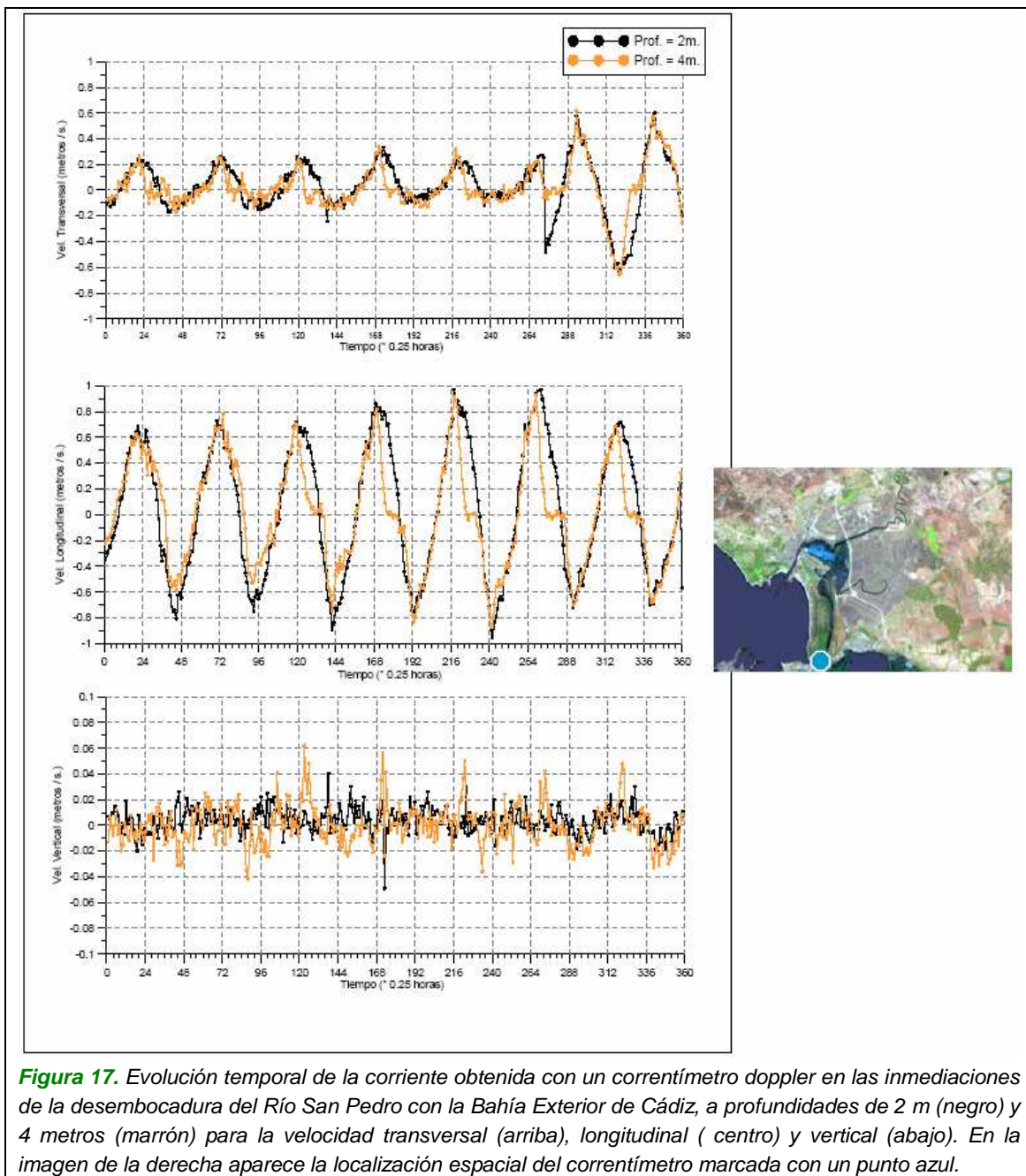


Figura 17. Evolución temporal de la corriente obtenida con un correntímetro doppler en las inmediaciones de la desembocadura del Río San Pedro con la Bahía Exterior de Cádiz, a profundidades de 2 m (negro) y 4 metros (marrón) para la velocidad transversal (arriba), longitudinal (centro) y vertical (abajo). En la imagen de la derecha aparece la localización espacial del correntímetro marcada con un punto azul.

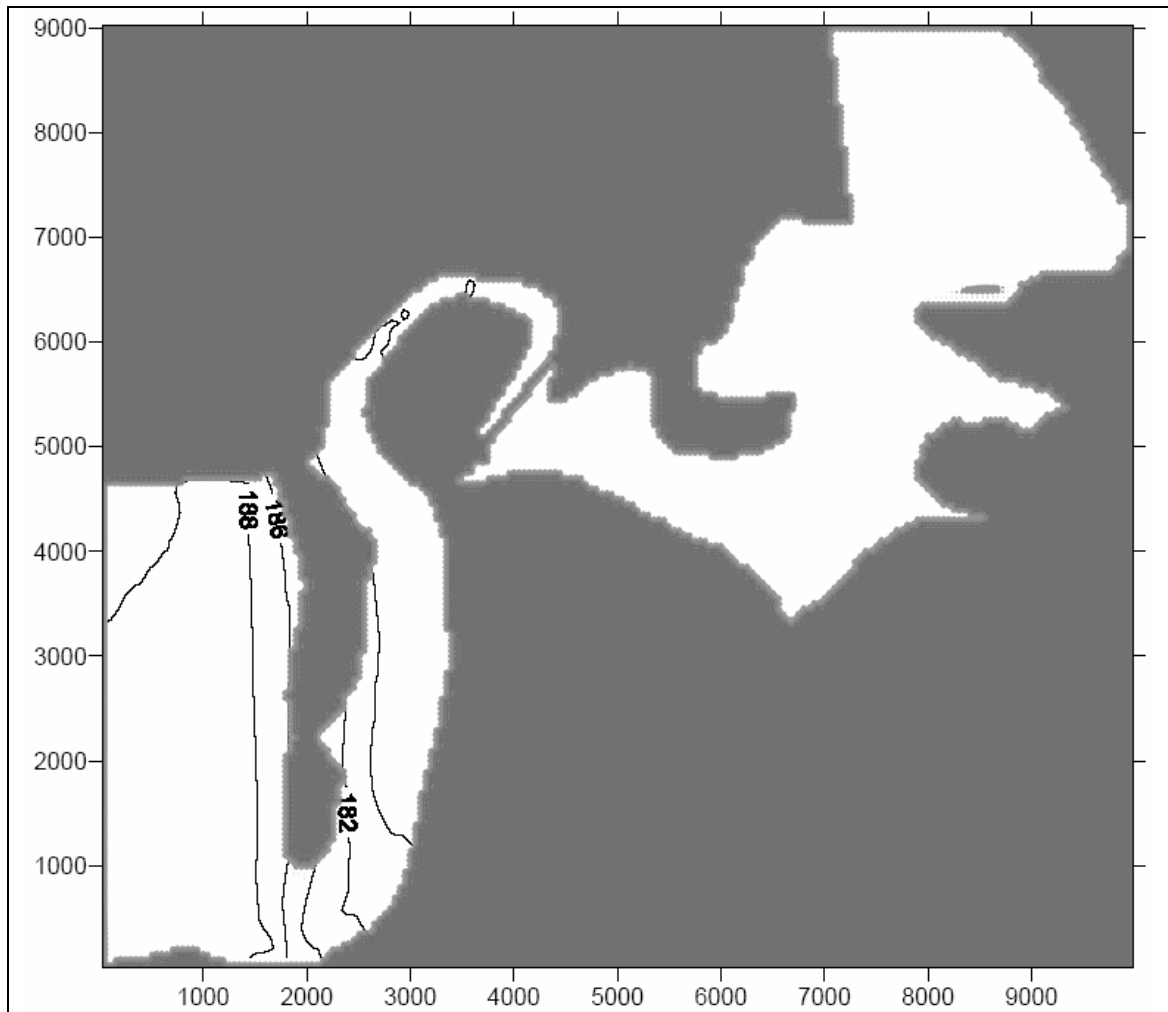


Figura 18. *Isolíneas de amplitud, expresadas en cm, para una marea viva equinoccial en la situación actual.*

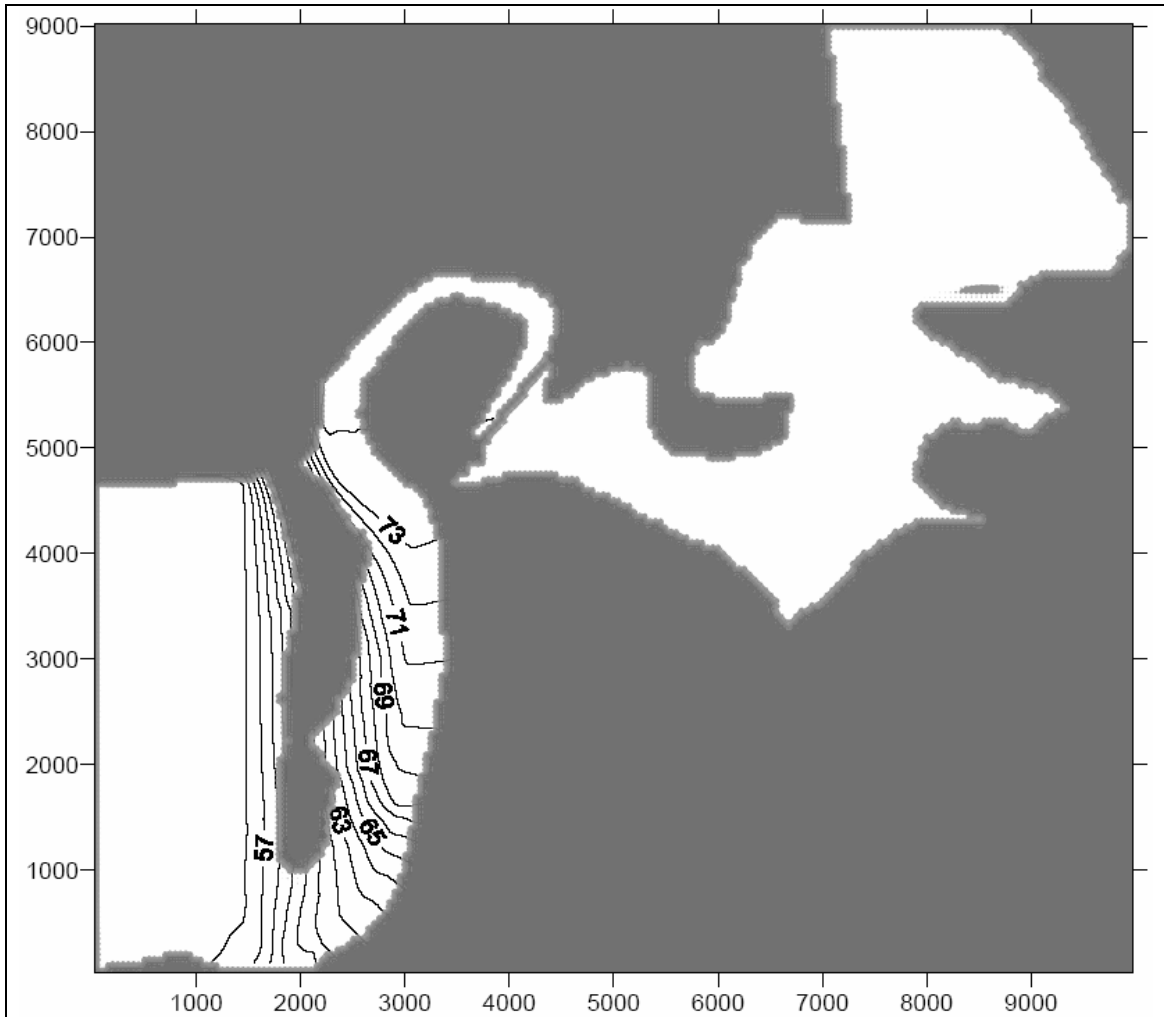
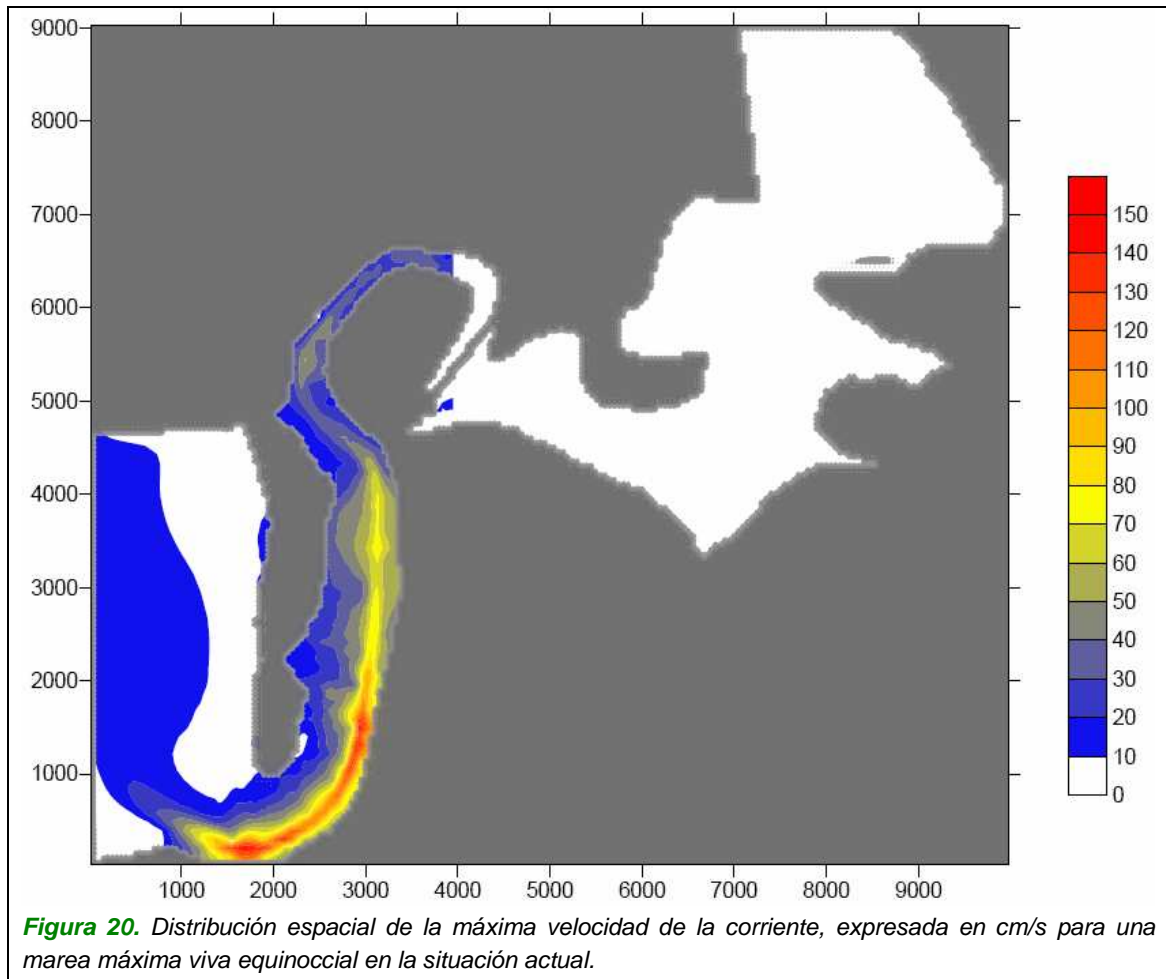


Figura 19. *Isolíneas de fase, expresadas en grados Greenwich, asociada a la elevación en la situación actual. Una diferencia de un grado corresponde, aproximadamente, a un retardo de 2 minutos para una onda semidiurna.*



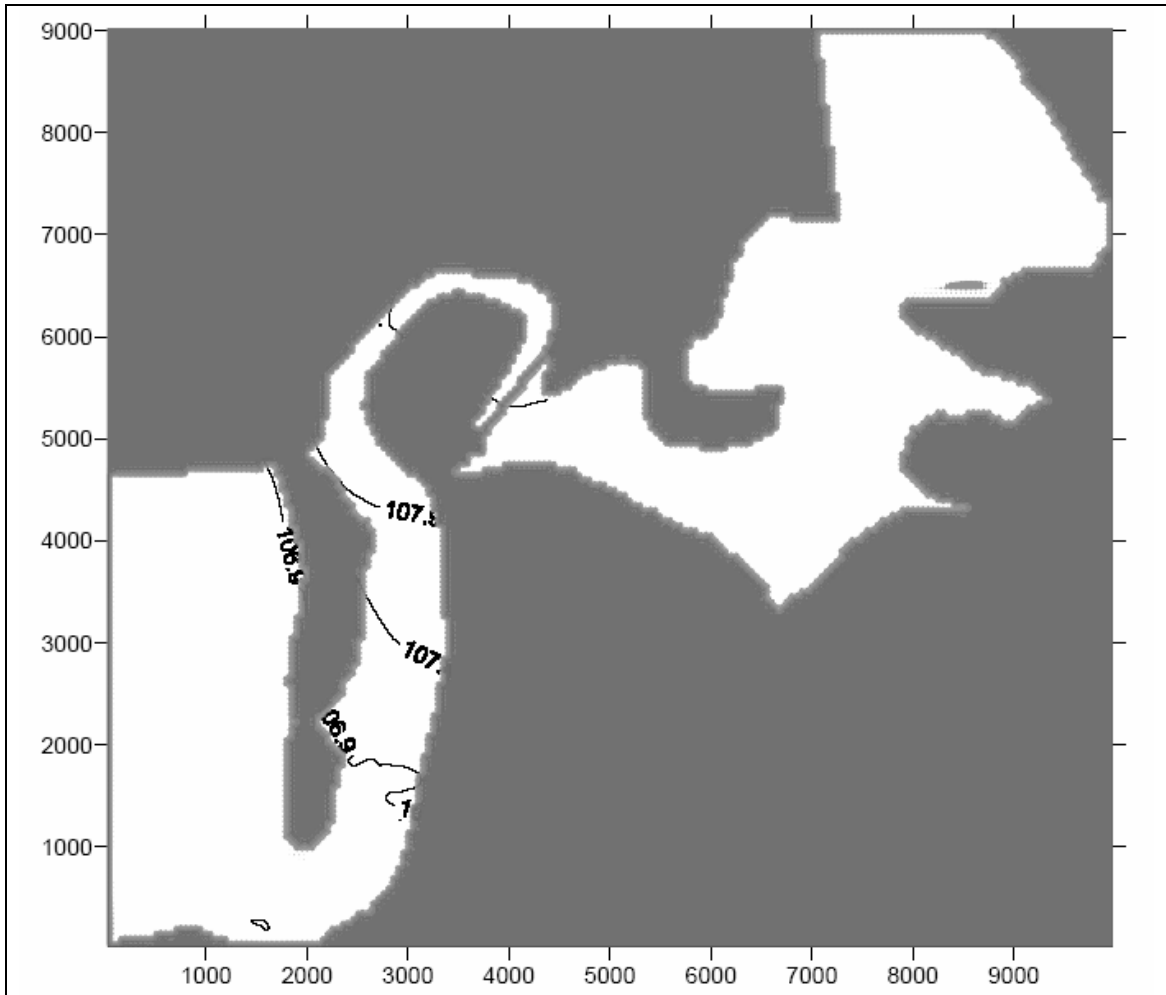


Figura 21. *Isolíneas de amplitud, expresadas en cm, para una marea media en la situación actual.*

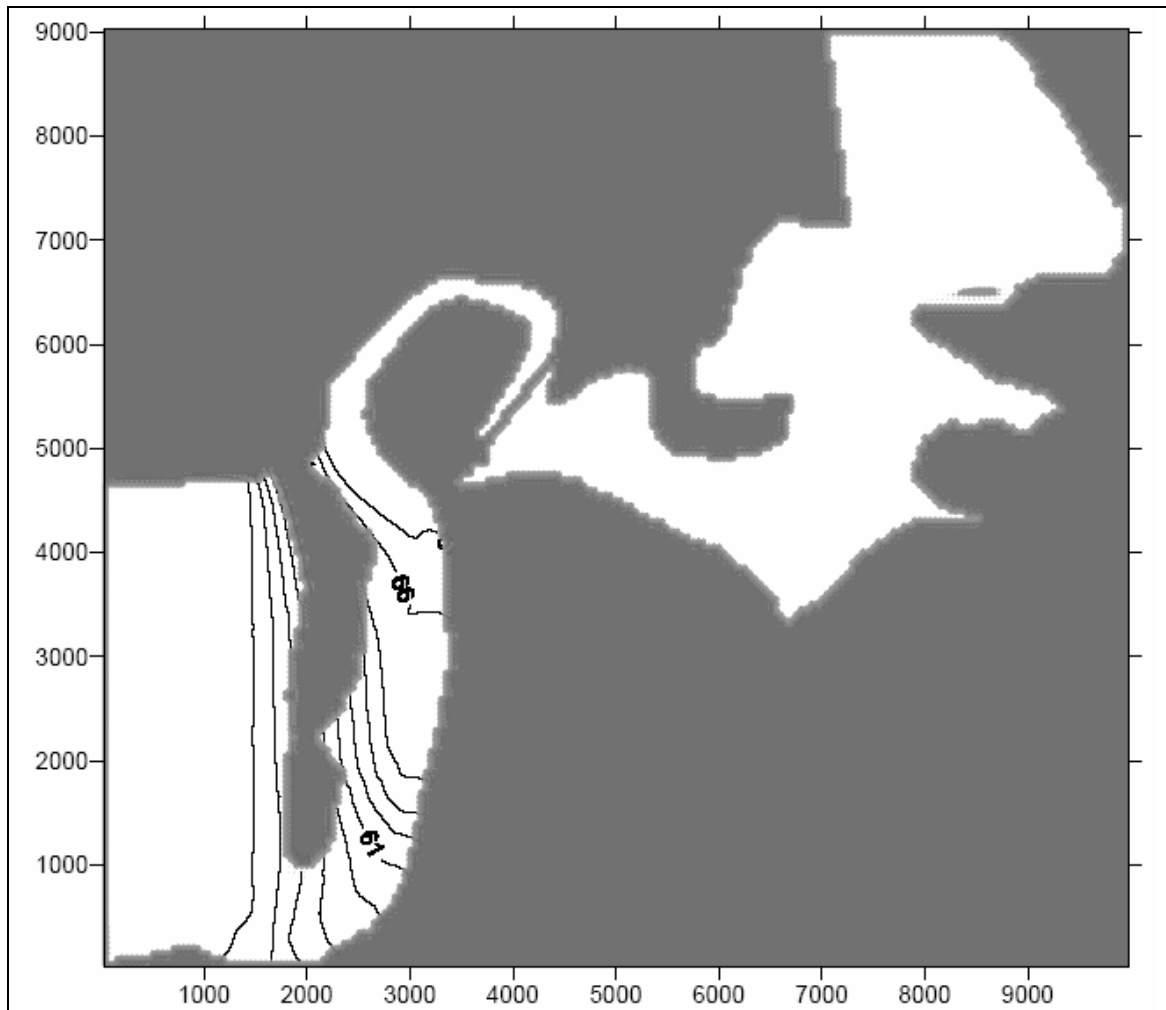


Figura 22. *Isolíneas de fase, expresadas en grados Greenwich, asociada a la elevación en la situación actual para una marea media. Una diferencia de un grado corresponde, aproximadamente, a un retardo de 2 minutos para una onda semidiurna.*

