

RESTITUCION ANALÍTICA, ESTEREOCORRELACIÓN Y LIDAR PARA LA GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO EN MARISMAS MAREALES.

OJEDA, ZUJAR, JOSE

Centro de trabajo: Dept. Geografía Física. Uinv. de Sevilla

Dirección postal; Maria de Padilla s/n

Correo electrónico: zujar@us.es

MARQUEZ PEREZ, JOAQUIN

Centro de trabajo: Dept. Geografía Física. Uinv. de Sevilla

Dirección postal; Maria de Padilla s/n

Correo electrónico: jmarper@us.es

ALFONSO GOMEZ MOLINA

Centro de trabajo: Stereocarto S.L

Dirección postal; Paseo de Habana, 200

Correo electrónico: sespinosa@stereocarto.com

RESUMEN

Las marismas mareales constituyen uno de los espacios donde la generación de modelos digitales de terreno (MDT) plantean una gran dificultad debido a sus características morfométricas (áreas de escasa variabilidad altimétrica junto a microtopografías de detalle, presencia de vegetación...). Por otra parte, la generación de MDTs constituye un elemento esencial para su caracterización geomorfológica, para los estudios de su vegetación halófila y para la evaluación de riesgos de inundación ligados a una potencial subida del nivel del mar.

En esta comunicación se analizan tres MDTs, generados a partir de fuentes de información altimétrica de diferente naturaleza: cotas, curvas y líneas estructurales (x,y,z) a partir de una restitución analítica; una malla de puntos generados por estereocorrelación digital y, finalmente, datos proporcionados por un sensor aerotransportado tipo Lidar. Los procesos de generación del MDT, a su vez, utilizan algoritmos de diferente naturaleza y problemática (en unos casos se centran en métodos de interpolación y, en otros, en los procesos del filtrado y selección). Los resultados obtenidos en un sector de las marismas mareales de Isla Cristina se evalúan en términos de precisión, así como de su adecuación a los objetivos de la caracterización morfométrica de las marismas mareales y del cálculo de riesgos de inundación.

Palabras clave

Lidar, MDT, marismas mareales, estereocorrelación, restitución analítica.

ABSTRACT

The morphometric characteristics of tidal marshes (limited altitudinal range, microtopography and relatively prominent vegetation) make them one of the most difficult areas in which to generate Digital Elevation Models. DEMs have an important role in their geomorphological characterisation, vegetation spatial distribution and risk assessment in relation to flooding and potential sea-level change.

In this article digital elevation models are generated from three different sources of altimetric data: x,y,z co-ordinates (contours, point and breaklines) derived from analytical restitution; a mesh of points generated by digital stereo-correlation (10x10 m); and, lastly, data from an airborne LIDAR sensor. The generation process for the digital elevation models uses various algorithms with different characteristics (in some cases based on methods of interpolation and, in others, on methods of filtering and selection). The results achieved in a sector of the Isla

Cristina tidal marshes are evaluated in terms of their precision and their adequacy for morphometric characterisation and risk assessment in relation to flooding.

Key words

LIDAR, DEM, tidal marshes, analytical restitution, digital stereocorrelation,

1. INTRODUCCIÓN

Los espacios marismesños, especialmente las marismas mareales (tidal marshes), se encuentran entre los ambientes sedimentarios litorales de mas difícil caracterización altimétrica con técnicas clásicas (presencia de vegetación densa con variación altimétrica superior a la topográfica, zonas de escaso declive junto a fuertes rupturas de pendiente, etc...), tanto para aquellas que obtienen los datos altimétricos “punto a punto” sobre el terreno -GPS, estación total...-, como para las que los obtienen a través de restitución fotogramétrica la cual permite, potencialmente, el registro masivo y continuo de los mismos. Por otra parte, estos espacios se encuentran entre los catalogados, con carácter unánime (IPCC, 2001; MMA, 2005; Pugh, D, 2004), como los de mayor riesgo ante una subida potencial del nivel del mar debido al recalentamiento terrestre. La posibilidad de disponer de tres fuentes diferenciadas de datos altimétricos para el entorno de las marismas mareales de los estuarios del Carreras-Guadiana, las cuales proporcionan información altimétrica con carácter “continuo” desde la perspectiva espacial, nos ha llevado a presentar los primeros resultados de una evaluación de ellas, tanto desde la perspectiva geométrica (caracterización planimétrica/altimétrica) como desde la de su utilidad como fuente imprescindible para la caracterización morfométrica de marismas mareales y riesgos de inundación en estos espacios.

Esta finalidad conlleva, lógicamente la comparación de los 3 MDTs derivados de las respectivas fuentes de información, siendo conscientes que para su creación se han seguido diferentes procedimientos de interpolación en unos casos, y la aplicación de algunos “filtros” a la información de partida en otros. Aunque es intención de los autores de esta comunicación profundizar en la influencia de estos hechos en los resultados obtenidos, se presentan, en esta primera aproximación, los resultados de una comparación con los datos obtenidos directamente de los MDTs suministrados por las empresas y entidades que tomaron los datos originales. Esta opción se justifica por la vertiente aplicada, ya que cada día, en mayor medida, están al alcance de muchos usuarios potenciales la disponibilidad de MDTs distribuidos por instituciones públicas o por diferentes empresas y, en este caso, los utilizados en esta comunicación tienen la particularidad de recoger las tres fuentes de información mas frecuentes y precisas para la obtención de los mismos sobre extensas superficies: (i) curvas de nivel, cotas y líneas de estructura 3D a través de restitución fotogramétrica, (ii) malla de puntos por estereocorrelación digital y líneas de estructura 3D y (iii), finalmente, LIDAR aerotransportado.