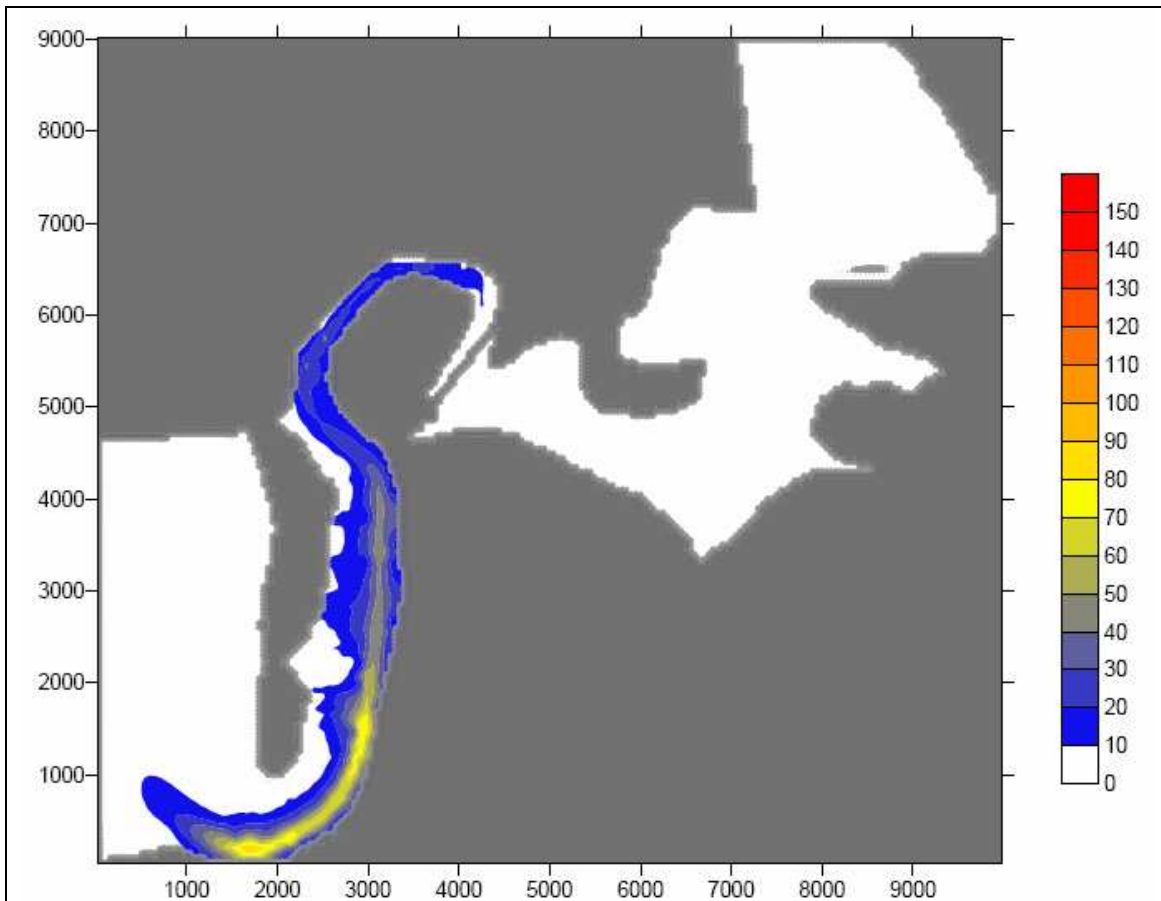


Figura 23. Distribución espacial de la máxima velocidad de la corriente, expresada en cm/s para una marea media en la actual situación.

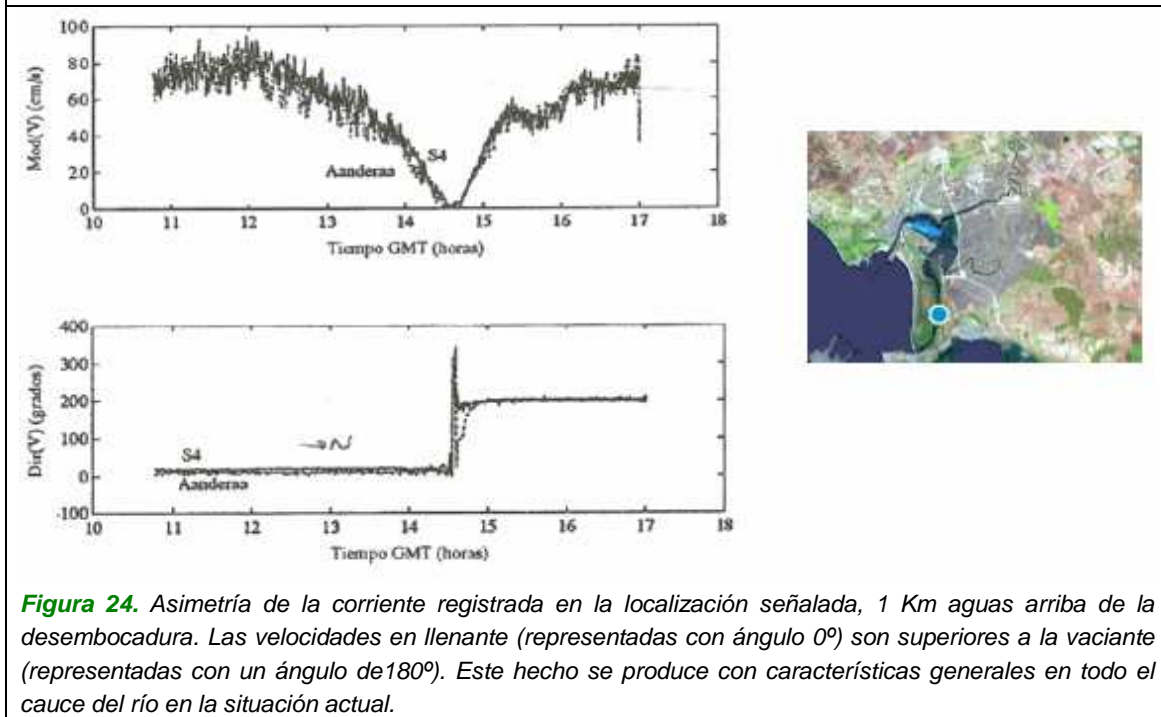


Figura 24. Asimetría de la corriente registrada en la localización señalada, 1 Km aguas arriba de la desembocadura. Las velocidades en llenante (representadas con ángulo 0°) son superiores a la vaciante (representadas con un ángulo de 180°). Este hecho se produce con características generales en todo el cauce del río en la situación actual.

Fase de pronóstico: régimen de marea en ausencia de la presa de la Cortá

A continuación se presentan los resultados para la onda de marea considerando el levantamiento de la presa de la Cortá, y eliminado los taludes que impiden el libre tránsito de la onda de marea en el cauce (véase trazo rojo de la **figura 25**, en la que se representa la porción de talud eliminada). Se han respetado el resto de taludes existentes, tanto de las salinas adyacentes como de la variante de la carretera nacional IV y del ferrocarril. **La eliminación de esta presa supone la inundación del área actualmente desecada, con un área estimada de 4 Km² y profundidad media de 0.75 m, regresando ésta a su condición natural de planicie intermareal (figura 26.) previa a la construcción de la presa. La ausencia de la Cortá lleva asociado, naturalmente, un cambio apreciable en las características de marea en la zona a lo largo de toda su extensión,** que requiere algunos comentarios.

Respecto a la elevación, la ausencia de la presa y el importante cambio las características geométricas del área potencialmente anegadiza, provoca una paulatina disminución de la amplitud de marea desde la desembocadura aguas arriba. En mareas vivas equinociales, este descenso de amplitud varía desde 185 cm en la desembocadura hasta 135 cm en el área intermareal por encima de la presa eliminada. Esta amplitud supone, pues, que la cota 1.35 m por debajo del nivel medio queda anegada en periodos de plemares vivas equinociales (figura 27). La razón de este descenso en la amplitud de la onda es doble: por un lado, el efecto disipativo de la fricción es muy pronunciado por la mayor extensión cubierta por las aguas y la escasa profundidad media que supone la región intermareal (en torno a 0.75 m); por otro, el estrecho cauce en el canal principal del río genera un flujo que no es suficiente para llenar completamente toda la extensión anegadiza intermareal en el periodo de llenante, ni vaciarla completamente en el periodo de reflujó. Estos dos procesos evolucionan simultáneamente dando lugar a la distribución de amplitudes comentada.

Sin embargo, la cota 1.35 m podría ser superada eventualmente por el efecto conjunto sobre el nivel de la marea astronómica viva equinoccial junto a los efectos meteorológicos asociados a la presión y al viento asociados a borrascas.

Por las mismas razones que la amplitud de la onda ve reducida su amplitud, (a saber, los importantes efectos de la fricción y a la presencia de las amplias zonas intermareales) la onda de marea sufre también un retardo progresivo en su propagación. Esta característica se traduce en diferencias de fase de la

onda desde 60° en las inmediaciones de la desembocadura hasta 140° en la región más oriental de la llanura intermareal (**figura 29**). Esta diferencia de fase indica que las pleamares no se alcanzan simultáneamente, sino que existe una diferencia horaria en torno a dos horas y 30 minutos entre ambos puntos (1 grado de diferencia corresponde aproximadamente a 2 minutos de retardo para una onda semidiurna). Este comportamiento se sigue reproduciendo durante un periodo de mareas medias, en donde se producen retardos ligeramente inferiores, en torno a 2 horas y 15 minutos (**figura 30**), debido fundamentalmente a la menor fricción que en el caso anterior, por ser menor la velocidad.

Respecto a las corrientes de marea pronosticadas en el río con ausencia de la presa, los máximos valores se encuentran, al igual que con la presa presente, en el codo adyacente a la desembocadura de la Bahía exterior (**figura 31** mareas vivas y **figura 32** mareas medias).

Estas corrientes alcanzan valores máximos ligeramente superiores tanto en vivas equinocciales como en mareas medias respecto a sus respectivos casos considerando la presa. Concretamente, estos valores alcanzan 160 cm s⁻¹ durante las mareas vivas equinocciales y 110 cm s⁻¹ en mareas medias.

No obstante, aparecen claras diferencias respecto al caso diagnosticado considerando la presencia de la presa, tanto en los aspectos cuantitativos como cualitativos, que requiere incluir algunos comentarios. Es evidente al comparar las características de las máximas corrientes considerando y sin considerar la presa, que ésta configura la distribución de las corrientes, por cuanto establece una condición de impenetrabilidad que se traduce en velocidades muy pequeñas en sus inmediaciones. Al eliminar la presencia de la presa, la condición de impenetrabilidad desaparece también, convirtiéndose la sección que la albergaba en zona de tránsito obligado de toda la masa de agua que inunda la superficie intermareal. En esta sección, el caudal medio de agua estimado necesario que la para inundar la zona intermareal en mareas vivas es de 150 m³/s, que supone 3x10⁶ m³ en un semiperiodo llenante de 6 horas. Este resultado está en consonancia, como es menester, con el volumen inundado de agua considerando la profundidad media de la zona inundada, 0.75 m, y el área de la misma, 4 Km² y lleva consigo, por tanto, un importante incremento cuantitativo de las velocidades en las estrechas secciones de zona de meandros actualmente inundados cercana a la ubicación de la presa eliminada. En esta zona, las velocidades estimadas serían muy superiores a las obtenidas en la actualidad, en torno a 150 cm/s en mareas vivas (**figura 36**), y 1 m/s en mareas medias (**figura 29**). En el periodo de mareas medias típicas el caudal total representa el 60% del generado en mareas vivas equinocciales máximas.

El aumento significativo del caudal de agua que se introduce en el dominio internareal al eliminar la presa de la Cortá queda reflejado, como ha sido comentado, en el cambio de la distribución espacial de corrientes. Éstas se aprecian claramente al examinar las diferencias entre las máximas velocidades considerando la presa de la Cortá eliminada respecto al mismo caso contemplando, tal y como ocurre actualmente, la citada presa. Estas diferencias, tanto para un periodo de mareas vivas equinocciales como para un periodo de mareas medias quedan reflejadas en las **figuras 33 y 34**. A la vista de las mismas, las tasas de cambio más importante se producen tanto en la zona cercana a la posición de la presa de la Cortá, como ha sido comentado con anterioridad, como en la región acodada del cauce del río próxima a la desembocadura. En esta zona adyacente a la Bahía exterior de Cádiz, la diferencia de velocidad máxima excede 35 cm/s en periodos de máximas plemares vivas y se acerca a 30 cm/s en un periodo típico de mareas medias. Este comportamiento no debe resultar extraño, ya que las máximas velocidades de la corriente se producen en este tramo próximo a la desembocadura, y por esta zona se producirá la carga y descarga del caudal de agua adicional que inundará la amplia región intermareal al eliminar la Presa de la Cortá, estimado, como ya se ha comentado, en $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ en un periodo de mareas vivas equinocciales. Durante un periodo de mareas medias típicas el caudal total representa el 60% del generado en mareas vivas equinocciales máximas, por tanto $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$, que supone un área anegadiza en torno 3 Km^2 para una profundidad media de 60 cm y un caudal medio de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 6 horas de llenante.

Por otra parte, es destacable asimismo la inversión de las asimetrías existentes en las corrientes respecto a la actual configuración con la presa presente. Ahora, las máximas corrientes se generarán durante el refluo, al contrario que en la situación actual, donde se producen en el periodo de flujo (**figura 35**). Esta característica, no excepcional y ya descrita en otras bahías, está asociada al predominio de las zonas intermareales respecto a las permanentemente inundadas.

Estos cambios sustanciales en las corrientes, tanto en la redistribución de las máximas velocidades como en la inversión del régimen de corrientes máximas, se muestran especialmente relevantes ya que conllevan, de manera inherente, una nueva situación dinámica sedimentaria, generando una nueva propuesta de equilibrio morfodinámico.

Esta nueva redistribución sedimentaria sugiere un nuevo proceso de erosión de algunas zonas tendentes a la colmatación en la situación actual, como la región del cauce próxima a la presa de la Cortá inundada en la actualidad, en donde

las corrientes, como ha sido visto anteriormente, disminuyen sustancialmente por la presencia de la presa pero alcanzan valores muy elevados sin su presencia. Al mismo tiempo, la inversión comentada de las corrientes máximas se esboza también como un indicador, más sutil que el anterior pero igualmente importante, de una nueva redistribución de sedimento y, por ende, de un nuevo equilibrio morfodinámico.

Análisis de sensibilidad: Influencia de un potencial dragado en la dinámica de marea

El proceso de interpretación final requiere un análisis de sensibilidad preceptivo para representar la potencial variación de las características de la onda frente a pequeñas variaciones de las características topográficas. Para efectuar esta labor, se ha simulado el proceso hidrodinámico bajo un dragado de 30 cm en toda la zona intermareal actualmente desecada. Los resultados muestran (**figura 36**) sólo una pequeña variación en la superficie total inundada. Esto lleva consigo cambios cualitativamente no significativos en las características de la marea respecto al mismo caso sin considerar el dragado.



Figura 25. Escenario representativo de la fracción de talud (en rojo) eliminada para facilitar el tránsito de agua a través de la presa. (Imagen más detallada de la figura 5)



Figura 26. Representación de la zona intermareal anegada en condiciones de marea viva equinoccial al eliminar la presa. (Imagen más detallada de la figura 5)

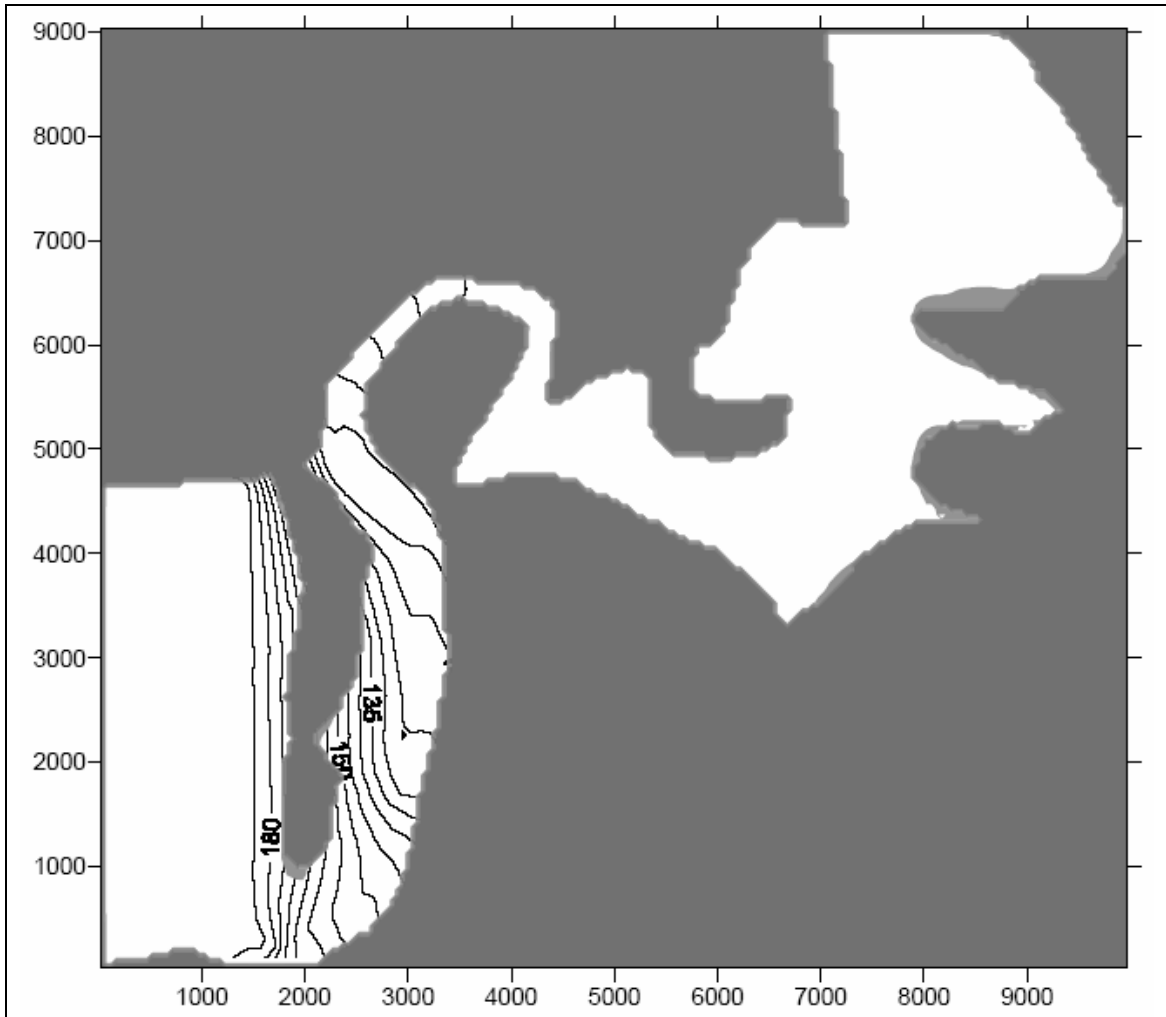
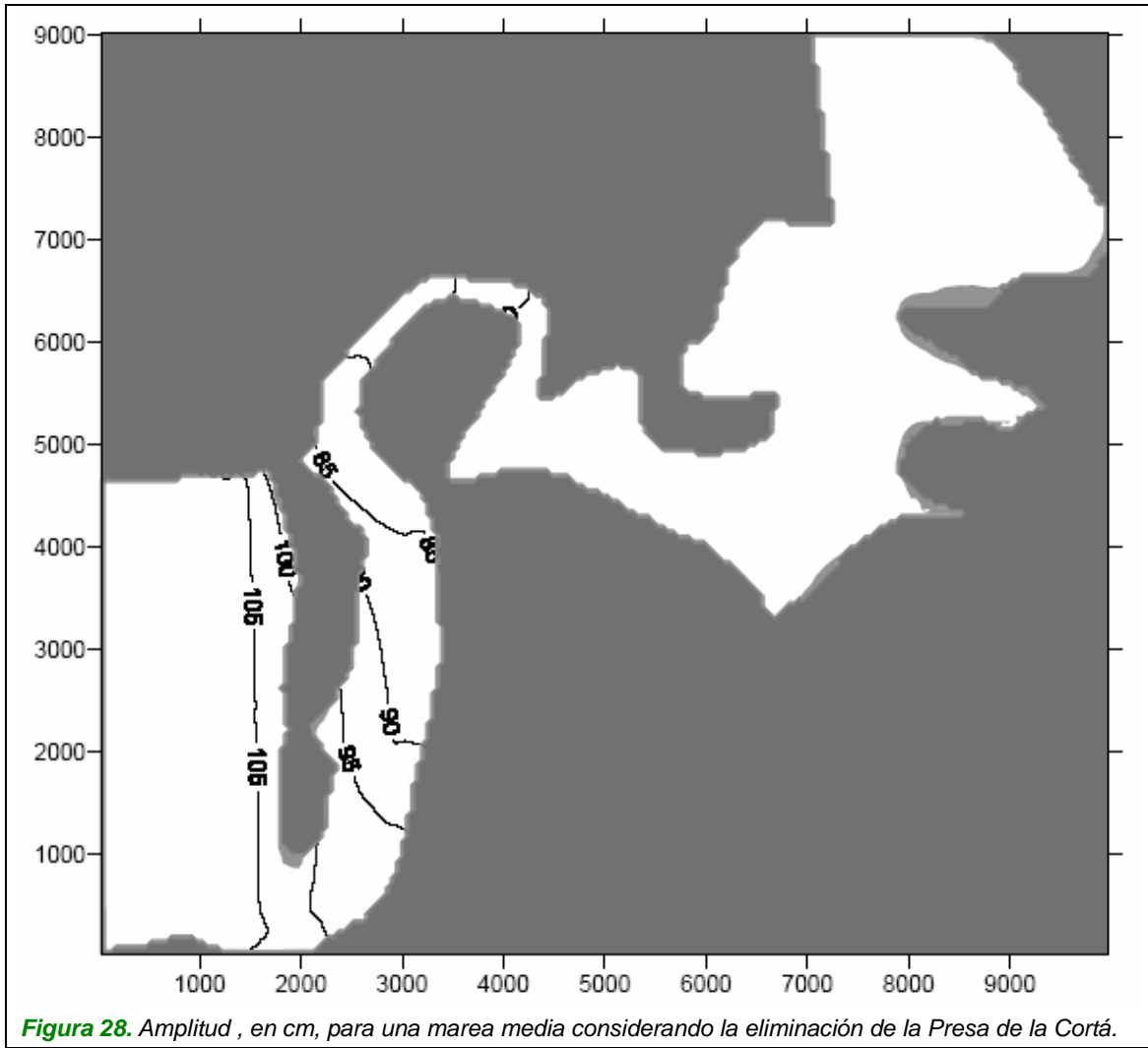


Figura 27. Amplitud, en cm, para una marea máxima viva equinoccial considerando la eliminación de la Presa de la Cortá.



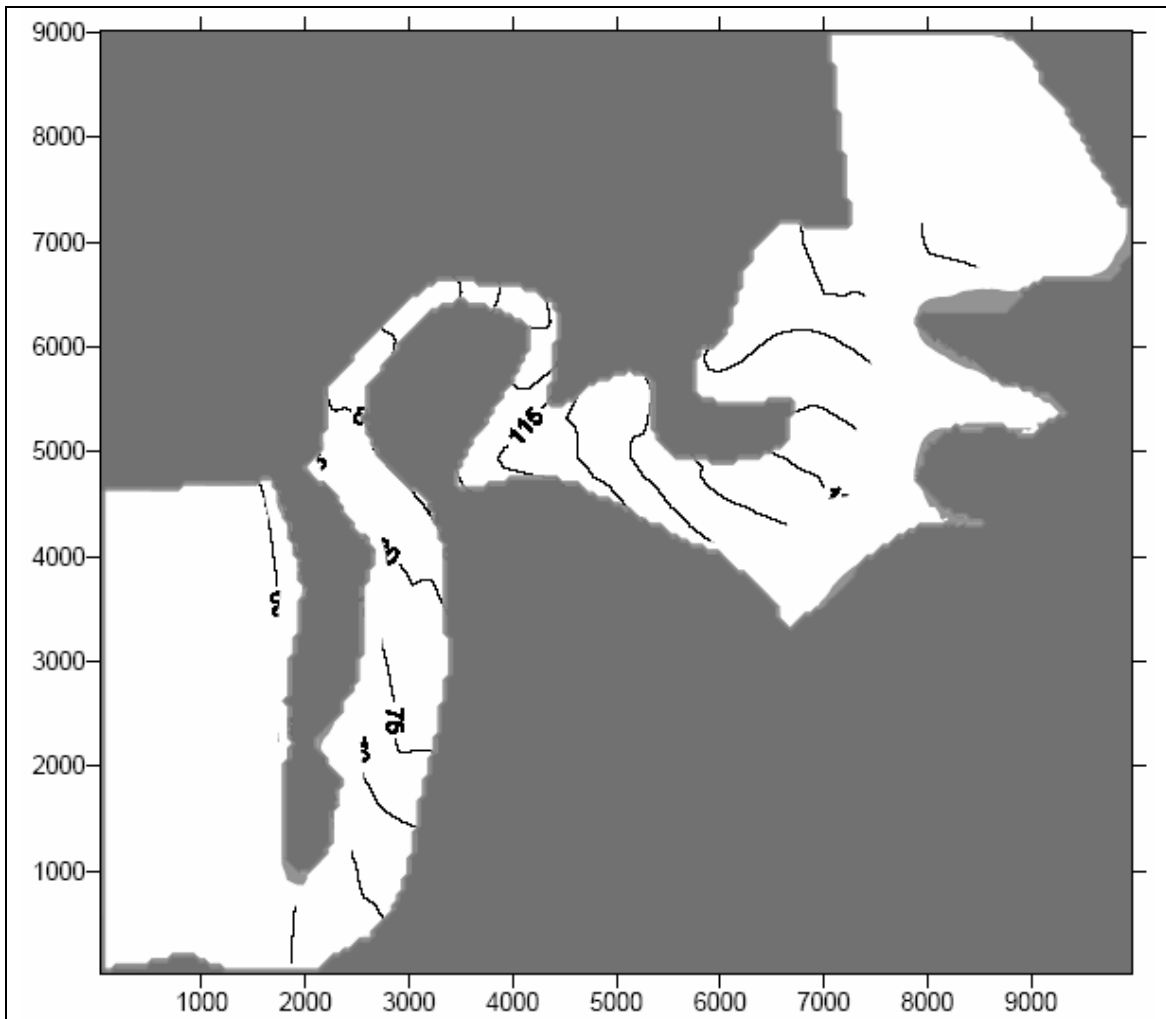


Figura 29. *Isolíneas de fase, expresadas en grados Greenwich, asociada a la elevación para una marea máxima viva equinoccial considerando la Presa de la Cortá eliminada. Una diferencia de un grado corresponde, aproximadamente, a un retardo de 2 minutos para una onda semidiurna.*

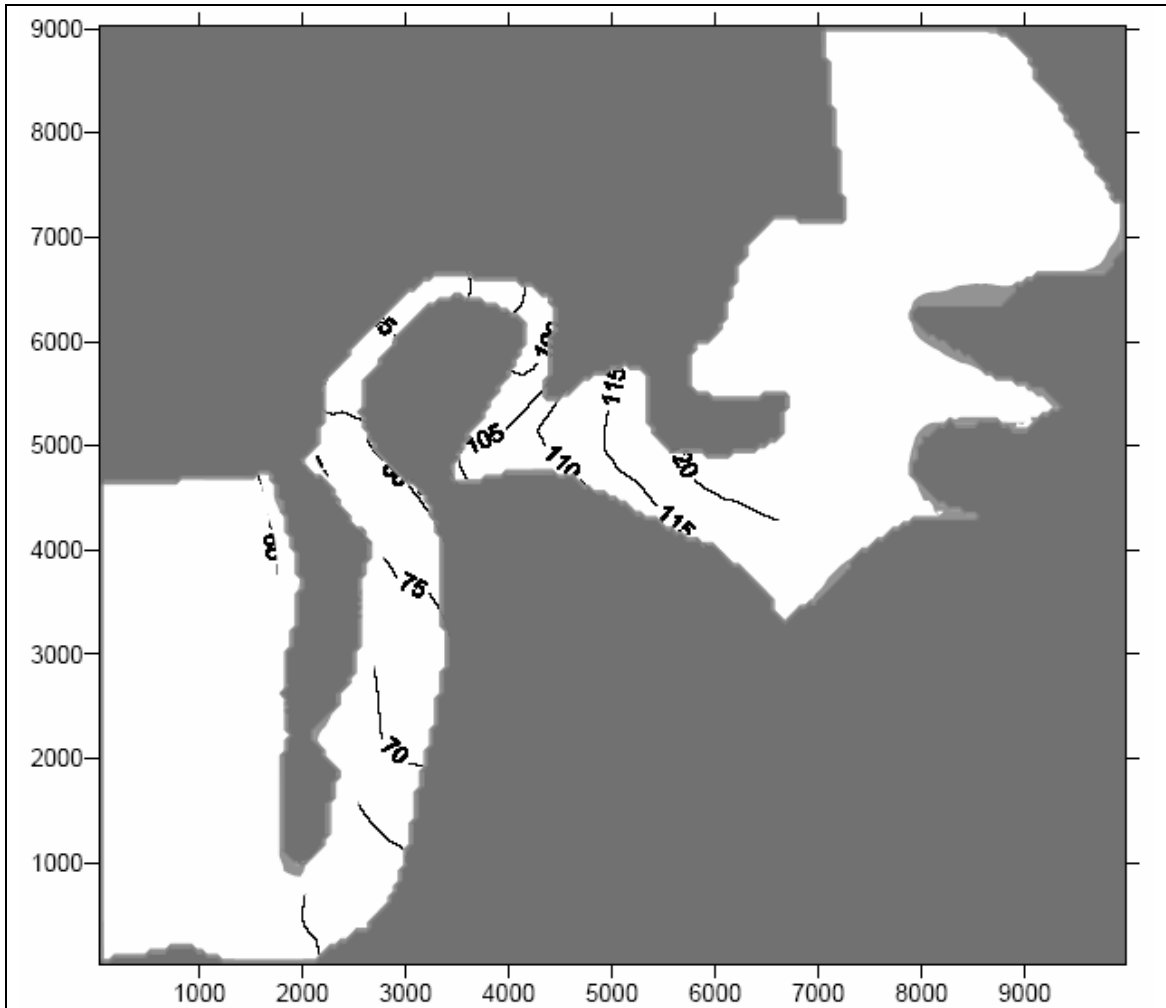
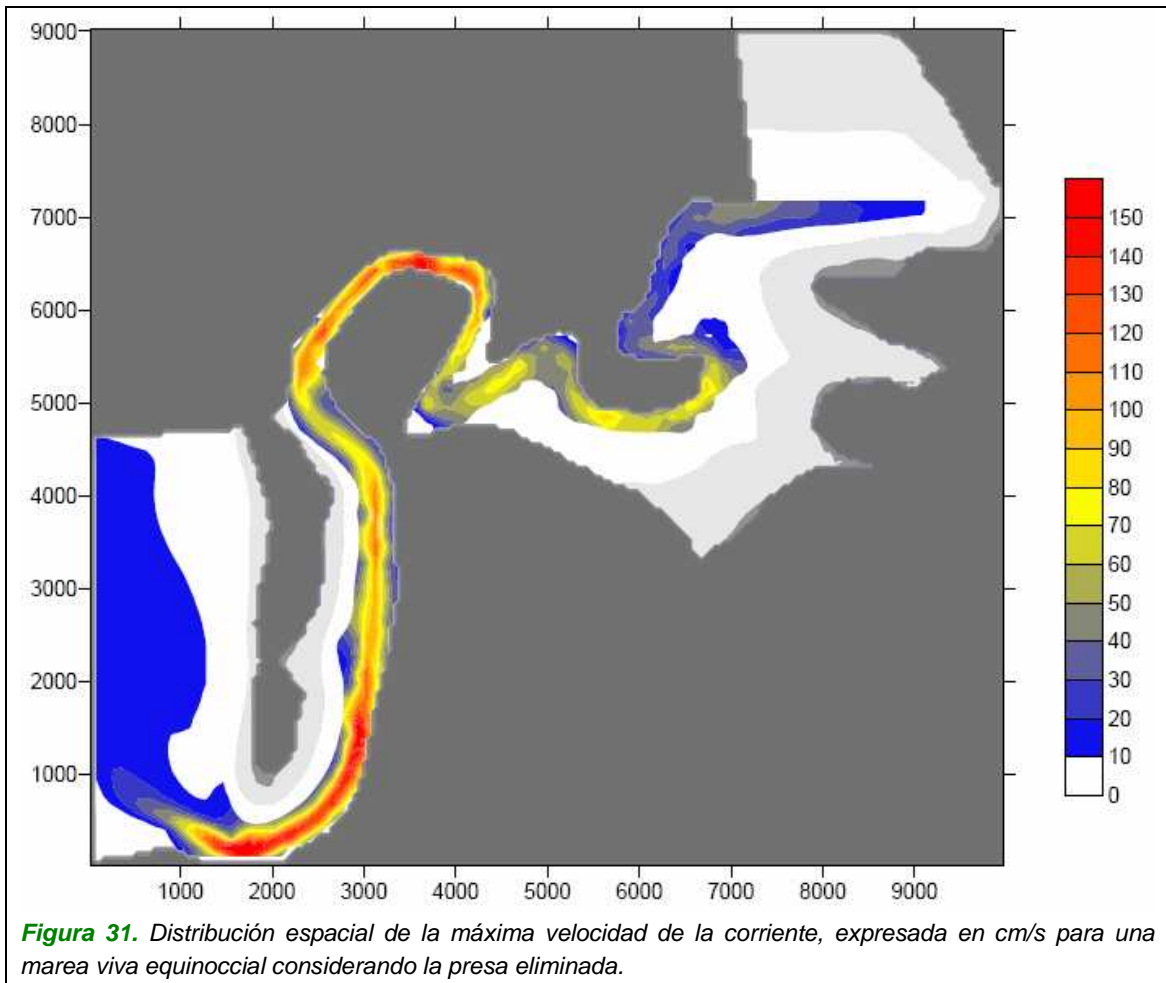


Figura 30. *Isolíneas de fase, expresadas en grados Greenwich, asociada a la elevación para una marea media considerando la Presa de la Cortá eliminada. Una diferencia de un grado corresponde, aproximadamente, a un retardo de 2 minutos para una onda semidiurna.*



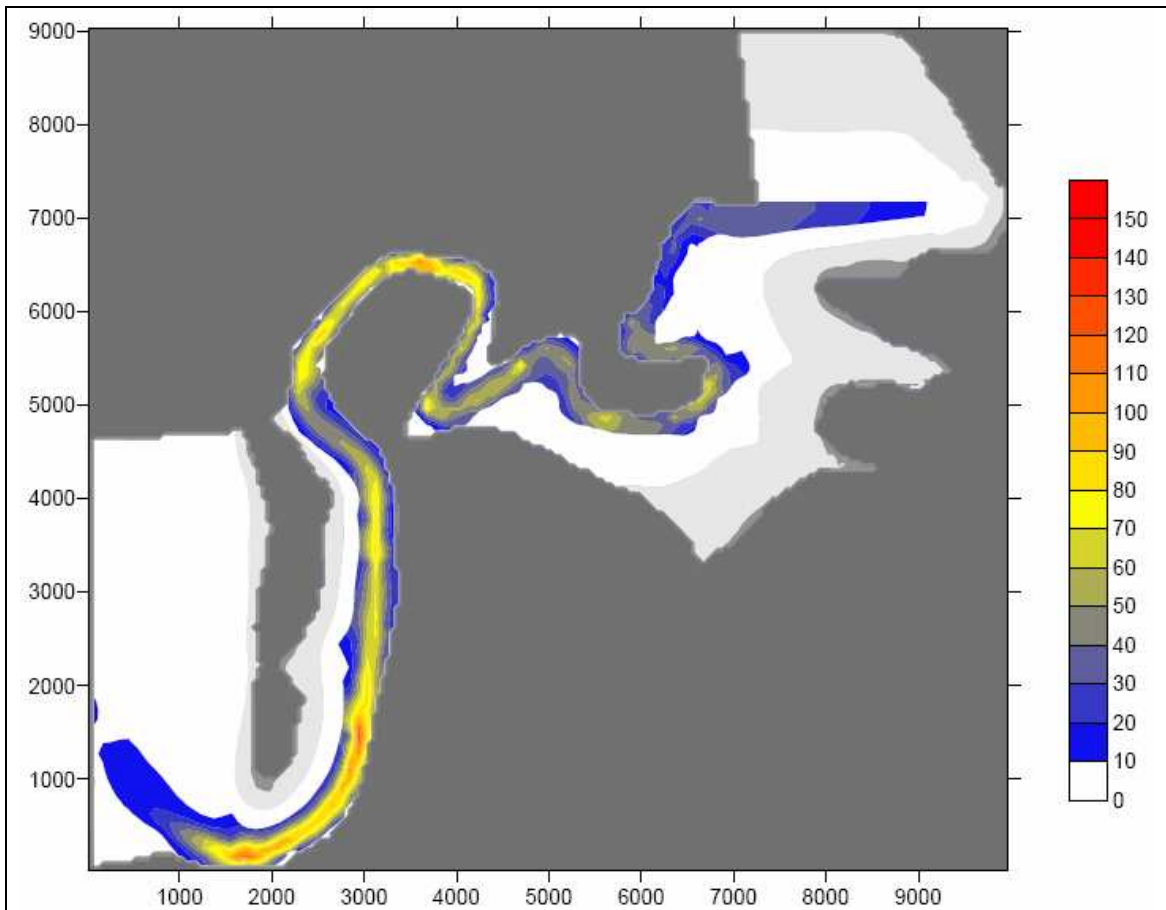


Figura 32. Distribución espacial de la máxima velocidad de la corriente, expresada en cm/s para una marea media considerando la presa eliminada.