2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se circunscribe al ámbito superficial proporcionado por la fuente de información de menor extensión superficial (campaña de LIDAR aerotransportado). Esta ocupa un amplio sector del entorno de las marismas asociadas a los estuarios del Carreras/Guadiana (Fig.1), ubicado en el sector más occidental de la costa de Huelva (junto al puerto y núcleo de Isla Cristina). Este espacio se encuentra sometido a un régimen mareal semidiurno con mareas vivas entorno a los 3 metros de rango mareal, lo

que lo cataloga como marismas mesomareales. Forman parte, en su totalidad, del espacio protegido “Paraje Natural Marismas de Isla Cristina”, lo cual avala el interés ecológico del mismo, estando ocupado mayoritariamente por caños, esteros y marismas mareales colonizadas por vegetación holófila. Al

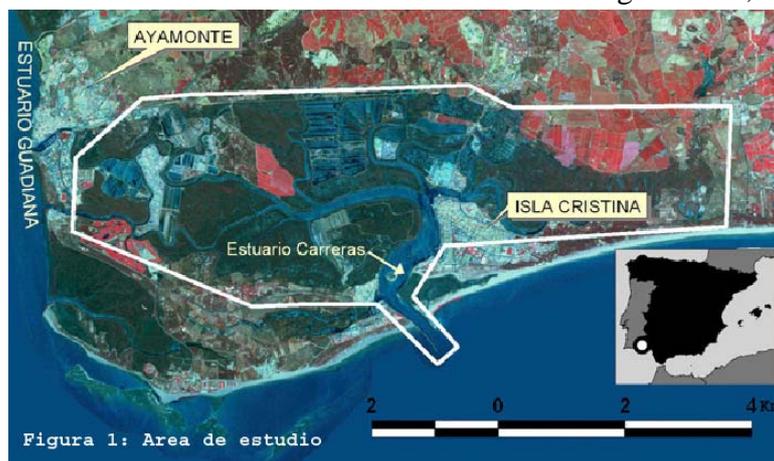


Figura 1: Área de estudio

tratarse de un sector ocupado antrópicamente desde antiguo, parte de las mismas han sido transformadas históricamente en salinas y, más recientemente, en instalaciones de acuicultura cuyas infraestructuras constituyen elementos básicos de su conformación morfológica actual. La zona estudiada se ocupa una superficie 3438 has.

3. OBJETIVOS:

Como ya se comentó en la introducción, el principal objetivo de esta comunicación es evaluar la información altimétrica de tres MDTs generados con técnicas diferentes para la zona de estudio, con dos objetivos secundarios:

- Analizar las diferencias geométricas, esencialmente las altimétricas, entre los tres modelos a través de diferentes estadísticos (error medio cuadrático, error medio, etc.), así como analizar la variabilidad espacial de las diferencias.
- Evaluar las diferencias existentes entre los tres modelos de cara a la adecuada caracterización morfométrica (enfazando los aspectos de representación espacial) de las marismas mareales del área de estudio. Esta caracterización se centrará en la proyección sobre los MDTs de diferentes niveles marinos procedentes de los datos del mareógrafo próximo del Puerto de Huelva. La intención de ello es doble:
 - Analizar las diferencias en la caracterización altimétrica de las zonas intramareales marismeñas, utilizando diferentes niveles críticos del ciclo mareal.
 - Evaluar su interés y utilidad de cara a la cartografía de riesgos de inundación en la zona de estudio. Para ello, y con carácter puramente experimental, se toman, además de los anteriores, los niveles riesgo

asociados al máximo nivel registrado (marea + “storm surge”) para el mareógrafo de Huelva (Fraile, P, 2005).

4. DATOS.

Los tres MDTs analizados han sido suministrados por diferentes empresas e instituciones y tienen las siguientes características.

1.- MDT procedente del vuelo fotogramétrico realizado en 1999 por la empresa RESTISUR como parte del contrato realizado a la misma por la Consejería de Medio Ambiente para la realización de un proyecto transfronterizo INTEREG III (MDT_GUADI). Se trata de un vuelo en color a escala aproximada 1/20.000. A petición del equipo director del proyecto se realizó una restitución clásica en 3D adaptada a las características de la zona de estudio. Los elementos restituidos fueron curvas de nivel de 5 metros (2,5m. en zonas planas y marismas), cotas altimétricas en las áreas con ausencia de vegetación marisma y líneas de estructura (márgenes de caños y esteros, infraestructuras, etc...). Con ellas se realizó un TIN (Arcinfo 8.0) y de él se extrajo una malla numérica (formato “grid”) de 2 metros de resolución espacial.

2.- MDT editado por la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 2005): Modelo Digital del Terreno de Andalucía extraído por estereocorrelación (MDT_JUNTA), junto con algunas líneas de estructura, a partir del vuelo fotogramétrico (blanco/negro) realizado en el 2001-2002 para toda la Comunidad Autónoma andaluza. Está compuesto por una malla regular de puntos de 10 x 10m y se obtuvo como paso intermedio para la generación de la ortofoto de Andalucía (resolución 0.5 metros). Actualmente constituye el MDE de mayor exactitud y detalle para la totalidad de la Comunidad Autónoma.

3.- MDT y MDS (modelo digital de superficies) proporcionados por la empresa Stereocarto S. L. y elaborados a partir de los datos suministrados por una campaña aerotransportada con un sensor LIDAR. El vuelo fue realizado el 14 de octubre del 2003 con el sensor Toposys II (pulse fiber scanner) a unos 900 metros de altitud, obteniendo información para el primer y último eco. Los datos aportados indican una precisión de 0.15 m en altura y 0.5 m. en posición. El sensor utilizado toma 127 medidas por barrido con una separación de 0,1 m entre barrido a una velocidad de 65 m/s (253 Km/h), proporcionando un tamaño de huella (foot print) sobre el terreno de aproximadamente 0,80 m. Estos datos, una vez procesados, permiten obtener (mediante algoritmos de selección y filtrado) un Modelo Digital de Terreno (MDT –filtrada la vegetación y edificios) y un Modelo Digital de Superficies (MDS). Los datos utilizados en esta comunicación se suministraron en formato raster (grid) tanto para el MDT como el MDS con una resolución espacial de 2 m. A los efectos de la comparación con otros modelos se ha utilizado el MDT (MDT_LIDAR).