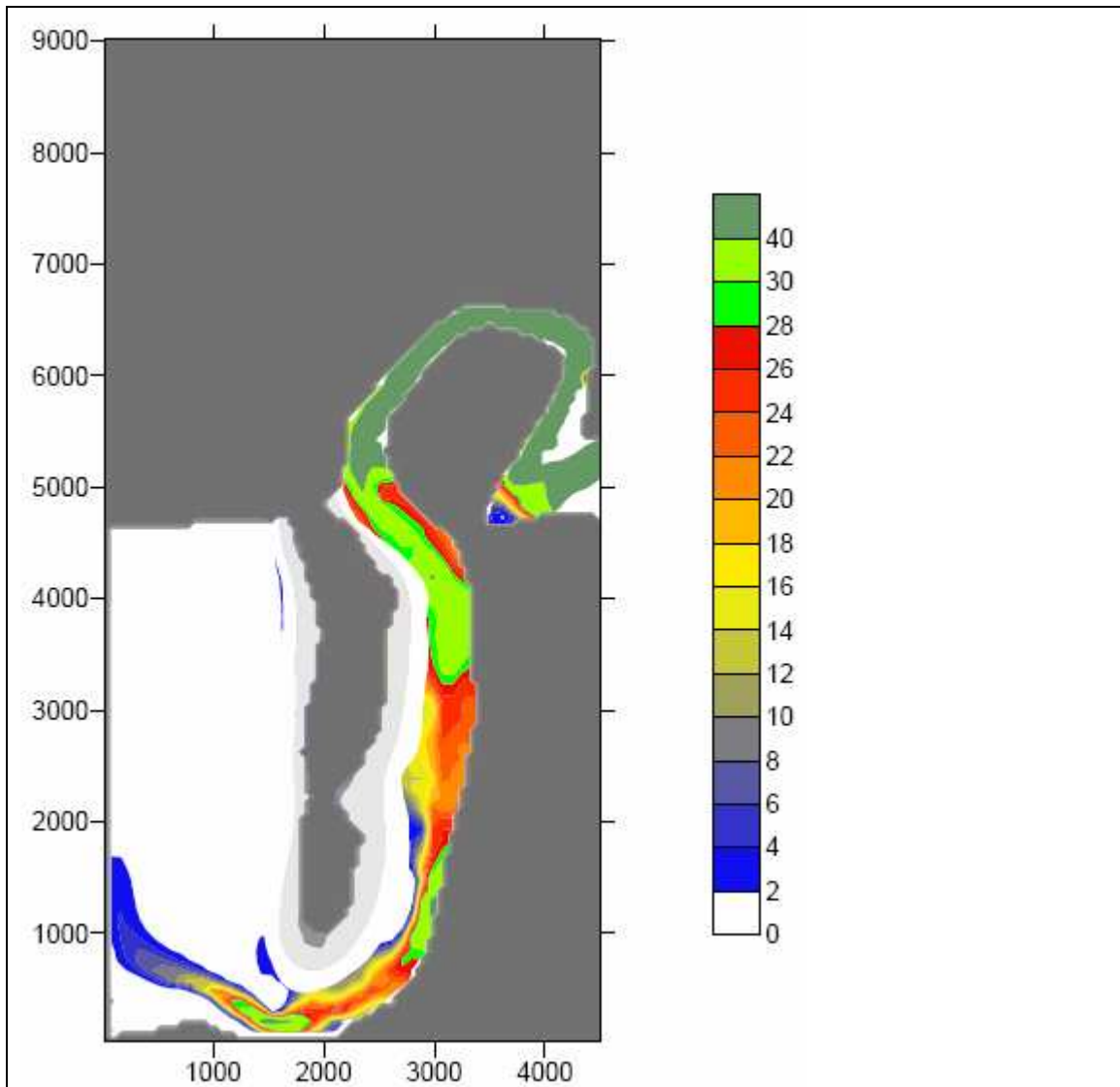


Figura 33. Diferencia de velocidad máxima (en cm/s), para la PMVE, considerando la presa de la Cortá eliminada respecto a la situación actual sin eliminar la presa. **(Imagen más detallada de la figura 8)**

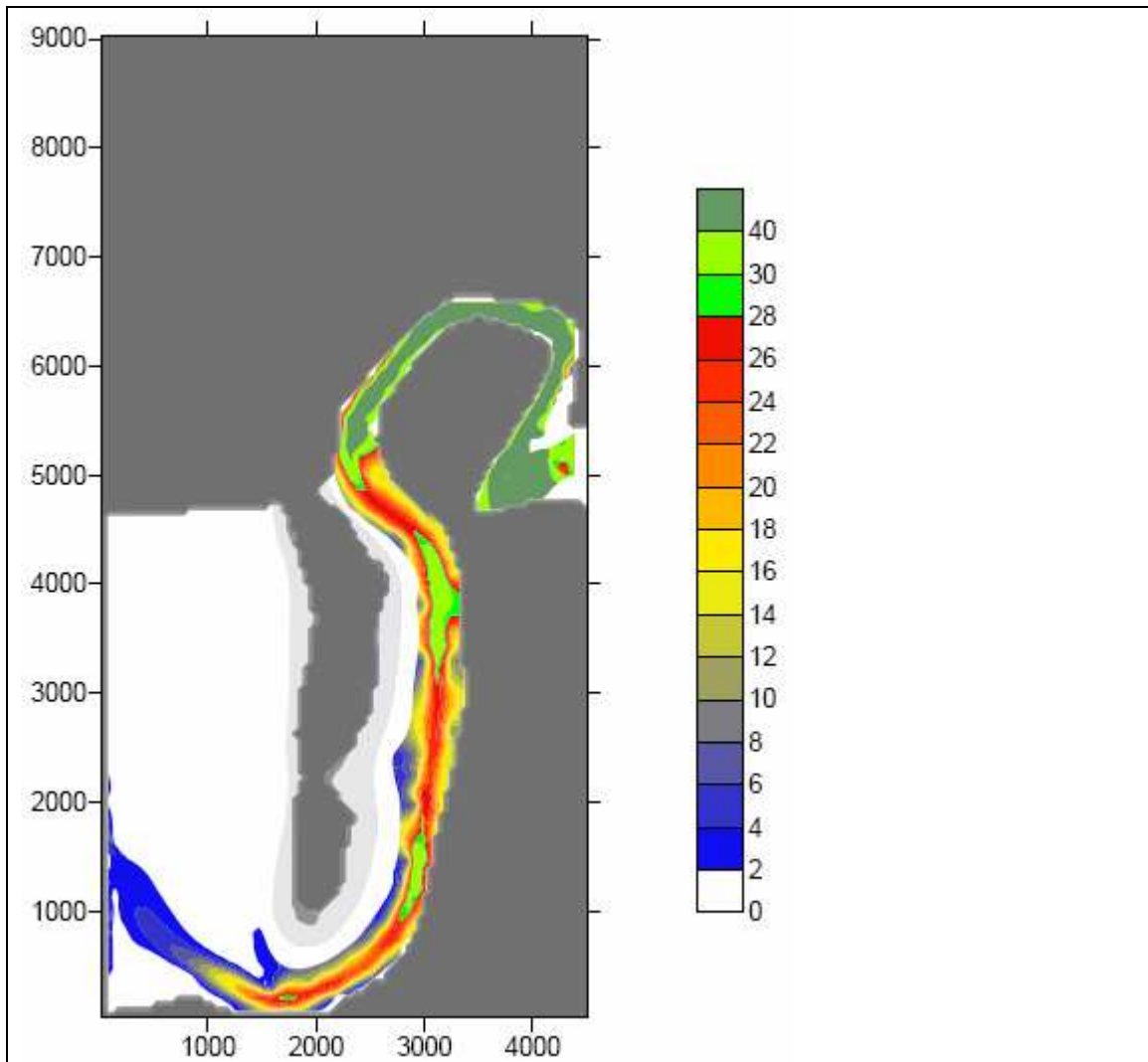
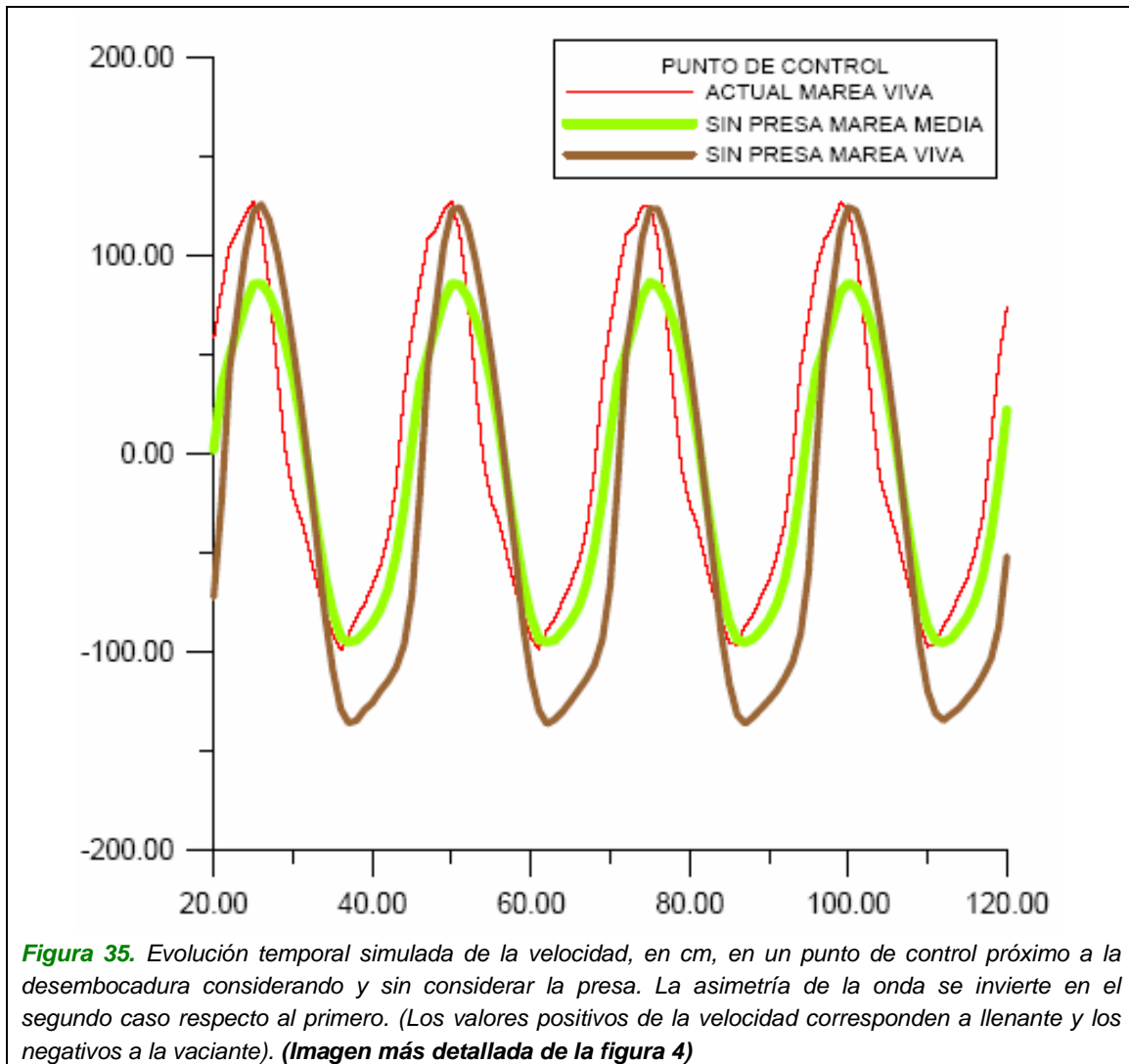


Figura 34. Diferencia de velocidad máxima (en cm/s), para un ciclo de mareas medias, considerando la presa de la Cortá eliminada respecto a la situación actual sin eliminar la presa. (Imagen más detallada de la figura 8)



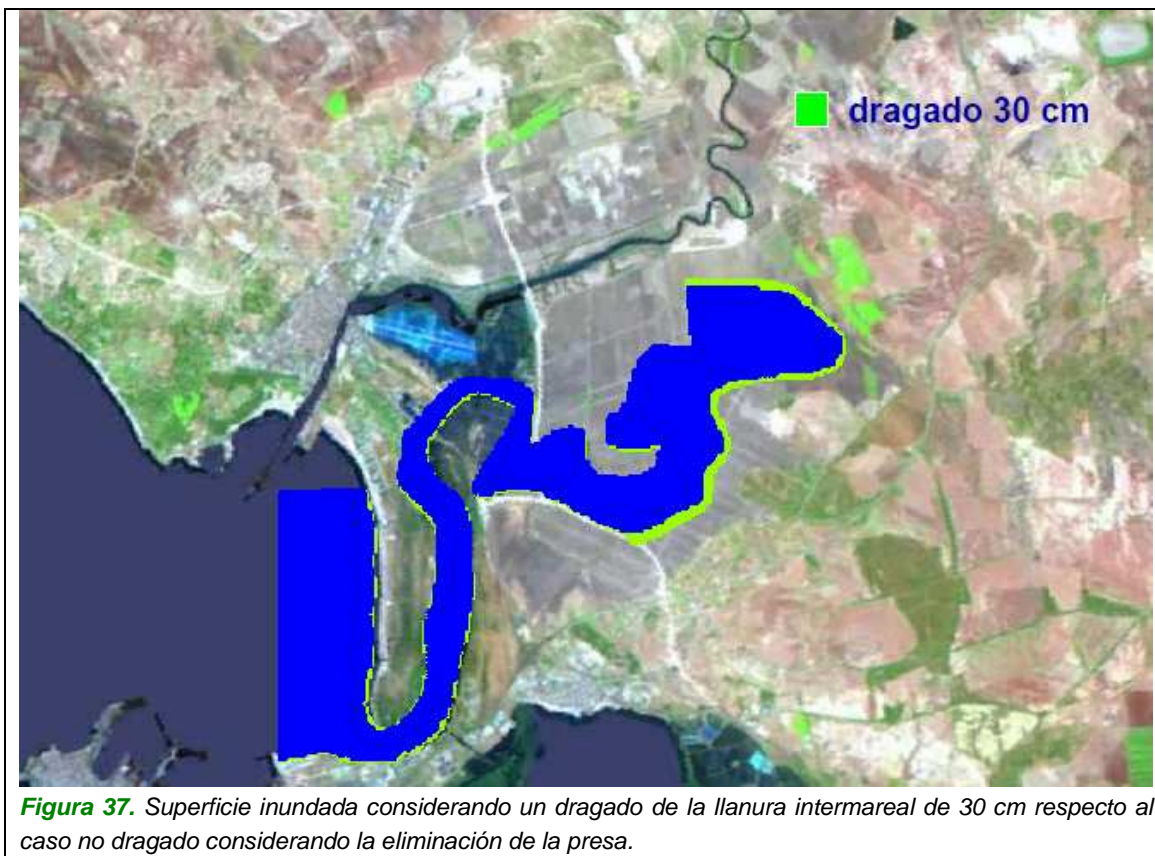


Figura 37. Superficie inundada considerando un dragado de la llanura intermareal de 30 cm respecto al caso no dragado considerando la eliminación de la presa.

5.6 Datos topográficos

Una vez obtenidas las cotas ortométricas referidas a la Red Geodésica, se ha observado mediante técnicas GPS el vértice 305 situado en la zona de la Cabezuela de Puerto Real con sistema de referencia Europeo y datum altimétrico el Cero hº de Cadiz. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla, expresada en metros (fuente: Departamento Física Aplicada. Universidad de Cádiz).

Altitud calculada referida a la Red Geodésica	4.284
Altitud respecto al datum altimétrico: Cero Hº de Cadiz	5.880
Diferencia	-1.596
PMVE en el punto respecto al nivel medio local	1.80
Diferencia Nivel Medio local- Nivel Medio del Mar en Alicante	0.20

Fuente: Departamento de Física Aplicada. Universidad de Cádiz.

5.7 Campañas y datos experimentales

Introducción

Para la descripción hidrodinámica del río San Pedro se han realizado dos campañas en las que se han instalado correntímetros de rotor (marca Aanderaa modelo RCM-7) y mareógrafos de presión de fondo (marca Aanderaa. modelo WRL-7). El análisis y estudio de estas series temporales permitirán deducir las principales características de la dinámica del río.

Durante la primera campaña se instalaron dos correntímetros de rotor y un mareógrafo de presión de fondo de forma simultánea durante el periodo comprendido del 7 al 12 de enero de 2004. La localización de los puntos donde se fondearon los instrumentos queda reflejada en la figura 1. En la zona próxima al puente de la carretera nacional se instalaron dos correntímetros, uno a cada lado del mismo (denotados como correntímetro desembocadura y correntímetro aguas arriba). Para evaluar el comportamiento de la onda de marea aguas arriba del río se instaló un mareógrafo junto a la presa en su vertiente parcialmente desacada (mareógrafo presa).

Respecto a la segunda campaña, el día 28 de junio de 2004 se procedió a la instalación del mareógrafo en la desembocadura del Río San Pedro, (mareógrafo II), y un correntímetro que se fondeó en junto al puente de la carretera nacional (siendo este emplazamiento el mismo donde se fondeó este mismo instrumento en la campaña anterior). La recogida de ambos instrumentos se realizó el día 2 de julio.

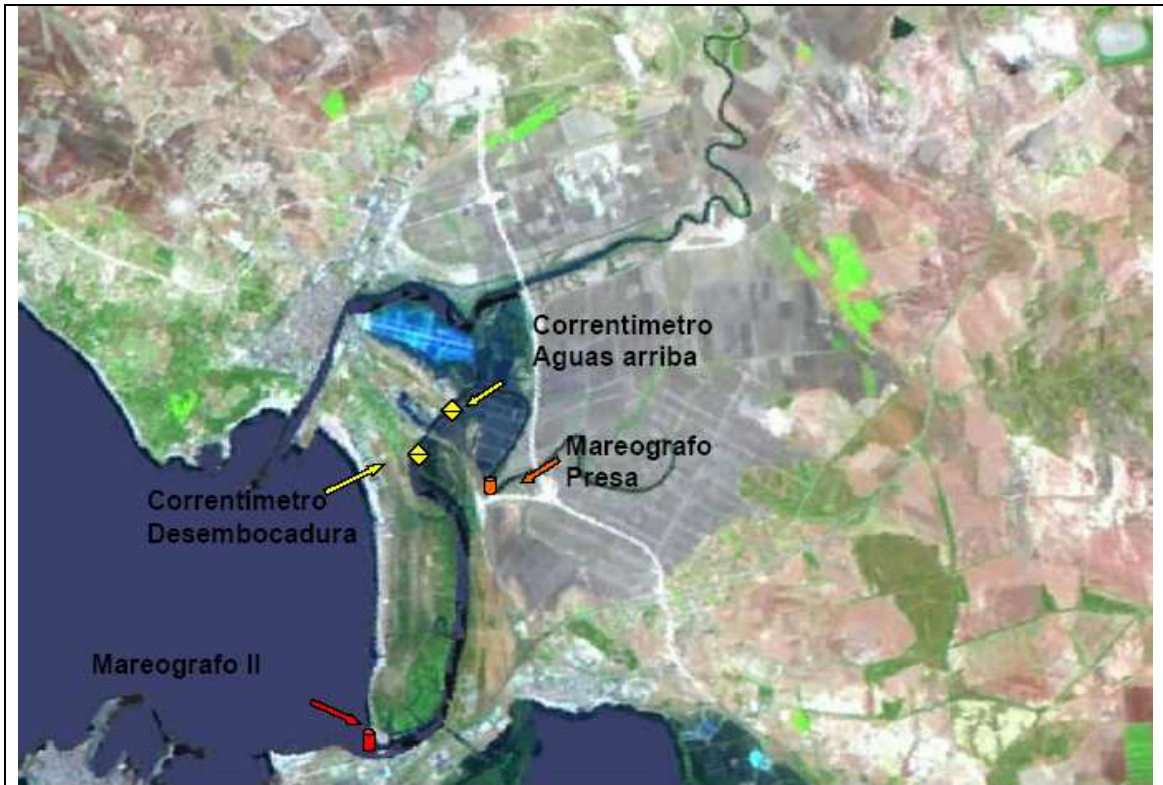


Figura 38. Localización de los instrumentos fondeados en las campañas I y II

6. CONCLUSIONES

ENCUADRE FÍSICO

El ámbito de estudio está formado por la cuenca del río San Pedro, ubicada en la margen izquierda del río Guadalete en su desembocadura. En la parte sur de la cuenca se localiza el suelo destinado al polígono de Las Aletas, ocupando una amplia zona de marisma desecada y limitada por grandes infraestructuras de comunicación de ámbito nacional y metropolitano: al Oeste por el ferrocarril Cádiz –Sevilla-Córdoba-Madrid y por la CA-32, la Antigua Nacional IV en una segunda línea, al Norte y al Este por la A4, antigua Variante de la Nacional IV y al Sur por la autopista AP4 Sevilla-Cádiz.

El balance hídrico de la zona alcanza sus mínimos en verano, con temperaturas muy elevadas y precipitaciones nulas o casi nulas, alcanza en otoño valores máximos y vuelve a disminuir a partir de diciembre retomando una tendencia ascendente en primavera.

Los materiales predominantes, básicamente finos (en general menores a 0,02 mm) pertenecientes al Cuaternario, son los limos arenosos y las arenas y arcillas. La geomorfología se caracteriza por procesos propios de los dominios marítimo terrestre y continental. El primero ésta representado por el sistema estuario, con mareas de amplitud comprendida entre los 2 y 4 metros, aproximadamente, en el que la acción conjunta de las mareas y la dinámica fluvial originan una morfología de marisma. El dominio continental aparece en un pequeño sector situado al Sur del ámbito representado por Terrazas Fluviales y Glacis.

Desde el punto de vista edafológico los suelos en su integridad son de Marismas; Solonchaks takiricos y gleicos formando extensas llanuras de drenaje muy deficiente.

Hidrológicamente, además de las obras hidráulicas para poder poner la marisma en cultivo, la progresiva humanización del espacio y la construcción de una densa red de vías de comunicación han creado la subcuenca artificial del río San Pedro. La red de drenaje ha quedado configurada por un sistema de canales artificiales que evitan el encharcamiento temporal, además de caños mareales como el de La Marina y pequeños arroyos como el de San Pedro.

La impermeabilidad de la zona y su morfología plana y baja altitud sobre el nivel del mar provocan condiciones desfavorables de drenaje, apareciendo encharcamientos temporales en depresiones muy someros. El acuífero miopliocuaternalio Puerto Real-Conil está presente sólo en el sector Sur del ámbito, donde los materiales pasan de ser impermeables a detríticos.

Por su parte el funcionamiento hidráulico el caño del río San Pedro está determinado principalmente por la acción de las mareas, siendo escasos los aportes pluviales. Su desembocadura se encuentra protegida del oleaje por lo que el único movimiento en el interior es el flujo y reflujo de la marea.

La marisma de las Aletas supone a su vez una subcuenca independiente de la Cuenca del río San Pedro, originada por las infraestructuras de comunicación que constituyen importantes barreras físicas para la conexión de la red de caños mareales de las Aletas con los del río San Pedro. El flujo superficial de agua, tanto el proveniente de las mareas como de los aportes pluviales, está muy determinado por la extensa red de canales de drenaje, muros y caminos rurales.

Está atravesada transversalmente por el caño de la Marina, un brazo del río San Pedro con el que está conectado mediante tres tubos de 1,75 m de diámetro bajo la A4. Este caño recibe la mayor parte de las aguas evacuadas por los distintos canales de drenaje, adquiriendo mayor importancia en el tramo final, en donde la estructura rectilínea del canal se abre a un cauce con claras influencias mareales.

La vegetación característica viene determinada, fundamentalmente, por la desnaturalización sufrida tras la desecación para su puesta en cultivo y por el clima de la zona. Los márgenes de los canales de drenaje se encuentran abrigados por juncos, tarajes, salados y retama. En las zonas más antropizadas el suelo se encuentra colonizado por un estrato herbáceo de plantas ruderales. Los antiguos cultivos abandonados y sobre todo aquellos que fueron sometidos a una menor intensidad productiva han experimentado una recolonización por las especies halófilas características de los ecosistemas de marismas, como salados, sosas, *Arthrocnemum*, *Suaeda* y sarcocornias en las áreas más encharcadas.

Los usos del suelo están asociados fundamentalmente a la agricultura, las explotaciones salineras y las marismas desecadas abandonadas.

ESTUDIO HIDRÁULICO

Desde el punto de vista hidráulico, Las Aletas, como se ha dicho, constituye en sí misma una cuenca hidrográfica independiente de aproximadamente 5.272.844 m² de extensión, ocasionada por la sobreelevación de las infraestructuras viarias que la rodean.

La Intensidad de Precipitación máxima diaria resultante para el periodos de retorno de 50 años es de 22,39 mm/h, 24,87 mm/h para el de 100 y 30,58 mm/h para el de 500 años. El Coeficiente de Escorrentía del ámbito alcanza valores de 0,910868331 para el periodo de retorno de 50 años, 0,92361309 para el de 100 años y 0,944343471 para el de 500. Los Caudales de Crecida Extraordinaria se sitúan en 42,42 m³/s para el periodo de retorno de 50 años, 47,76 m³/s para el de 100 años y 60,05 m³/s para el de 500. La situación varía mínimamente al considerar el cálculo de estos caudales tras la ejecución del Plan Especial, pasando a ser de 45,63 m³/s, 50,84 m³/s y 62,85 m³/s en los respectivos periodos de retorno de 50, 100 y 500 años. El volumen a desaguar por precipitaciones y caudales máximos, para un periodo de retorno de 500 años y tiempo de concentración de la cuenca de 2,497 horas, se estima en, aproximadamente, 565.015 m³

La desecación de la marisma de las Aletas se ha hecho a partir de una serie de canales de drenaje que organizan la circulación del flujo de agua hacia un canal principal, denominado de la Marina, que divide el ámbito en dos partes. Dichos canales derivan el agua recogida en una serie de grandes parcelas o sectores individualizadas por muros cuyas alturas oscilan entre los 1,5 y los 2 m en una red perpendicular al caño del Marina, que actúa como aliviadero principal del ámbito. El caño de la Marina está compuesto a su vez por dos canales paralelos. El izquierdo recoge las aguas de la red de canales que drenan la margen izquierda de la marisma, mientras que el derecho actúa como canal principal y recoge parcialmente las aguas del otro sector de la marisma. Ambos canales se unen a la altura del molino de mareas abriéndose en un amplio cauce con clara influencia mareal.

La conexión del caño de la marina con el río San Pedro se hace por tres tubos de 1,75 m de diámetro bajo la Variante entre El Puerto de Santa María y Puerto Real (A4). Dichos tubos funcionan, por un lado, como aliviadero de las aguas pluviales recogidas en Las Aletas y, por otro, de elemento canalizador de flujo de las mareas proveniente del Caño del Río San Pedro. Además de este punto de conexión de la red con el caño de San Pedro, existe en el Norte del ámbito de Las Aletas un canal paralelo al de la Marina que desagua, mediante un tubo de 1 m de diámetro, un amplio sector de la marisma.

Dentro del área de Las Aletas existen, por tanto, dos subámbitos, diferenciados por una serie de muros y caminos, que drenan las aguas recogidas en todo este espacio por dos puntos diferentes.

En cuanto a la capacidad hidráulica, el principal canal analizado, el de la Marina, es el que posee mayor capacidad de evacuación de caudales y al tiempo el que limita la evacuación principal de la zona, aunque registra importantes variaciones en función de la anchura y la profundidad del mismo. Las mayores secciones se encuentran aguas abajo, una vez pasado el molino de mareas, y próximas al punto de desagüe bajo la A4. Por el contrario las secciones con menor capacidad se localizan en los tramos más altos de la cuenca, en donde el canal tiene menor cota y profundidad, y el cauce es más tendido.

Analizando la capacidad hidráulica en función de los caudales calculados para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, a grandes rasgos, la red presenta un comportamiento dispar. El tramo alto presenta una eficiencia hidráulica menor o baja, y no es capaz de albergar los caudales para los periodos de retorno de 500 años, sin embargo, el tramo medio y final presentan buena capacidad para evacuar los caudales recogidos, especialmente en la zona en donde se abre y forma un amplio cauce.

La capacidad hidráulica referida tiene en cuenta exclusivamente el canal derecho de la Marina, separada por un muro de 1,5-2 m, del canal paralelo. Si se consideran ambos canales como unitarios la capacidad hidráulica del conjunto es suficiente para albergar los caudales extraordinarios para cada uno de los periodos considerados. Debe tenerse presente la existencia de un muro de 2 m a lo largo de todo el flanco izquierdo del caño, muro que protege de la inundación por desbordamiento de la porción Oeste del ámbito, forzando la laminación en la porción Este.

En cuanto a la salida del cauce de la Marina hacia el río San Pedro, esta presenta un comportamiento hidráulico relativamente medio, ya que los tres tubos (de 1,75 m de diámetro cada uno) son insuficientes para evacuar los caudales punta para el periodos de recurrencia considerado de 500 años. Así, la sección y caudal a desaguar por dichos tubos, de 7,21 m² y 58,35 m³/s (según la Instrucción de carreteras) en total, no puede hacer frente al caudal de 60,05 m³/s (62,85 m³/s para la situación con el Plan Especial ejecutado) para el periodo de retorno de 500 años de retorno, por lo que son previsibles avenidas o encharcamientos laterales que requerirán corrección. De la misma manera funciona el caño que drena el sector derecho de la marisma, que aunque

presenta un comportamiento hidráulico eficiente, se encuentra con un punto de evacuación claramente insuficiente (tubo de 1 m de diámetro).

En conclusión, el comportamiento hidráulico de la red de drenaje es aceptable pero los principales problemas se localizan en los tramos de conexión de los principales cauces de las Aletas con la cuenca del río San Pedro, derivados de la baja capacidad de evacuación de las conducciones existentes. En tal situación es probable que la incapacidad de evacuación se traduzca en avenidas laterales que ocupan la zona más deprimida del ámbito, que normalmente se encuentra semiencharcada por la influencia de las mareas que entran por el río San Pedro.

ESTUDIO DE INUNDABILIDAD COSTERA

La Cota de Inundación en la flecha de Valdelagrana o playa de Levante, frente costero más próximo al ámbito del Plan Especial, situado a 2.326 m de la línea costera, incluso para un periodo de retorno de 100 no lo alcanza, quedándose a lo sumo a 616,62 m de dicha línea.

Respecto a la Influencia por Mareas (datum y rango de mareas) los niveles máximos (cotas sobre el nivel del mar en Alicante, NMEA), en base a los datos aportados por el mareógrafo más cercano al ámbito (Puerto de Bonanza, Jul. 1992 - Dic. 2005) resultan ser los siguientes:

Pleamar Máxima Viva Equinoccial.-

(Valor extremo de nivel del mar de muy poca probabilidad de ocurrencia) Según los datos de Bonanza, extrapolables a Las Aletas:

PMVE (PR = 20 años) = 358 cm + 85 cm = 443 cm = **4,43 m**

PMVE (PR = 50 años) = 358 cm + 95 cm = 453 cm = **4,53 m**

PMVE (PR = 300 años) = 358 cm + 114 cm = 472 cm = **4,72 m**

Dado que los valores anteriores de Pleamar Máxima Viva Equinoccial son los correspondientes con respecto al Cero Hidrográfico de Bonanza, dichos valores han de corresponderse a su vez con respecto al Nivel Medio Del Mar en Alicante (NMMA) ya que, como se ha comentado en apartados anteriores, a éste se refieren las altitudes geométricas de las señales geodésicas distribuidas por la geografía peninsular española, constituyendo la referencia nacional terrestre.

Así, en el apartado “Referencias. Puerto de Bonanza” se determinaba que el Cero Hidrográfico en Bonanza se encuentra situado 1,419 m por debajo del NMMA.

Referencia	Nivel medio del mar al NMMA (m)
NGU-76	1,419
NGP-795	1,419

Luego, se predicen los siguientes valores de PMVE en Bonanza (extrapolables a Las Aletas), respecto al NMMA:

PMVE (PR = 20 años) = 4,43 m – 1,419 m = 3,011 m

PMVE (PR = 50 años) = 4,53 m – 1,419 m = 3,111 m

PMVE (PR = 300 años) = 4,72 m – 1,419 m = 3,301

Características hidrodinámicas del caño mareal de río San Pedro

Respecto a la inundabilidad costera en el Río San Pedro, en base al MODELO 2D de la UCA, éste representa un caño sometido al régimen de mareas de la Bahía, con características de flujo y refluo mareal propias de un comportamiento típicamente estacionario. En la actualidad su cauce está configurado por un canal principal de 4 m de profundidad media, y una amplia zona intermareal en ambas orillas que sigue el curso ascendente 6 Km aguas arriba hasta la Presa de la Cortá atravesando el Parque Natural de la Bahía de Cádiz. La Presa, de origen antrópico, permite en la actualidad, a pesar de la apertura parcial de la misma, un mínimo intercambio de agua entre esta zona y la amplia región intermareal actualmente desecada potencialmente anegadiza, cuya extensión estimada es de 4 Km². Debido a la presencia de la presa la marea, por encima de este punto, no supera la cota de 40 cm por encima del nivel medio local, por lo que la planicie, exceptuando el cauce principal del río, no se inunda en la actualidad.

Los valores de estas elevaciones en pleamares máximas vivas equinocciales muestran, sin embargo, una variabilidad superior, disminuyendo su amplitud desde 1,85 m en la región fronteriza con la Bahía Exterior hasta 1,78 m en la presa de la Cortá. Aguas arriba de la presa de la Cortá, las corrientes de flujo y refluo disminuyen sustancialmente por el impedimento que supone ésta, y por tanto las elevaciones, que no superan, como se ha dicho, en la actualidad 40 cm (60 cm sobre el NMMA)

La eliminación prevista de la presa de la Cortá supone la inundación de buena parte del área actualmente desecada, con un área estimada de 4 Km² y profundidad media de 0,75 m, regresando ésta a su condición natural de

planicie intermareal previa a la construcción de la presa. La ausencia de la Cortá lleva asociado, naturalmente, un cambio apreciable en las características de marea en la zona a lo largo de toda su extensión, que requiere algunos comentarios.

Respecto a la elevación, la ausencia de la presa y el importante cambio las características geométricas del área potencialmente anegadiza, provoca una paulatina disminución de la amplitud de marea desde la desembocadura aguas arriba. En mareas vivas equinocciales, este descenso de amplitud varía desde 185 cm en la desembocadura hasta 135 cm en el área intermareal por encima de la presa eliminada. Esta amplitud supone, pues, que la cota 1.35 m por debajo del nivel medio queda anegada en periodos de plemares vivas equinocciales.

Sin embargo, la cota 1.35 m (1,55 m sobre el NMMA) podría ser superada eventualmente por el efecto conjunto sobre el nivel de la marea astronómica viva equinoccial junto a los efectos meteorológicos asociados a la presión y al viento asociados a borrascas.

En síntesis, en la aplicación del MODELO 2D de la UCA puede observarse un retardo de la onda de marea a su paso por el caño mareal, produciéndose la inundación costera, en primer lugar, en la playa de Levante y a la entrada del caño, hasta propagarse, en último lugar, en las cercanías de las marismas del Guadalete. Al tiempo el modelo deja clara la no inundación del ámbito del Plan Especial al actuar la Variante de la N-IV (A4) como muro infranqueable incluso en las circunstancias proyectadas de eliminación de la presa de la Cortá. Cabe apuntar que el modelo no tiene en cuenta la inundación de las amplias zonas de salinas existentes a ambos márgenes del caño, considerando sus muros exteriores, del mismo modo que la Variante, como límites de la inundación, si bien es sabido que las mayores mareas son aprovechadas para inundar la salina mediante el sistema de compuertas, por lo que cabe deducir una reducción notable de la superficie inundable si se tienen en cuenta estas superficies salineras.

7. PROPUESTA DE MEDIDAS CORRECTORAS

1.- EVITACIÓN DEL RIESGO SOBRE EL VIARIO ESTRUCTURANTE.

Como se ha visto en este estudio las alturas máximas sobre el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA) de Pleamar Máxima Viva Equinoccial (PMVE) para la zona, según datos del mareógrafo representativo más próximo son, en función de los periodos de retorno considerados, los siguientes:

PMVE (PR = 20 años) = 3,011 m

PMVE (PR = 50 años) = 3,111 m

PMVE (PR = 300 años) = 3,301 m

Estos datos, junto a las preexistencias en cuanto a obras públicas viarias y ferroviarias en el ámbito refirman la posición de llevar el Viario Estructurante, vía fundamental de evacuación de los Parques de Actividad, a la cota de 3,30 m sobre el NMMA, ya que tanto el trazado ferroviario que delimita el ámbito al Oeste como la A4 que lo hace al Norte y al Este se han dispuesto en cotas medias de 3,45 m en el caso de la vía férrea y de 3,30 para la A4. Debe señalarse que el flanco realmente expuesto a las mareas extremas es el flanco Este y que, según el MODELO 2D de la UCA, que ha simulado los efectos de las mareas máximas posibles en el Caño del Río San Pedro, el muro que supone la A4 es suficiente para impedir la entrada de la marea más allá de la que penetra por el Caño de La Marina, que se abre a la porción Este de las marismas de Las Aletas, por lo que se constata que la cota de 3,30 m no es alcanzada por las mareas máximas y por tanto permanecerá fuera del ámbito de la eventual inundación.

2.- EVITACIÓN DEL RIESGO EN LOS PARQUES DE ACTIVIDAD.

Como se ha mencionado anteriormente, las cotas a las que se sitúan tanto el trazado ferroviario como la A4 alcanzan valores medios de 3,45 m y 3,30 m respectivamente sobre el NMMA por lo que estas cotas serán máximas en cuanto a los rellenos a efectuar para evitar la inundabilidad.

Debe puntualizarse que las cotas previstas en el Plan Especial (representadas en el esquema siguiente), al considerar los movimientos de tierras necesarios, situaban los Parques de Actividad a niveles mínimos de 3.00 m, tanto para el Comercial como para el Tecnológico y 3,15 m para el Logístico.



Cotas de los Parques de Actividad previstas en el Plan Especial de ALETAS.

A partir del presente Estudio, se propone establecer la base de los Parques de Actividad de modo que se tienda a alcanzar la cota de los trazados ferroviario y viario de la A4 y se vaya descendiendo paulatinamente hacia el interior buscando la cota de los canales principales y del Caño de La Marina originando así plataformas de pendientes muy suaves hacia el sistema de drenaje principal (Ver Anexo de Perfiles de Elevaciones). Debe recordarse que el nivel medio de la cota del suelo respecto al NMMA es ya de 1,5 m por lo que los rellenos necesarios irían, en valores medios, desde los 1,95 m en el contacto con la vía férrea hasta el nivel del suelo en las proximidades del Caño de la Marina para el Área Logística AF-1, desde 1,80 hasta el nivel del suelo en el mismo Caño y su canal principal para el Área Tecnológica AF-3 y desde la actual cota del terreno hasta el nivel del suelo en los canales principales en el Área Comercial y de Servicios AF-2. Estas cotas descienden, como puede apreciarse en el Anexo de Perfiles de Elevaciones, al considerar los Espacios Libres propuestos en el Plan Especial entre las vías de comunicación y los Parques de Actividad, espacios que quedarán al margen de los rellenos.

No obstante, para mayor seguridad, las cotas mínimas deberán elevarse sobre el nivel actual del suelo. Cabe recordar que el mencionado Modelo 2D de

la UCA para el Caño del Río San Pedro establece cotas máximas de mareas extremas de 1,55 m sobre el NMMA por lo que elevando la cota 0,5 m en las zonas más cercanas al Caño de la Marina, tal y como recomendaba la Dirección General de Costas, situando el nivel del suelo en aproximadamente 2 m sobre el NMMA se asegura con holgura la no afección por la marea a los Parques de Actividad así como el drenaje por gravedad de las aguas pluviales hacia los sistemas de evacuación que constituyen los canales principales y el Caño de La Marina.

3.- EVITACIÓN DEL RIESGO FRENTE A LAS CRECIDAS MAREALES.

Dado que la influencia mareal se limita a la entrada de agua de marea por el Caño de La Marina, al actuar la A4 como muro de contención, se considera suficiente reforzar y completar el caballón existente de 2 m de altura media sobre el NMMA en la margen Oeste del Caño de La Marina, elevándolo en 0,5 m a fin de aportar el margen de seguridad apuntado por la Dirección General de Costas, y estabilizándolo con vegetación adecuada, a fin de que actúe, a modo de escollera, como efectiva barrera de protección frente a las crecidas extremas de las mareas y los temporales de modo que desvíe la entrada de agua de marea hacia el Área Funcional Medioambiental AF-4, cuya finalidad es su regeneración como marisma mareal, eliminando los riesgos de influencia mareal en el Área Logística AF-1. Para posibilitar este papel de muros de contención será necesario habilitar compuertas en los puntos de desagüe en el Caño de La Marina de los canales provenientes del Área Logística AF-1.

Del mismo modo y con idéntico fin se deberá disponer de otra mata o barrera de 2,5 m de altura sobre el NMMA en la linde entre el Área Funcional Medioambiental AF-4 y el Área Tecnológica AF-3, barrera ya prevista en los estudios y proyectos de Recuperación Ambiental de la Zona Marismal de los Ríos Guadalete y San Pedro promovidos por la Dirección General de Costas.

De este modo el Área Funcional Medioambiental AF-4 actuará conteniendo en situaciones extremas las crecidas mareales. Su capacidad puede determinarse a partir de la superficie destinada a dicho uso y de la profundidad que alcanzará respecto de los muros de contención perimetrales propuestos, entre los que se incluye el constituido por la A4. Respecto a la superficie ocupada se considera que este Área Funcional se extenderá sobre 120 Has. (1.200.000 m²), al Noroeste del ámbito de Las Aletas. Siendo la altura media de la zona de 1,5 m sobre el NMMA, dada una altura de coronación de las motas o caballones de contención que se proponen de 2,5 m sobre el NMMA se obtiene una profundidad media para este Área Funcional de 1 m, alcanzándose así una

capacidad de laminación de 1.200.000 m³. Se contaría, además, con un margen de seguridad otorgado por los volúmenes de los canales principales y de los espacios libres tras la elevación de los Parques de Actividad anteriormente propuesta. Este volumen se estima en 45.000 m³ para los canales principales (es decir, sin contar los secundarios ni los que constituyen el Caño de La Marina, incluido este en el AF-4), mientras que para los espacios libres, considerando una elevación media de los Parques de Actividad de 0,5 m, se aproxima a los 362.000 m³. Entre ambos se alcanza una capacidad adicional a la proporcionada por la AF-4 de 407.000 m³.

Esta capacidad total de más de 1.600.000 m³ resultaría por si misma suficiente incluso para contener los volúmenes pluviales a desaguar en la cuenca para los periodos de retorno más limitantes en los casos en los que se coincidiera con la pleamar máxima viva equinoccial.

4.- RESPECTO A LA SITUACIÓN MÁS ADVERSA PREVISIBLE.

Las peores circunstancias en cuanto a la inundabilidad del ámbito se producirían en el caso de que coincidieran en el tiempo la mayor marea equinoccial y meteorológica (marea extremal) con las lluvias de periodo de retorno de 500 años. En estas circunstancias la capacidad de desagüe de los tubos ubicados en la salida del Caño de La Marina hacia el Río San Pedro sería, no sólo nula, sino negativa, al permitir la entrada del agua de marea.

Como se ha visto en el estudio hidrológico, el caudal necesario a evacuar en el periodo de retorno de 500 años en la cuenca analizada es de 60,05 m³/s (62,85 m³/s para la situación con el Plan Especial ejecutado), caudal para el que tiene capacidad de desagüe el Caño de La Marina pero no así los tubos de 1,75 m de diámetro existentes bajo la Variante de la N-IV (A4), cuya capacidad máxima de desagüe es de 58,35 m³/s. Por tanto, en las circunstancias más adversas antes apuntadas el ámbito retendría agua. Esta agua, una vez adoptadas las medidas preventivas antes expuestas necesariamente discurrirá hacia el Área Funcional Medioambiental AF-4, al quedar esta, como se ha dicho, deprimida respecto a las cotas del suelo de los Parques de Actividad y limitada por el muro que supone la A4, por lo que forzosamente almacenaría el agua durante el tiempo de duración de un ciclo de marea.