5. METODOLOGIA Y RESULTADOS

5.1. Análisis estadístico y espacial de las diferencias altimétricas

Para el análisis de los datos altimétricos, en este apartado, hemos reducido el área de estudio, partiendo de la zona cubierta por el MDT_Lidar, a las superficies que todavía

hoy son funcionalmente espacios mareales, junto a aquellas que, aunque han sido aisladas de la dinámica mareal, conservan la estructura morfológica de marismas mareales (caños, esteros, levées, pozas hipersalinas, etc.), así como a las infraestructuras antrópicas ligadas a salinas y áreas de acuicultura que todavía mantienen su carácter de zonas húmedas, aunque los procesos de inundación sean controlados por el hombre.

5. 1.1.- Comparación estadística y distribución el error en la altimetría de los MDTs.

Esta comparación se realiza a partir del cálculo del Error Medio (EM) y del Error Cuadrático Medio (ECM) de los MDTs obtenidos por estereocorrelación (MDT_JUNTA) y por restitución fotogramétrica (MDT_GUADI), tomando como referencia el MDT obtenido con el sensor Lidar (MDT_LIDAR). A los efectos de esta comunicación, entendemos los datos del Lidar como "verdad terreno", tratándose, por lo tanto, de errores relativos a éste.

Dado que la resolución espacial de los datos originales es diferente, y con objeto de obtener modelos con igual geometría y resolución espacial que el Lidar, fue necesario interpolar los datos de los modelos obtenidos por estereocorrelación y restitución. Por esta razón, la comparación altimétrica entre los modelos puede realizarse a partir de tres tipos de datos:

- Con todos los datos de los modelos una vez interpolados (resolución 2 m), sin realizar diferencias entre ellos. Para evaluar el error global se emplean todos los puntos del modelo: 6186082
- Los datos originales, obtenidos mediante medición directa de sus valores altimétricos. Para su evaluación se emplearán diferentes conjuntos:
 - Para el MDT_JUNTA se utilizan todos los puntos originales obtenidos por estereocorrelación: 247467.
 - Para el MDT_GUADI se emplea un subconjunto del anterior, para normalizar la comparación: aquellos que se encontraban a menos de 1 m de distancia de los datos restituidos fotogramétricamente. El número final de puntos es de 18465.
- Aquellos que proceden de la interpolación de los datos medidos originalmente, y que han sido generados para adaptarse a la geometría y resolución espacial del modelo Lidar. Aquí se utilizarán todas las celdillas del modelo Lidar, excepto aquellas coincidentes con la información original:
 - En el caso del MDT_JUNTA suponen 5938622 celdillas.
 - En el modelo del MDT_GUADI son 5631787 las celdillas empleadas.

Respecto a la interpolación, hay que considerar:

- En el caso del MDT_JUNTA, los datos originales (puntos obtenidos por estereocorrelación), poseen una distribución espacial regular, y su equidistancia es de 10 metros. Posteriormente, mediante la aplicación de la triangulación (opción Delaunay) se consigue un TIN y se extrae un MDT en formato grid, cuyas celdillas poseen una resolución espacial de 2 metros, y coinciden geométricamente con el Lidar.
- Los datos empleados para generar el MDT_GUADI se distribuyen de modo más irregular (curvas, cotas y líneas de estructura), y su densidad depende de la

complejidad de la zona: mayor donde aparecen líneas de estructura (bordes de caños, infraestructuras, etc.), y menor donde únicamente aparecen marismas con vegetación densa. La interpolación de estos valores, también mediante la triangulación (opción Delaunay), posibilita la caracterización de un modelo (grid) con equidistancia de 2 metros, coincidente geoméricamente con el Lidar.

Los resultados obtenidos, recogidos en la Tabla 1, muestran que no existen grandes diferencias entre los tres modelos, ya que tanto el ECM, EM, presentan valores inferiores a 1 m. El rango de las diferencias indican, por lo tanto, que, desde una óptica estadística, son modelos con escasas diferencias absolutas. Estos estadísticos del error probablemente pasarían todos los estándares oficiales para MDT obtenidos a través de fotogrametría para las escalas de los vuelos utilizados. Habría, sin embargo, que hacer una serie de precisiones respecto a los valores que la Tabla 1 muestra:

- El modelo generado por estereocorrelación posee un error cuadrático medio, y desviación estándar, muy inferior a las del modelo obtenido mediante restitución fotogramétrica, independientemente de si se evalúan los datos originales o los interpolados, aunque en este segundo caso las diferencias son menores.
- Las comparaciones entre datos globales, originales e interpolados llevan a concluir que, en el caso del MDT_JUNTA, las diferencias se sitúan, homogéneamente entorno a 0,5 m. Sin embargo, en el caso MDT_GUADI estos valores se sitúan entorno a 0.90 m, si bien el error de los datos originales es superior al de los datos interpolados. La razón de esta aparente contradicción, ya que se espera que al error de la medición se sume el de la interpolación, puede ser debida a la naturaleza de la localización de los puntos de control: mientras que los datos medidos se contrastan en posiciones donde abundan las líneas de estructura y cotas, los datos interpolados han sido comparados en zonas donde estas líneas no aparecen. Como la distancia entre ellas puede ser elevada la triangulación puede generar triángulos alargados donde los errores se compensen.
- Por último, el error medio de todos los modelos (Figura 3) indica que el promedio de sus valores altimétricos se encuentran por encima de los que contiene el modelo Lidar, si bien en los modelos generados por estereocorrelación el error es mínimo (0.06m). En cambio, los modelos generados por restitución poseen una sobre elevación de más de 0.5 m, lo cual puede indicar una sobre elevación sistemática que, en parte, también explica el punto anterior.