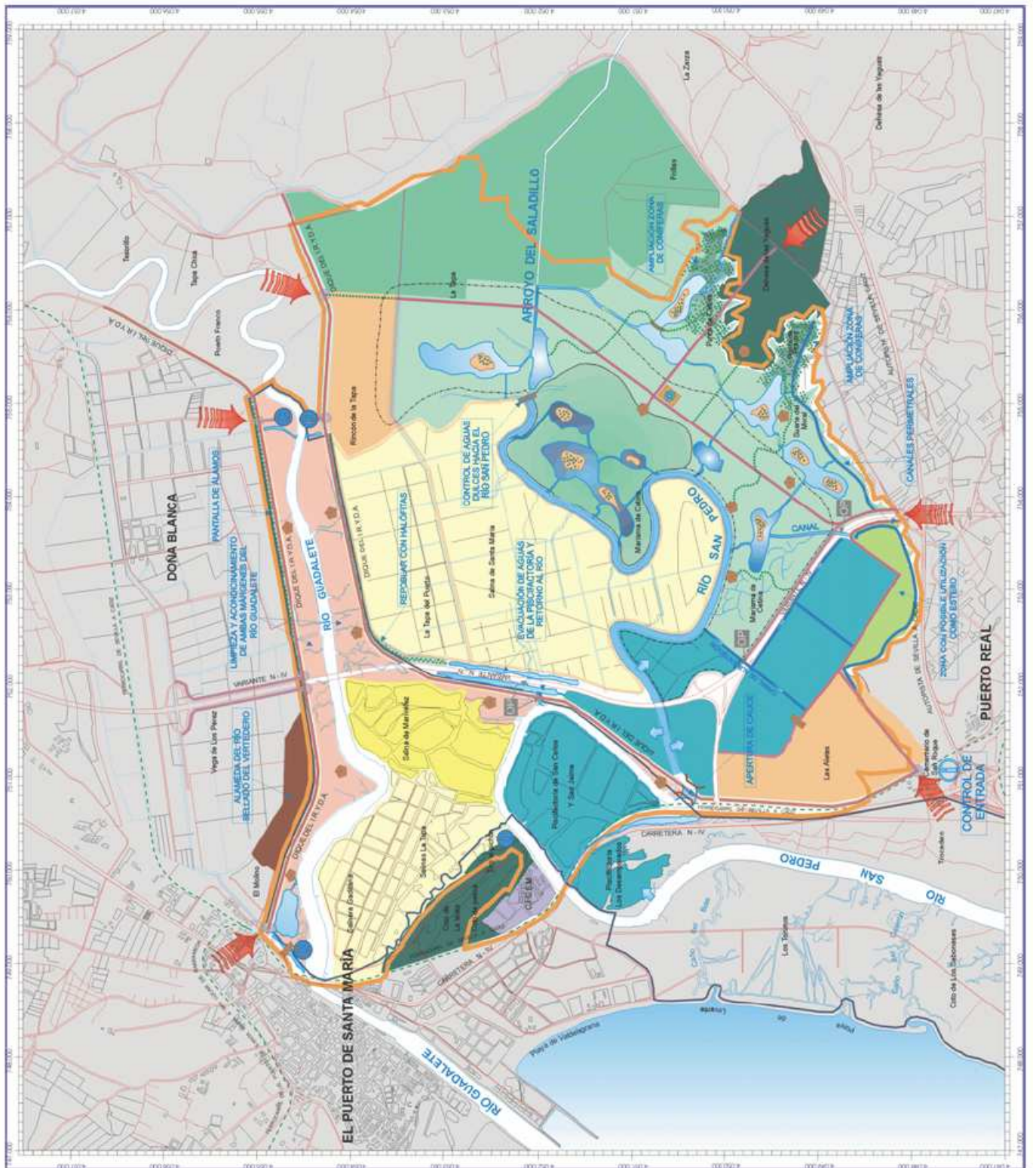
En primer lugar, para orientar la necesaria ampliación de la sección de los tubos existentes bajo la A4, a fin de posibilitar el drenaje de las aguas pluviales incluso en los periodos de retorno extraordinarios, se plantean la instalación de tuberías de diámetro algo mayor las actuales (3 tuberías de 0,875 m de radio

cada una), se considera suficiente ampliar la capacidad de desagüe incorporando una cuarta tubería de 0,875 m de radio; con la cual el caudal a desaguar (con los cuatro tubos) pasa a ser de 77,78 m³/s.

Todas estas tuberías deberán dotarse de sistemas de compuertas, accionables tanto manual como automáticamente, a fin de poder regular los flujos de marea y de desagüe pluvial.

Para paliar la eventual inundación del Área Funcional Medioambiental AF-4 se propone aprovechar tanto las propuestas incluidas en el Plan Especial de ALETAS de recuperar los dos canales secundarios que cruzan longitudinalmente tanto el Área Funcional Medioambiental AF-4 como la Tecnológica, como las incluidas en el Proyecto de Recuperación Ambiental de la Zona Marismal de los Ríos Guadalete y San Pedro promovido por la Dirección General de Costas. En efecto, puede comprobarse que la topografía del terreno desciende conforme nos aproximamos al extremo Sureste del ámbito del Plan Especial (Ver Anexo de Perfiles Zona Este de las Aletas), creándose vasos con cotas incluso inferiores al metro sobre el NMMA. Se plantea, por tanto, dado que el drenaje de pluviales del Área Tecnológica AF-3 se plantea hacia los canales principales, reconducir los canales secundarios a recuperar mejorando su pendiente hasta unirlos y hacerlos pasar mediante tuberías bajo la A4 en la zona de topografía más deprimida a fin de posibilitar el desagüe del Área Funcional Medioambiental AF-4, minimizando en el tiempo su papel como eventual balsa laminación, en las condiciones más adversas antes apuntadas. Sobre estos canales cabe plantear compuertas a fin de regular la permanencia de agua en el Área Funcional Medioambiental AF-4 y el flujo hacia los canales. Se aprovecha para ello no sólo la citada topografía favorable, sino el hecho demostrado en el Modelo 2D de la UCA de que este extremo Sureste no está en el ámbito de la crecida mareal máxima del Caño del Río San Pedro, por lo que podría posibilitarse el drenaje paulatino de esta agua hacia este Caño, fuera del ámbito del Plan Especial, incluso en condiciones de pleamar.

Es interesante señalar que el citado proyecto de Recuperación Ambiental de la Zona Marismal de los Ríos Guadalete y San Pedro prevé, como puede verse en el siguiente gráfico, en estas zonas deprimidas la creación de un sistema de lagunas conectadas mediante canales con sentido de drenaje hacia el Caño del Río San Pedro como puede comprobarse en el esquema adjunto. Este sistema en cascada de lagunas cumpliría perfectamente el papel de balsas de laminación en los casos extremos de inundación mareal y lluvias máximas.



8. EQUIPO TÉCNICO

El presente Estudio de Inundabilidad en el Ámbito del Plan Especial de "ALETAS" ha sido realizado por el siguiente Equipo Técnico perteneciente a la consultora especializada IBERMAD, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO, S.L.:

Cristóbal Ruiz Malia, Biólogo.

Juan José Caro Moreno, Geógrafo.

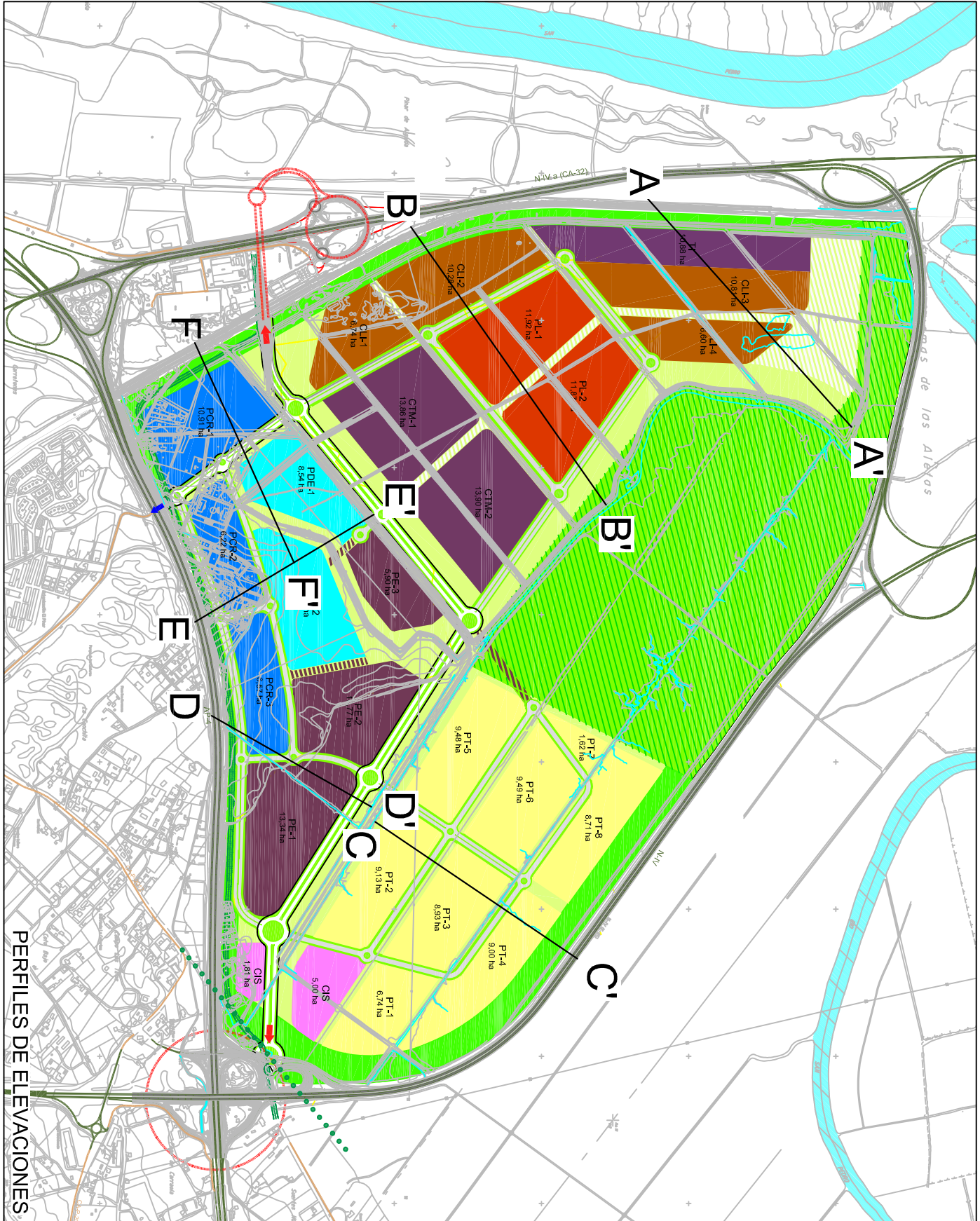
Eloisa Navas Fernández, Lda. Ciencias del Mar.

Antonio Figueroa Abrio, Geógrafo.

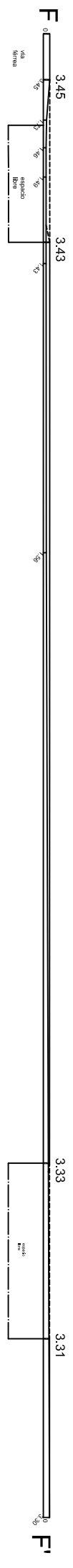
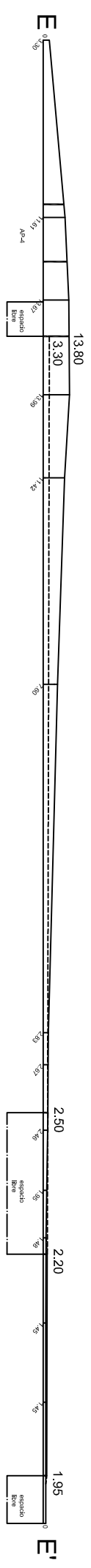
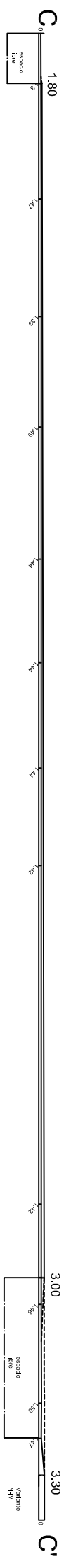
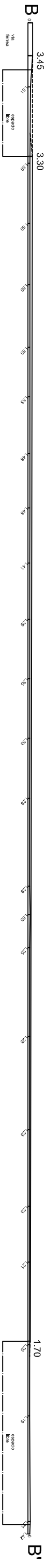
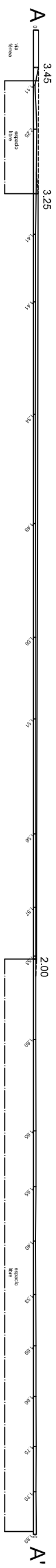
Teresa Ahumada Hueso, Ingeniera Técnica Forestal.

María Victoria Menéndez Daza, Ciencias del Mar.

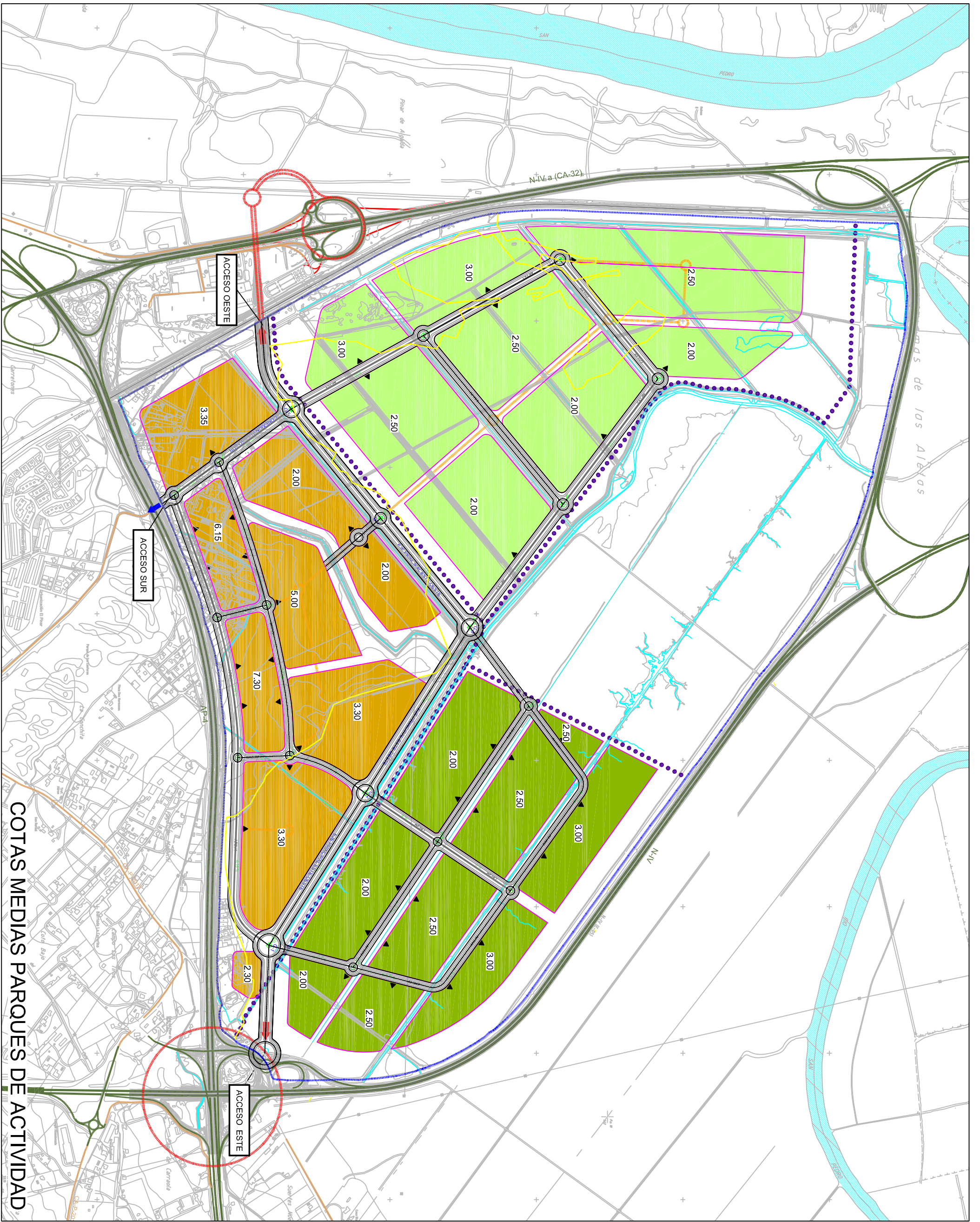
**ANEXO:
PERFILES DE ELEVACIONES**



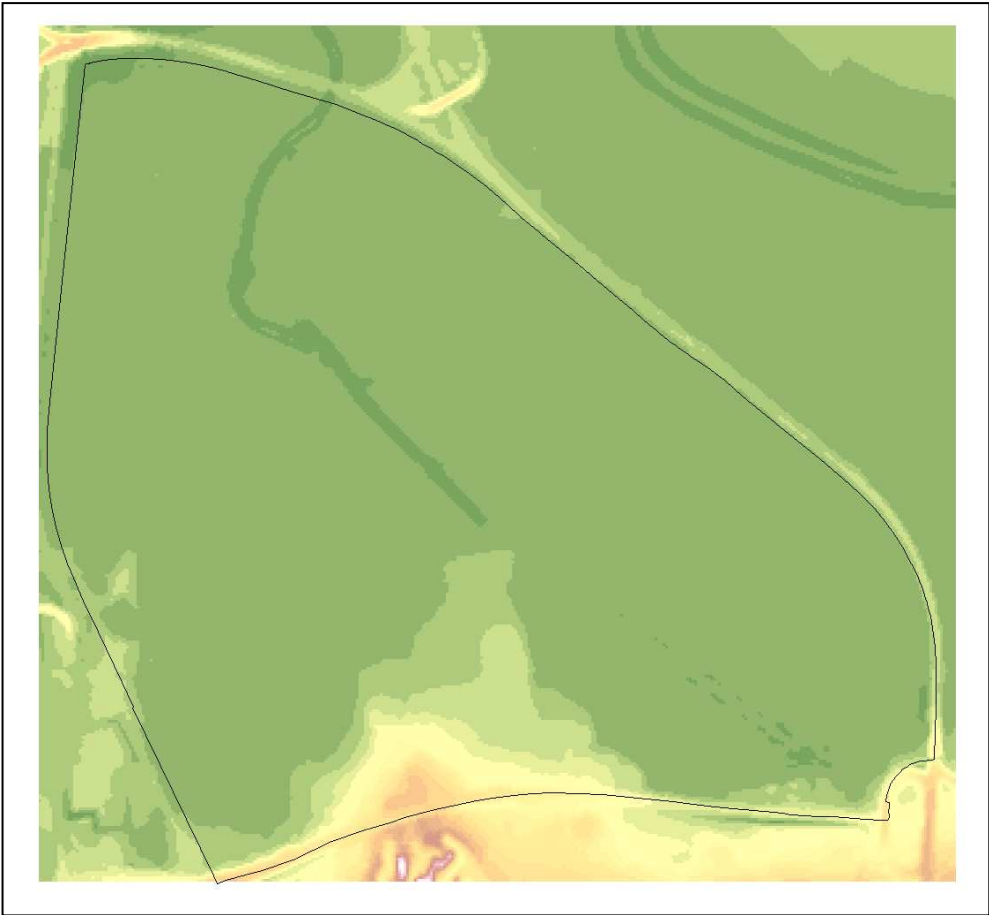
PERFILES DE ELEVACIONES



PERFILES DE ELEVACIONES



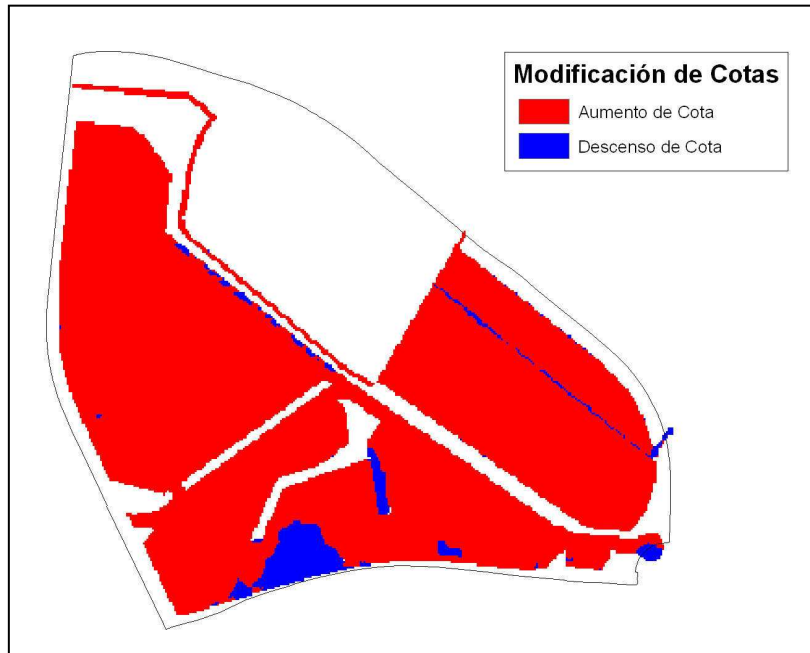
COTAS MEDIAS PARQUES DE ACTIVIDAD



Elevaciones actuales



Elevaciones situación futura

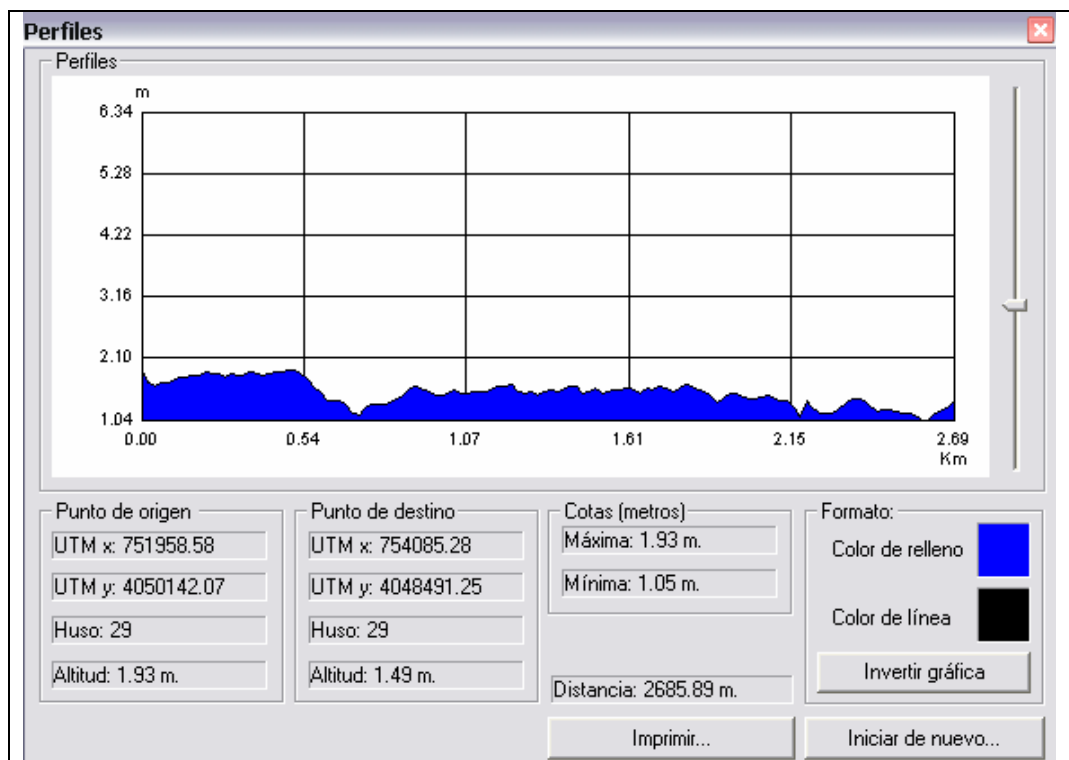


Simulación de elevaciones tras los cambios de cotas.

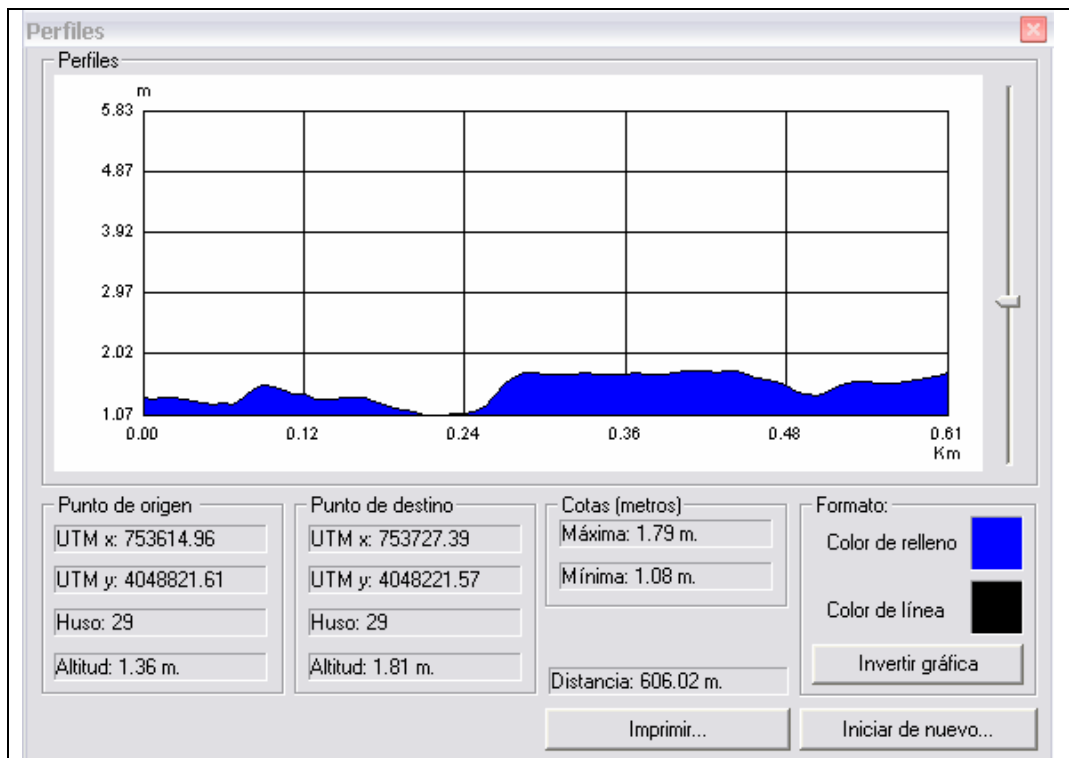
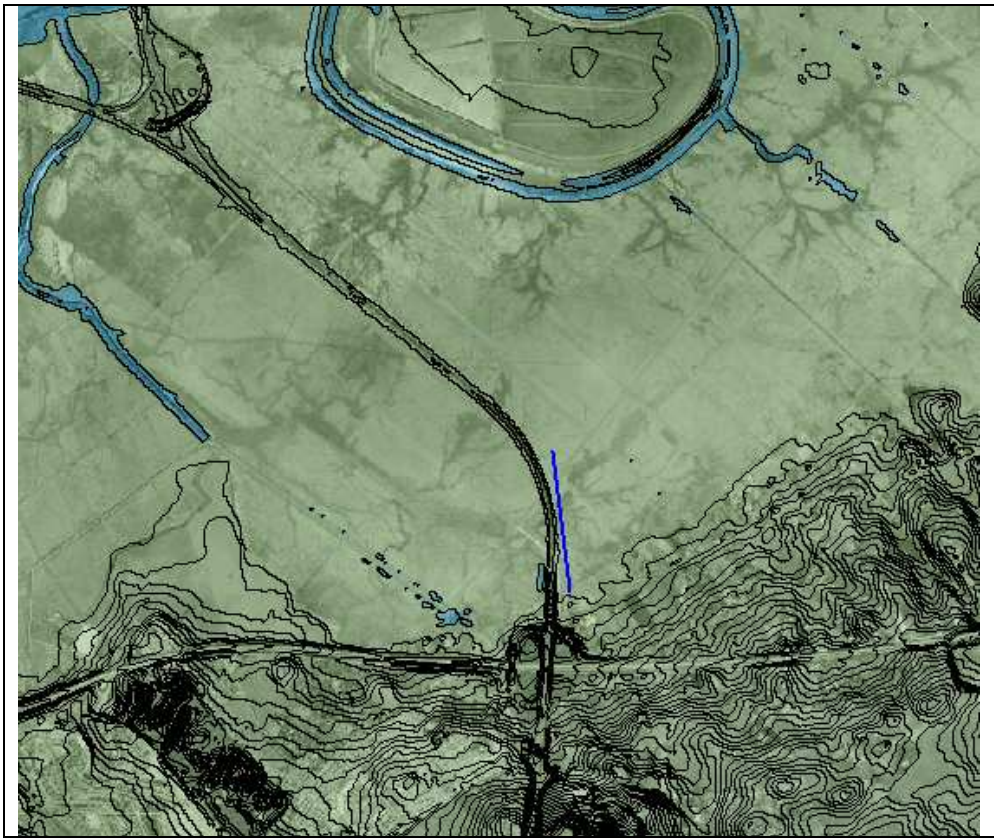
ANEXO:
PERFILES ZONA ESTE DE LAS ALETAS

PERFILES TOPOGRÁFICOS EN LA ZONA ESTE DE LAS ALETAS

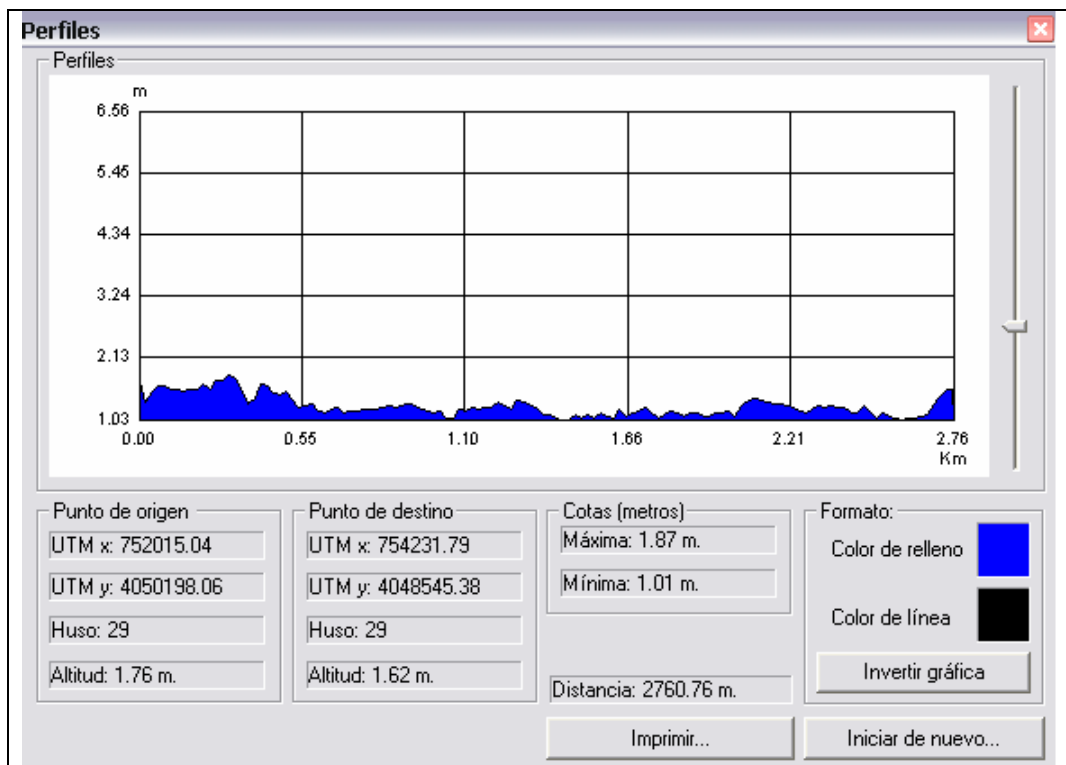
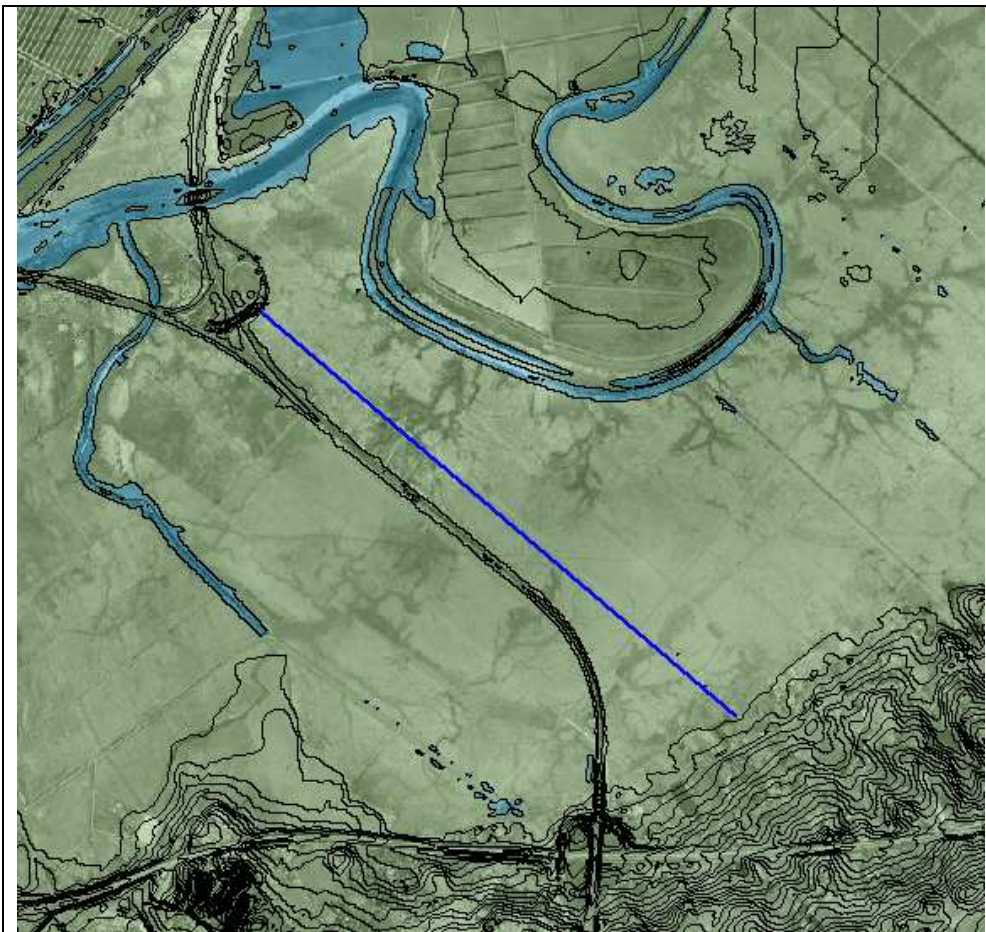
- **Perfil 1**



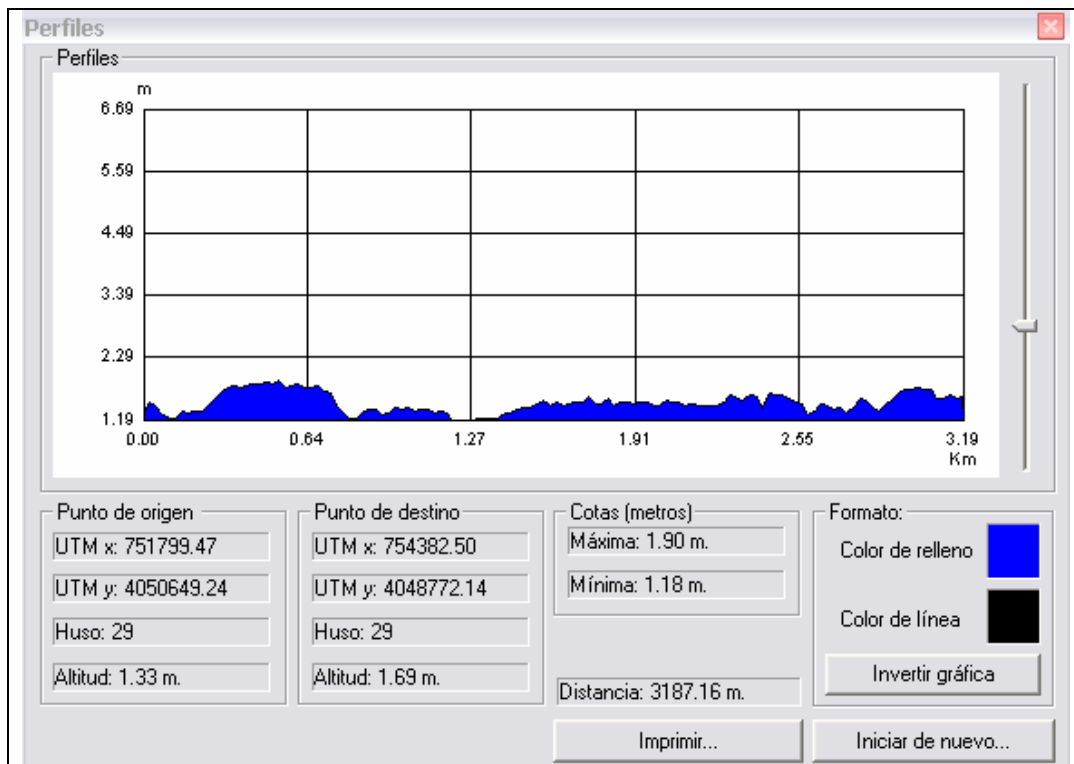
- **Perfil 2**



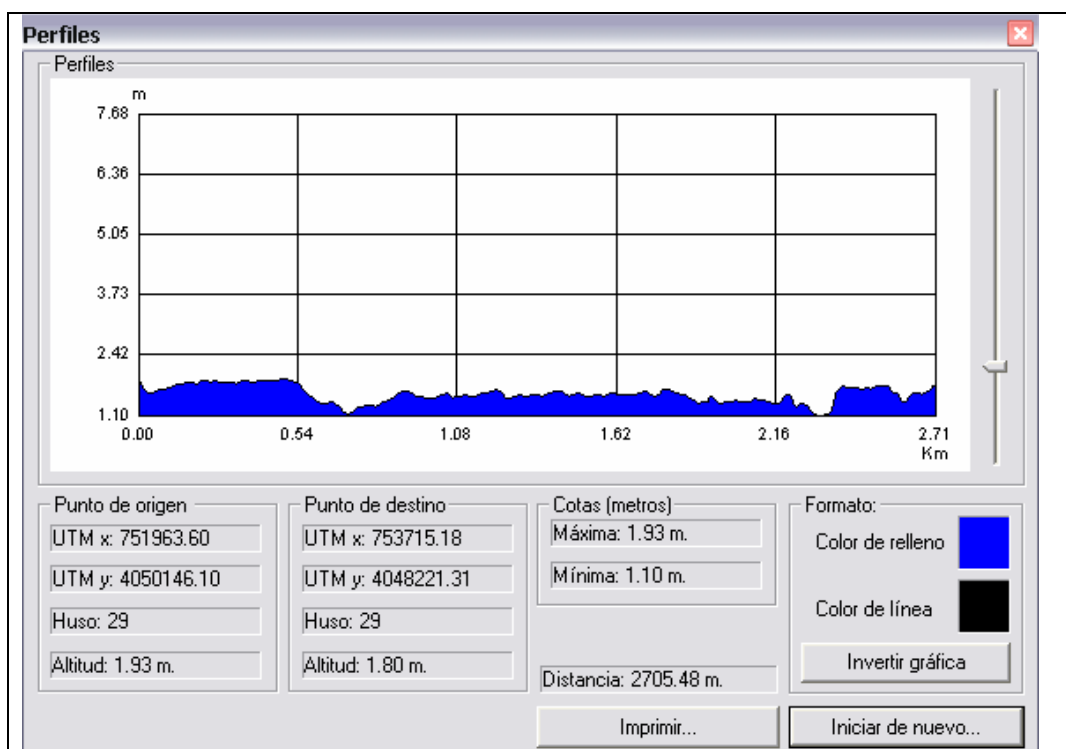
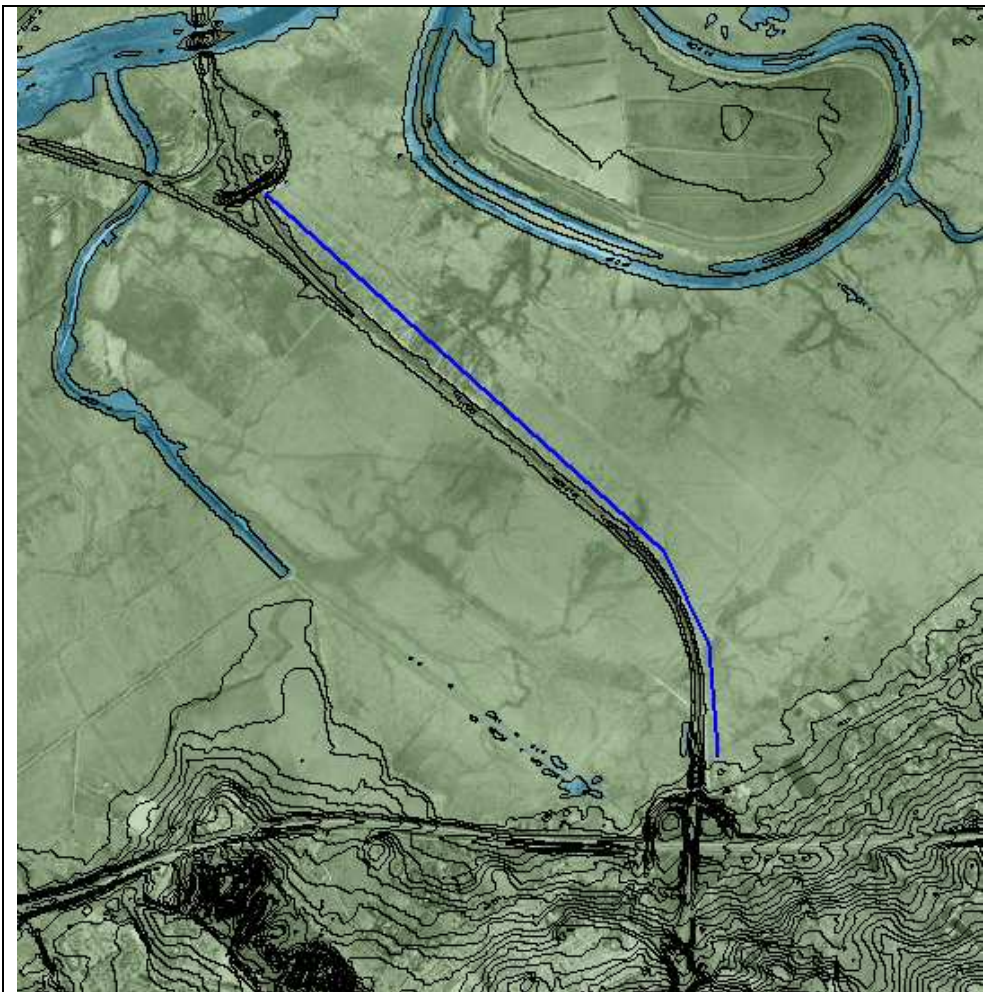
- **Perfil 3**