Tabla 1: Cálculo del error altimétrico de los modelos

	Error Global							
	Resol.	ECM	Des. ECM	EM	Desv. EM	Max +	Max -	Puntos
MDT_JUNTA	2 m	0.52	0.41	0.05	0.67	4.41	-6.28	6186082
MDT_GUADI	2 m	0.86	0.64	0.56	0.92	5.86	-4.38	6186082
	Error de los datos originales (medidos)							
MDT_JUNTA	10 m	0.53	0.41	0.05	0.67	4.28	-6.27	247467
MDT_GUADI	10 m	1.06	0.71	0.92	0.89	5.8	-2.17	18465

	Error de los datos interpolados							
MDT_JUNTA	2 m.	0.52	0.40	0.06	0.67	4.81	-6.02	5938622
MDT_GUADI	2 m.	0.84	0.63	0.53	0.91	5.86	-4.38	5631787

Fte- Elaboración propia

5.1.2- Análisis de la distribución espacial del error de los modelos

El objetivo de este epígrafe es completar la información estadística del error con su distribución espacial, evaluándolo a través de la visualización cartográfica (ver Figura 2). La simple visualización de la resta de los modelos nos permite apreciar como, de forma generalizada, existe una infravaloración de los valores en los espacios de marismas mareales en el MDT_GUADI, así como una sobrevaloración en los sectores donde hay infraestructuras (incluidas como líneas de estructura en el TIN) y los caños principales. Por otra parte el, MDT_JUNTA presenta el mismo patrón espacial, aunque algo mas atenuado sobre todo en las zonas marismeñas, incluyendo en este caso también las presentación infraestructuras. Sólo los caños principales aparecen sobrevalorados, en este caso igual que en el modelo anterior, debido que los datos del lidar están midiendo la superficie real de la onda de marea.

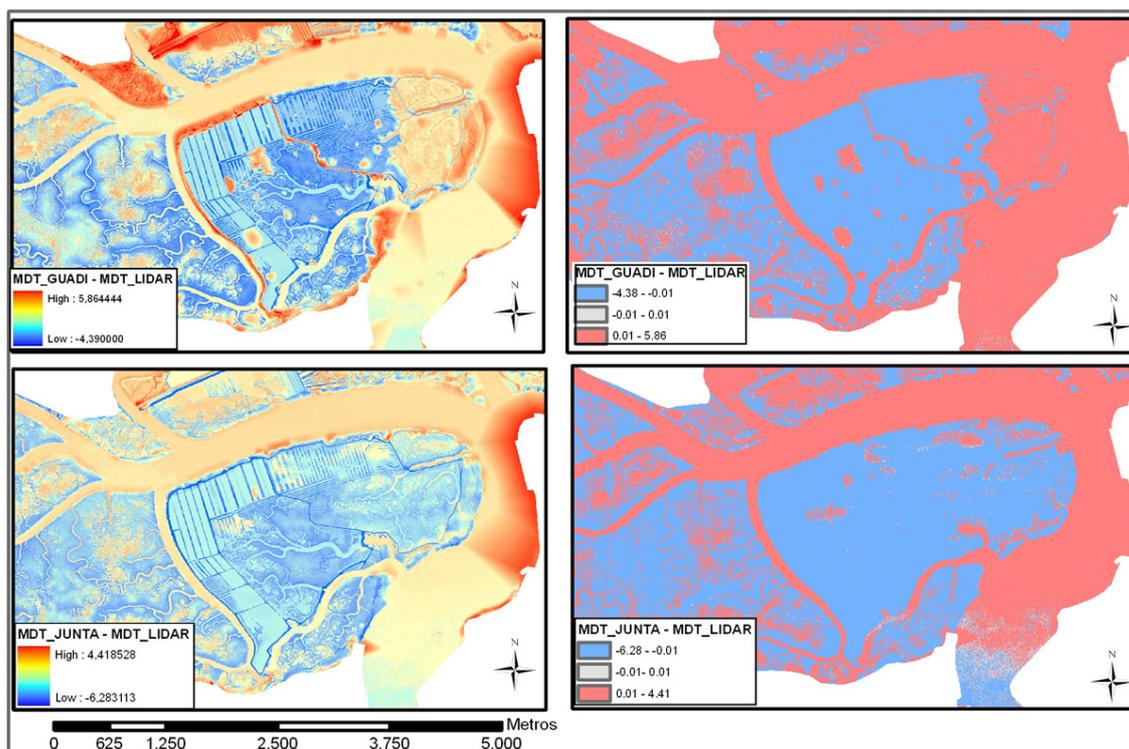


Figura 2: Comparación altimétrica de los MDTs. Fte: Elaboración propia

Dado que el número de datos en cualquiera de los casos (datos medidos / datos interpolados) es excesivo, y en formato raster solo pueden ser simbolizados por el color, se ha optado por extraer de ellos una muestra de la población inicial aplicando un muestreo aleatorio y representar las diferencias con puntos de diferente color (signo),

utilizando, adicionalmente, una variable visual mas eficiente para valores cuantitativos como es el tamaño. La representación visual de las diferencias para los datos medidos se recogen en la figura 3. Aunque los datos medidos por estereocorrelación (DTM_JUNTA) cubren regularmente el espacio, para facilitar la comparación solo se han representado los que están situados a menos de 1 m. de los datos restituidos. De ella podemos extraer las siguientes consideraciones:

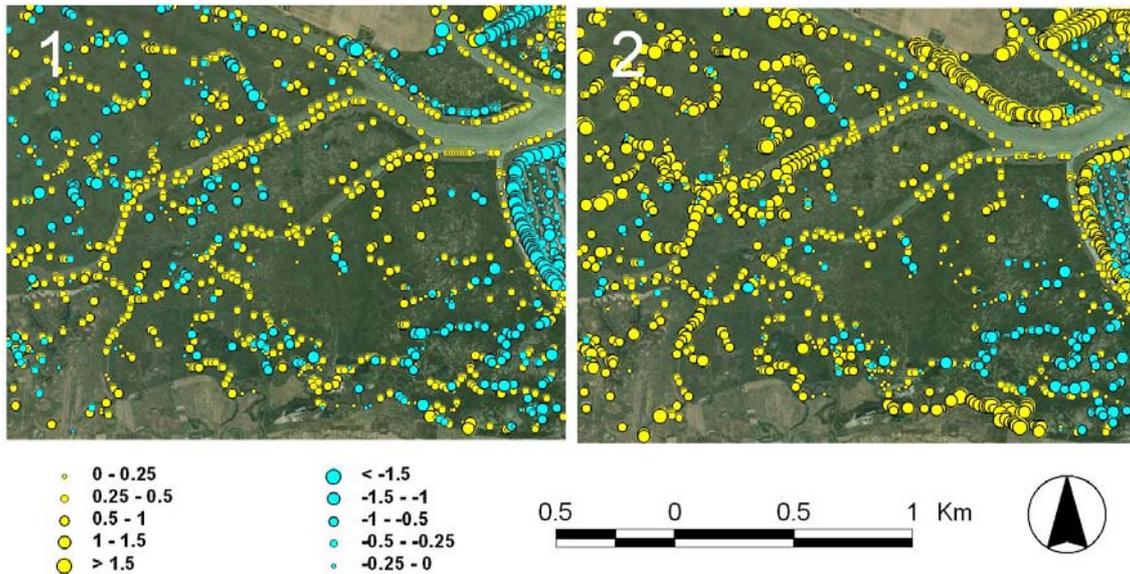


Figura. 3. Diferencias altimétricas en los puntos medidos, de los que se han seleccionado una muestra por muestreo aleatorio: 1.- DTM_JUNTA – DTM_Lidar; 2.- DTM_GUADI – DTM_Lidar. Fte: Elaboración propia

- El MDT por estereocorrelación (MDT_JUNTA) genera valores sistemáticamente más altos en las zonas donde existen algunos elementos antrópicos y, especialmente, en los cauces, caños y esteros. En las zonas de marismas propiamente dichas, los valores obtenidos por el Lidar suelen ser superiores, ya que el sensor no puede alcanzar el terreno que sustenta a la vegetación, y proporciona los valores altimétricos de su cobertura vegetal. Es significativo el escaso número de datos (cotas) tomados en las marismas si excluimos caños y esteros.
- Cuando se compara el modelo generado por restitución (MDT_Guadi) con el obtenido con el Lidar (MDE_Lidar), los resultados no son tan claros como en el caso anterior. En la mayoría de las localizaciones, la restitución obtiene valores superiores a los del Lidar y siempre inferiores a las ofrecidas por el modelo por restitución. En las zonas de marismas, y no en todas, el Lidar alcanza valores superiores. En las zonas de marismas y en las infraestructuras los valores son inferiores.

5.2. Diferencias en la caracterización morfométrica e inundación de las zonas marismeñas.

El objetivo de este epígrafe es completar la información del error estadístico y su distribución antes analizado, ya que por la magnitud altimétrica de los espacios mareales, un pequeño error estadístico puede encubrir grandes deficiencias en la caracterización morfométrica y geomorfológica de las marismas y, por lo tanto, modificar sensiblemente su variabilidad espacial, por otra parte esencial para modelizar los procesos de inundación y los riesgos asociados.

5.2.1 Caracterización morfométrica la zona intramareal para diferentes niveles críticos del ciclo de marea.

Con la intención de evaluar el interés de los modelos analizados para la caracterización morfométrica de la zona intramareal, hemos proyectado sobre los mismos, los niveles de marea críticos procedentes del mareógrafo más cercano (Huelva), extraídos de Fraile, P. 2005.

Nivel marino proyectado	Coefficiente	Huelva
Máxima pleamar registrada (marea + "surge")	-	2,77
Pleamar máxima viva equinoccial	1,2	2,09
Pleamar media de las vivas equinoccial	1	1,78
Pleamar media de las vivas	0,94	1,69
Pleamar media	0,7	1,32
Pleamar de aguas muertas ordinarias	0,45	0,93
Pleamar de las aguas muertas débiles	0,2	0,55
Diferencia altimétrica nivel medio mareógrafo/"0" Alicante	-	0,39

Tabla. 2.- Aunque los datos del mareógrafo estaban referidos al Datum del mismo, conocida su diferencia (-1.61m) respecto al "0" utilizado en los MDT (nivel medio del mar en Alicante) ha sido posible la elaboración de esta tabla para su aplicación en este trabajo. Todas las alturas de la tabla están, por lo tanto, referidas al nivel medio del mar en Alicante. Fte: Fraile, 2005

La intención de proyectar estos niveles críticos sobre las superficies altimétricas generadas en los tres modelos, se deriva del control que ejercen los mismos sobre las formaciones vegetales halófilas características de las marismas mareales, ya que el hidropériodo (tiempo que permanecen inundadas en los diferentes ciclos mareales) constituye el principal factor ecológico limitante de las mismas. Por otra parte, su papel esencial en los procesos de sedimentación y, a su vez, su organización espacial dependiente de la altimetría del substrato en que se asientan, hacen que los tipos de vegetación constituyan indirectamente un magnífico indicador altimétrico y viceversa. Este es el sentido de que en algunas referencias bibliográficas (Ojeda y Márquez, 1997), las formaciones vegetales sean utilizadas para caracterizar morfométricamente a los espacios marismeños cuando la información altimétrica disponible es insuficiente.