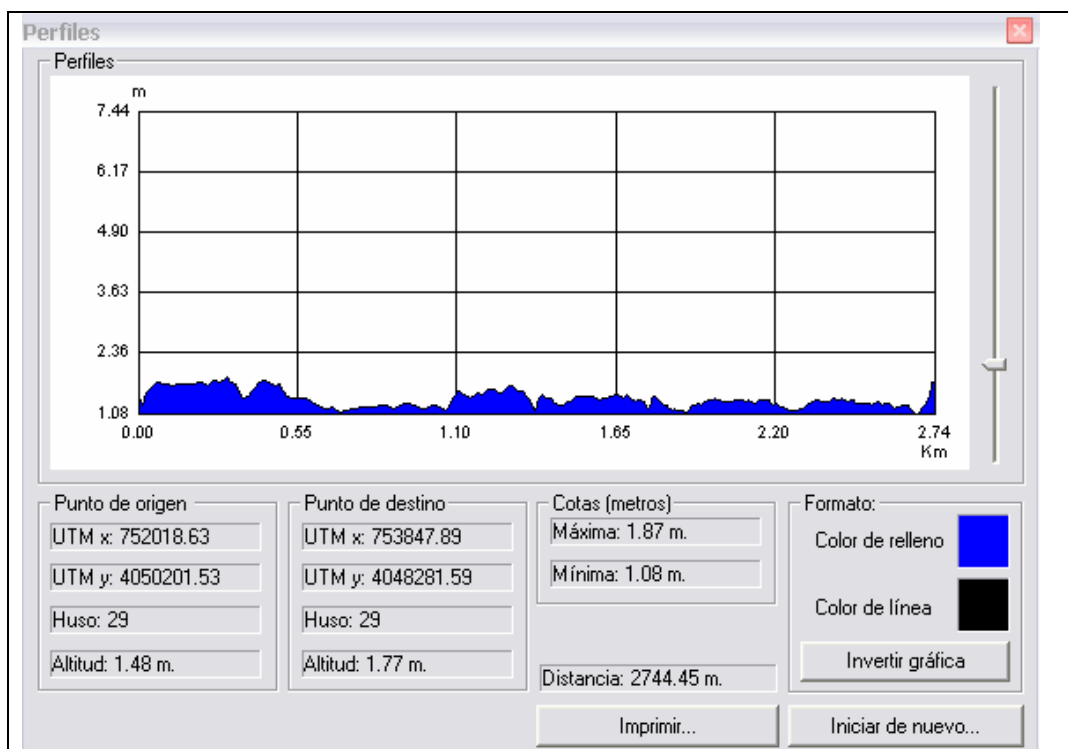
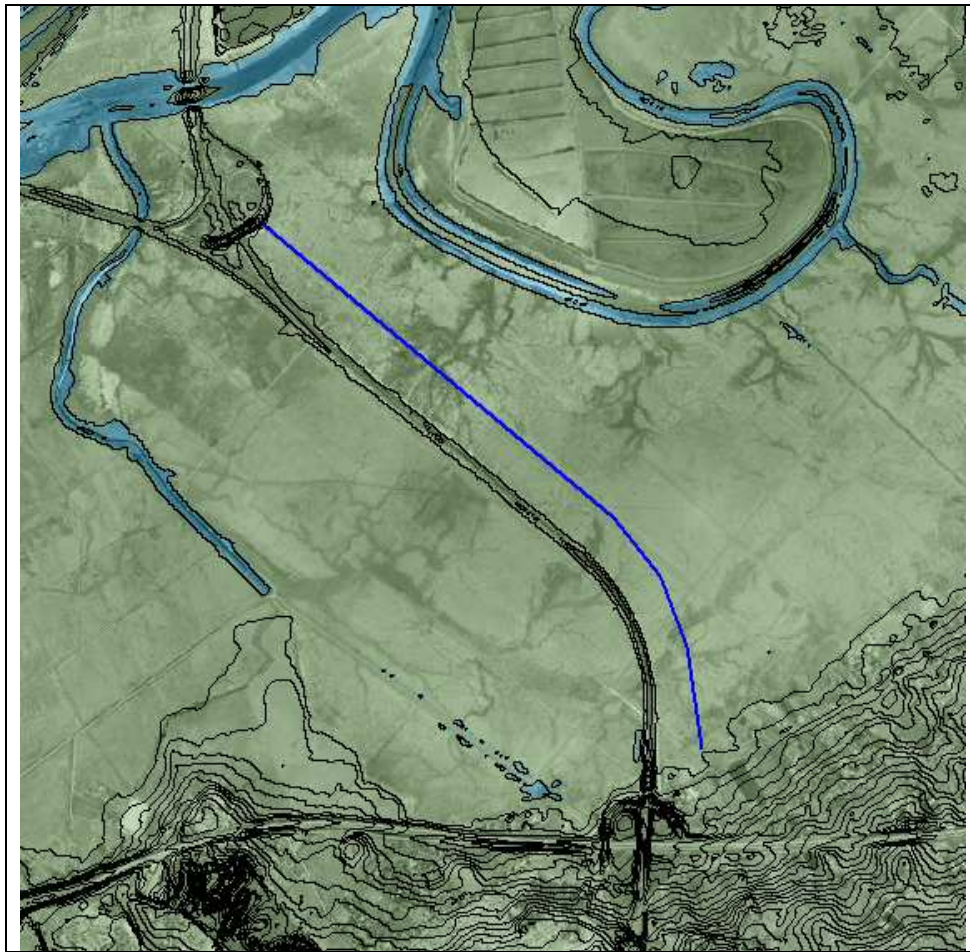
- **Perfil 4**



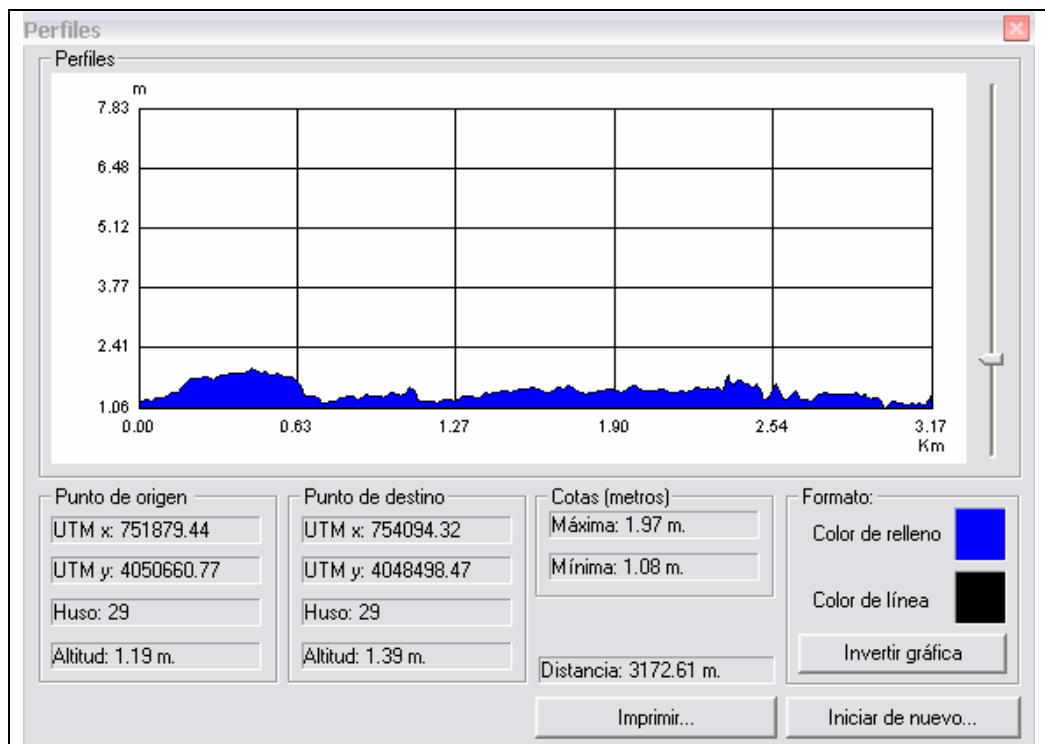
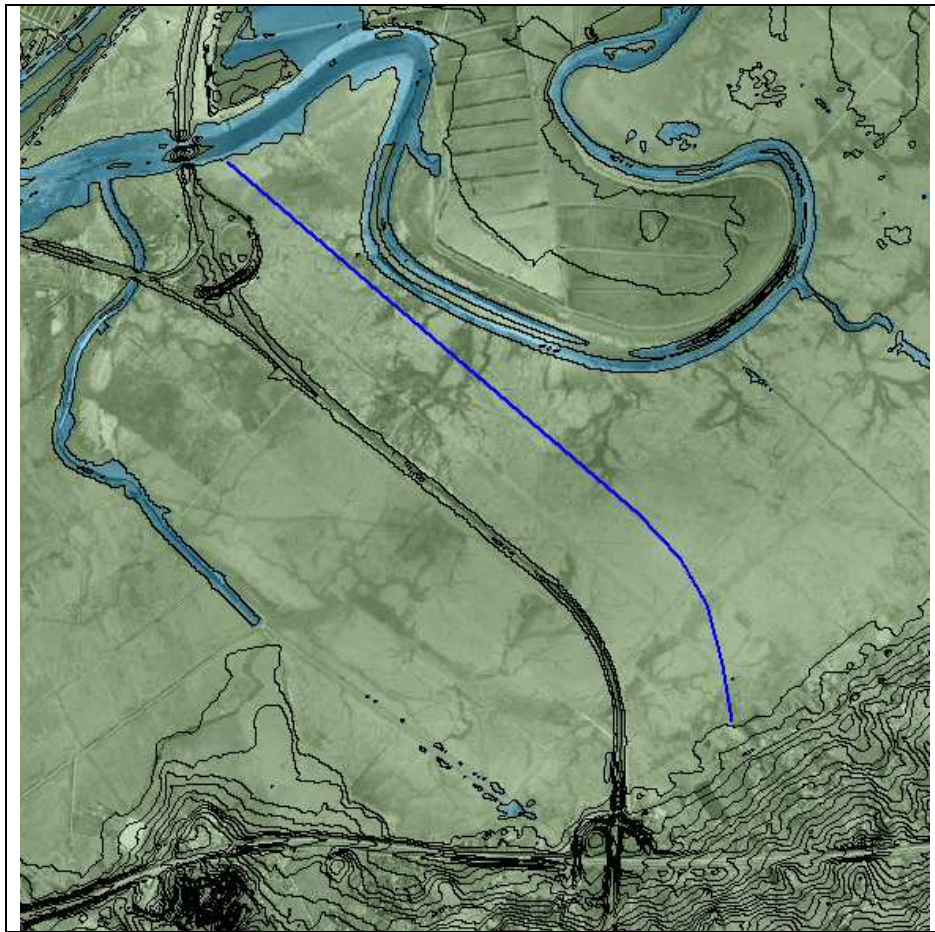
- **Perfil 5**



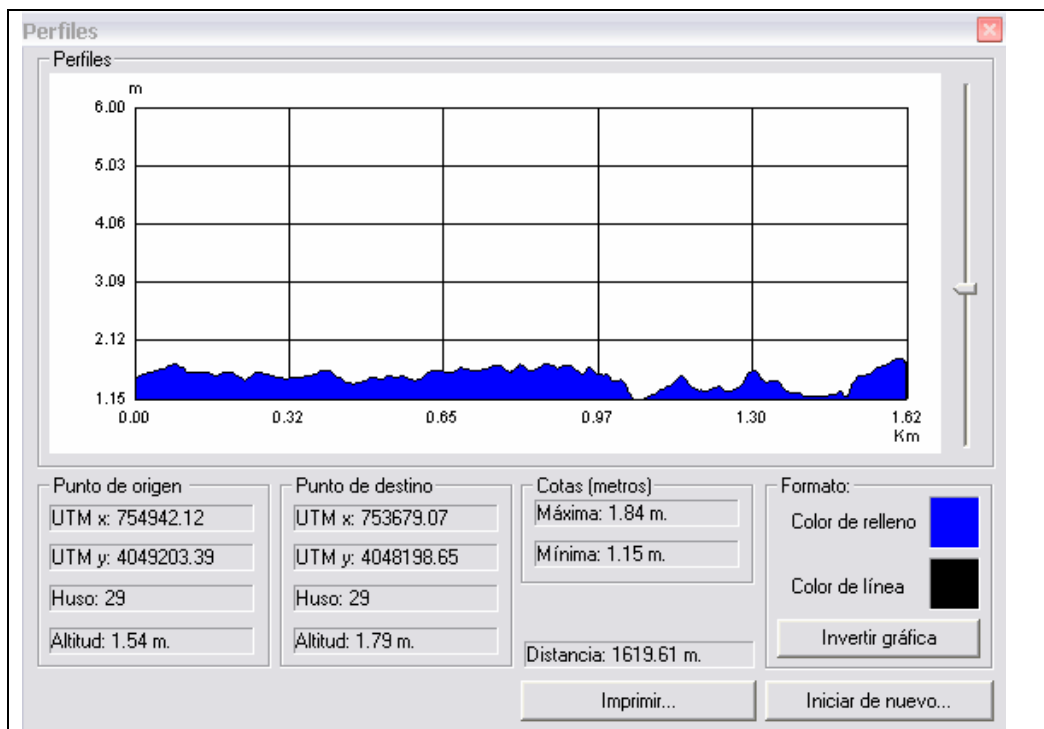
- **Perfil 6**



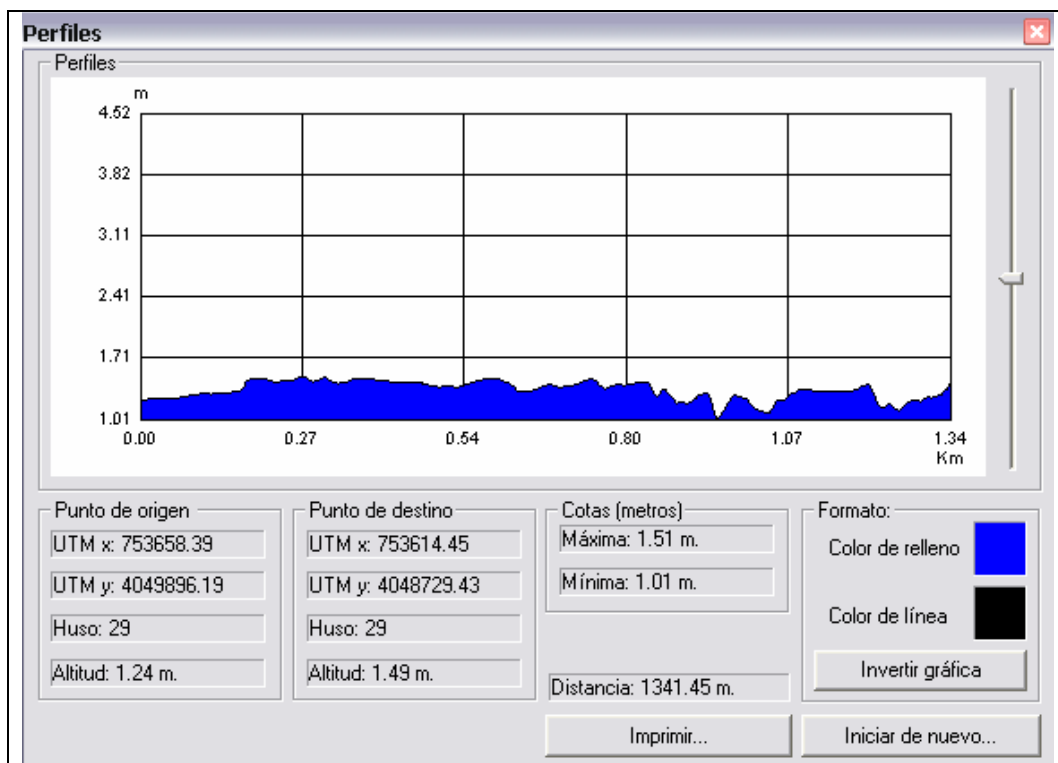
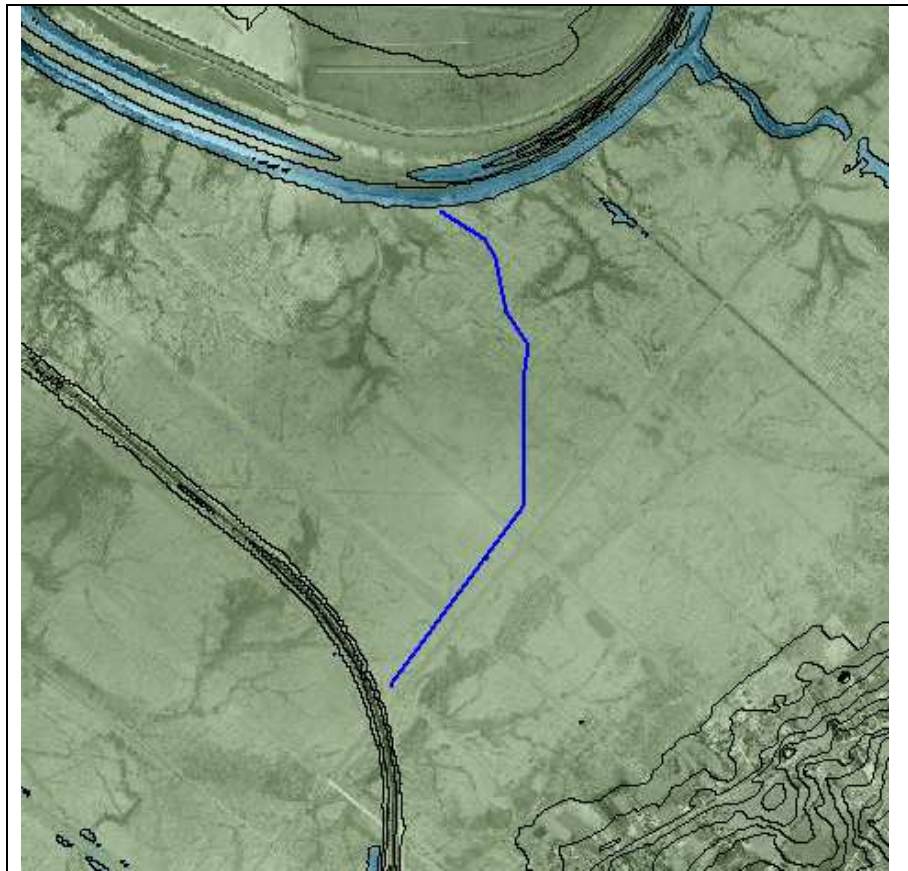
- **Perfil 7**



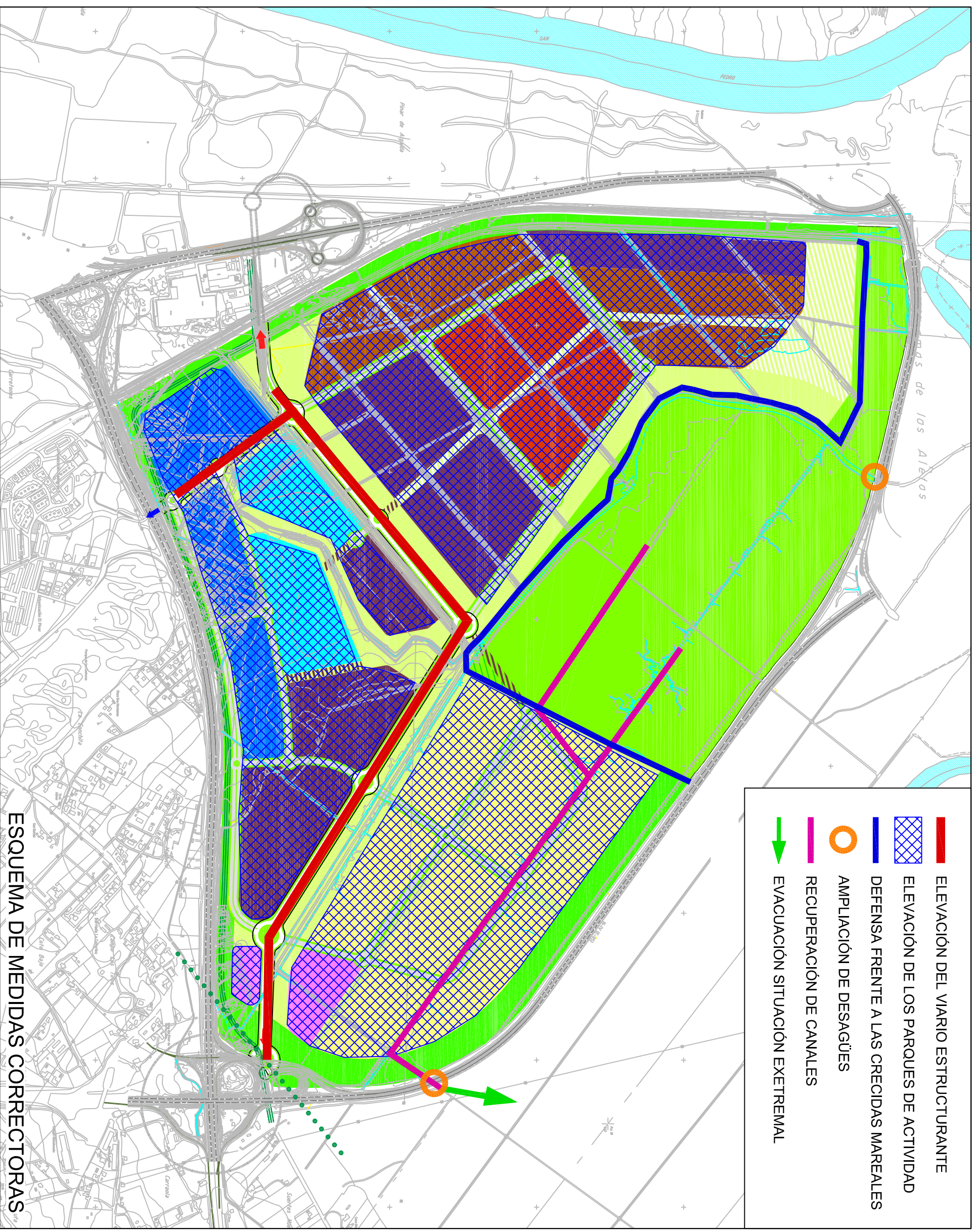
- **Perfil 8**



- **Perfil 9**



ANEXO:
ESQUEMA DE MEDIDAS CORRECTORAS



ESQUEMA DE MEDIDAS CORRECTORAS