De los resultados recogidos en las figura 4, se pueden extraer las siguientes consideraciones generales:

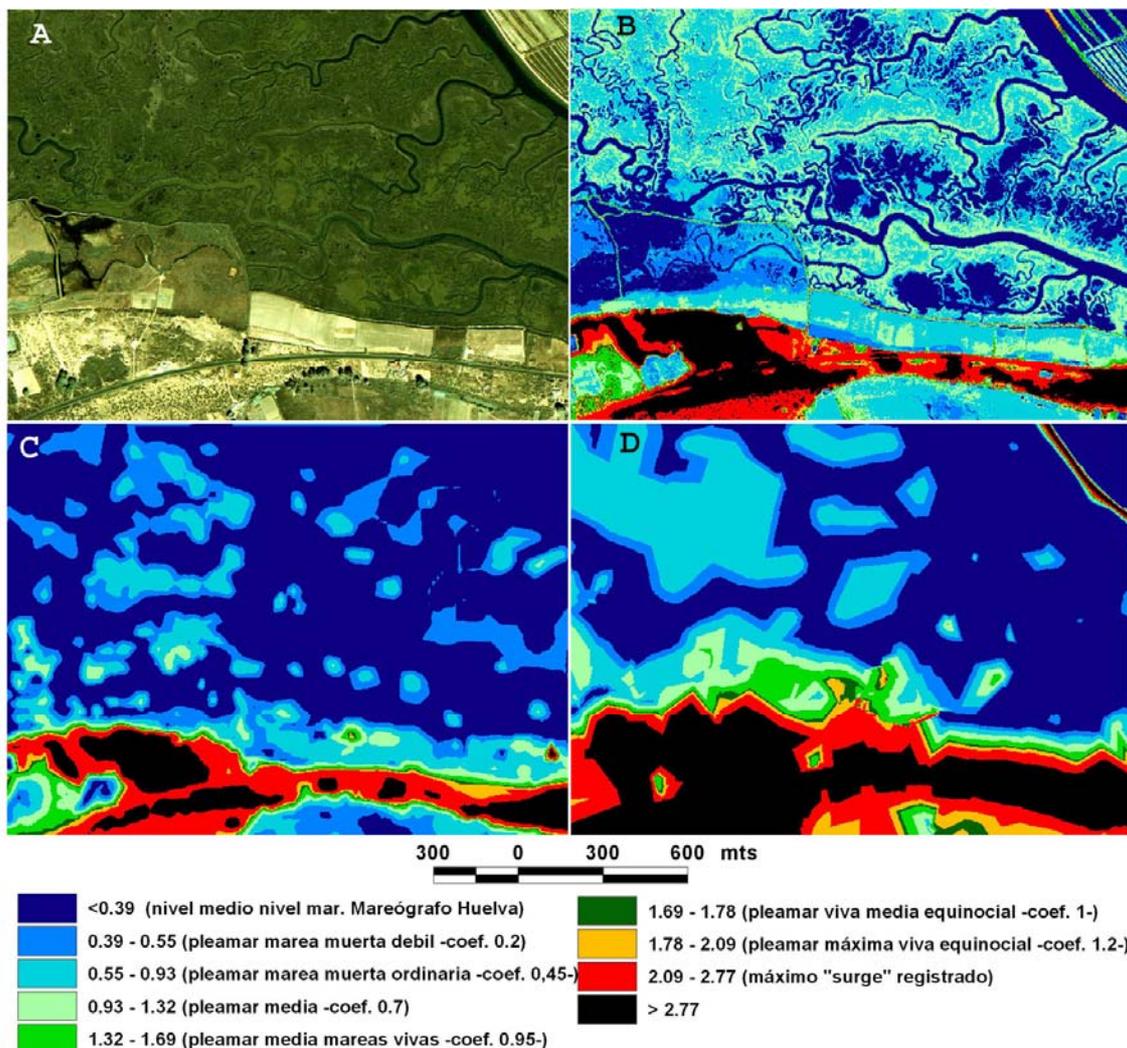


Figura 4. Proyección de los niveles críticos mareales y "surge" sobre los MDTs utilizados: A: ortofoto de Andalucía 2004; B: MDT_lidar ; C: MDT_JUNTA –estereocorrelación digital; D: MDT_GUADI, restitución curvas, cotas y líneas de estructura 3D.

Fte: Elaboración propia.

- Sin duda, el Lidar constituye la mejor fuente de información, al día de hoy, para los objetivos de este epígrafe. Los niveles críticos mareales (pleamares con diferentes coeficientes de marea) proyectados reflejan con precisión la distribución espacial de las diferentes formaciones vegetales, identificándose a su vez los principales rasgos geomorfológicos de la marisma mareal : caños, esteros, levées, límites de planicies mareales, pozas hipersalinas, etc... Aunque hemos utilizado el MDT_Lidar, al que se le ha filtrado la vegetación, el algoritmo utilizado no es suficientemente eficiente para la vegetación halófila debido a su densidad en relación con el tamaño del "foot print" del sensor utilizado. Por ello, el MDT_Lidar es una combinación de la topografía subyacente en los espacios sin vegetación, la superficie de agua en las diferentes pozas hipersalinas y caños en el momento de adquisición y las superficies generadas por las formaciones vegetales halófilas.
- El MDT por estereocorrelación y MDT por restitución no son capaces de caracterizar adecuadamente la estructura morfométrica de las marismas,

perdiéndose la red canales, levées, pozas, etc , a la vez que minimizan los valores altimétricos, ya que en su mayor parte son inundados con el nivel medio del mareógrafo de Huelva (0.38 m sobre el “0” de Alicante). El MDT por restitución distorsiona aún mas la caracterización morfométrica al no poseer la información de partida una distribución regular y utilizar un TIN para la generación del MDT. Por otra parte, el MDT por estereocorrelación digital (malla de puntos 10x10), aunque minimiza igualmente los valores altimétricos en los espacios marismenos, tiene una mayor precisión en la delimitación del contacto marisma mareal/formaciones arenosas representado por el nivel mareal de la pleamar máxima equinoccial (sector meridional de la imagen).

5.2.2- Utilidad de cara a la cartografía de riesgos de inundación

La intención de incluir este epígrafe se debe, como se dijo en la introducción, a ser consideradas las marismas mareales como uno de los espacios de mayor peligrosidad potencial ante una previsible subida del nivel del mar ligada al calentamiento terrestre. Independientemente de lo anterior, en cualquier proceso de inundación, muy particularmente en espacios de marismas mareales, es esencial una adecuada caracterización de la altimétrica (correcta caracterización de caños, levées, etc...). Adicionalmente, en estos espacios una subida del nivel del mar conllevaría el desplazamiento altimétrico de los niveles críticos de la marea con el consiguiente impacto en la distribución espacial de las formaciones vegetales halófilas que las caracterizan al controlar el hidropereodo (Márquez, J, 1994). Por otra parte, en espacios marismenos muy antropizados como el que nos ocupa, la presencia de infraestructuras es vital ya que, por una parte constituyen obstáculos al proceso de inundación marina y, por otra, pueden ser dañados por la misma, por lo que deben ser incorporados en la evaluación del riesgo (peligrosidad + vulnerabilidad). Por lo tanto, la adecuada caracterización altimétrica de las mismas es, igualmente, crítica para la adecuada evaluación del riesgo. En la figura 4 se ha seleccionado un sector con presencia masiva de infraestructuras y se ha procedido a proyectar sobre los tres MDTs los niveles críticos y el nivel de marea máximo registrado (componente mareal + “storm surge”). Dado que no conocemos la posible permeabilidad de las infraestructuras (drenajes, puentes, etc...), no se ha simulado la inundación para esos niveles, sino que solo se han seleccionado los rangos altimétricos de los niveles marinos utilizados y se les ha simbolizado con diferente color. De cualquier forma, los resultados son concluyentes y se pueden extraer las siguientes consideraciones:

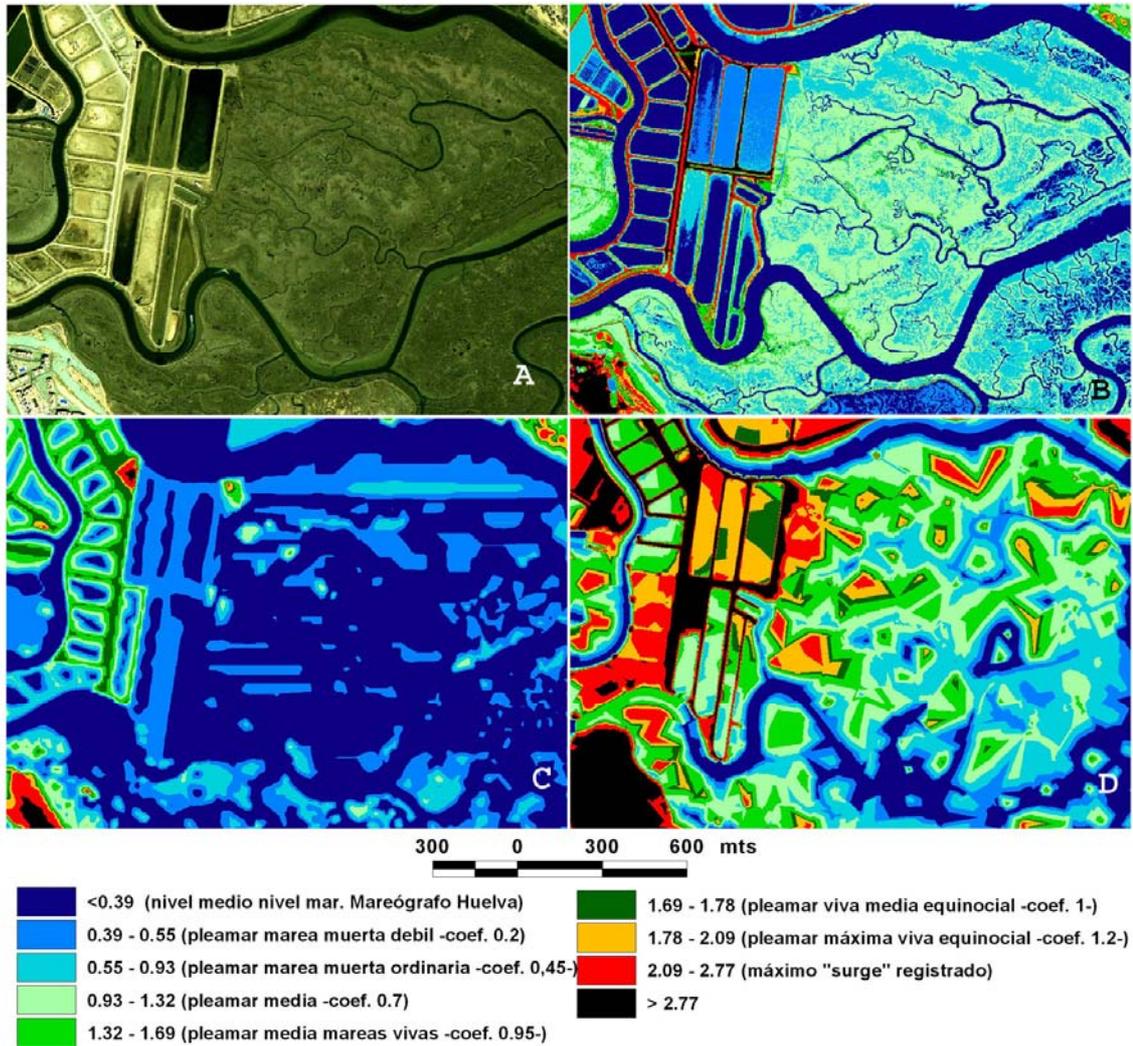


Figura 5. Proyección de los niveles críticos mareales y "surge" sobre los MDTs utilizados: A: ortofoto de Andalucía 2004; B: MDT_lidar ; C: MDT_JUNTA –estereocorrelación digital; D; MDT_GUADI, restitución curvas, cotas y líneas de estructura 3D.

Fte: Elaboración propia.

- Para las zonas de marismas mareales funcionales en el área representada en esta figura se mantienen todas las consideraciones hechas en el epígrafe anterior (la mayor precisión del MDT Lidar) si bien, al recoger la presencia de caños mareales de mayor entidad, la representación espacial de éstos (al utilizar líneas de estructura) queda mejor reflejada en el MDT por restitución que en el MDT por estereocorrelación, aunque sobrevalora algunos sectores de los espacios marismeños.
- En relación a las infraestructuras (salinas y explotaciones acuícolas), éstas quedan perfectamente reflejadas en el DTM_Lidar, tanto en altimetría como en su dimensión espacial (comparar con la ortofoto). El MDT por estereocorrelación nos proporciona una correcta distribución espacial de las de mayor tamaño y mas difusa de las que están limitadas por diques de menos entidad. De cualquier forma, existe una infravaloración de la altimetría y los procesos de interpolación que conlleva el paso de malla de 10x10 mts exageran su superficie. En el caso del MDT por restitución, en teoría, debería

proporcionar una correcta representación geométrica, ya que fueron incorporadas como líneas de estructura. Esto es cierto en la mayoría de los casos y, aunque de forma general están sobrevaloradas altimétricamente en relación al lidar, su representación espacial no es correcta en otros sectores por dos causas: (i) no se han incorporado todos los diques y, en algunos casos, solo se ha incorporado como línea de estructura su nivel superior (lo correcto es incorporar las líneas que las definen superficialmente y las líneas de ruptura que representan el contacto de su base con los recintos de salinas o marismas funcionales); (ii) la estructura TIN, y su algoritmo de generación de triángulos, establece vértices indeseados que provocan la ampliación de su superficie y/o la presencia de triángulos con un declive irreal entre estas infraestructuras y cotas o líneas próximas.

6. CONCLUSIONES.

- La primera conclusión, que es extensible a todos los aspectos tratados, es constatar la magnífica calidad de los datos Lidar para los objetivos definidos.
- En relación al análisis de las diferencias altimétricas entre los MDTs es necesario subrayar la poca información que aportan algunos estadísticos clásicos (error medio cuadrático, error medio, etc..) cuando se aplican a la evaluación de superficies como las marismas mareales. En estos espacios las diferencias altimétricas reales son mínimas (4 metros como máximo) por lo que los errores obtenidos proporcionan valores que podrían ser considerados como válidos para muchos otros espacios. Por otra parte, cuando los datos originales proceden de la restitución, es común asignar el valor "0" a los límites de canales y esteros de forma sistemática y, a veces, imprecisa. En este sentido, el análisis de la distribución espacial del error constituye un procedimiento que permite una mas acertada valoración de la calidad del MDT de cara a los objetivos de esta comunicación (caracterización morfométrica y riesgos de inundación).
- En relación a la representación morfométrica de las superficies intramareales de los espacios marismeños por el MDT_Lidar, los resultados se ajustan a lo esperable a tenor de las referencias existentes (Morris, JM et alia, 2005). Sin duda, esta fuente de información es la de mayor precisión para su caracterización morfométrica, tanto en su dimensión espacial como altimétrica. Ha proporcionado unos resultados excelentes y es capaz de recoger toda la variabilidad morfológica de estos espacios (caños, esteros, levées, pozas hipersalinas, etc...). Incluso en el caso de no ser capaz de filtrar la presencia de vegetación densa, su altísima resolución espacial y su precisión altimétrica, erigen a este sensor en una herramienta esencial de cara al futuro, tanto para la caracterización morfométrica de las marismas mareales, como para la simulación y evaluación de los riesgos de inundación.
- En relación a los MDTs generados a partir de fotografía aérea (estereocorrelación y restitución), los resultados proporcionan una valoración mas deficiente, sobre todo en su estructura espacial. Sin embargo, tienen a su favor el constituir una fuente de información "reutilizable", es decir, podríamos realizar la extracción de datos altimétricos de nuevo, intentando subsanar

algunos errores detectados (reducir el paso de malla e incrementar la edición manual para la estereocorrelación o digitalizar correctamente las líneas de estructura y densificar curvas y cotas para la restitución). Además constituye la única fuente de información (fig. 6) de carácter retrospectivo (podemos aplicarla a vuelos fotogramétricos de fechas anteriores). En ausencia de Lidar, hay que extremar la precaución y tener claro la finalidad de lo que se está restituyendo.

- Por todo ello, consideramos que el Lidar constituye la mejor fuente de información para la caracterización morfométrica para la zona de estudio, e insustituible para la evaluación de los riesgos de inundación. Los resultados obtenidos avalan esta afirmación y, adicionalmente, proporcionan un conjunto de datos de cuyo tratamiento futuro esperamos caracterizar más específicamente la vegetación (DMS/DTM), utilizándolo en combinación con la información multispectral proporcionada por sensores espaciales de alta resolución (QuickBird). Por otra parte, al caracterizar con precisión las superficies de agua (Fig. 6) y, ser estas variables debido a la propagación progresiva de la onda mareal -especialmente en la red de caños y esteros sometidos a la misma-, también esperamos obtener datos de interés para ser utilizados como “verdad terreno” y poder testar modelos numéricos de simulación de la onda mareal.

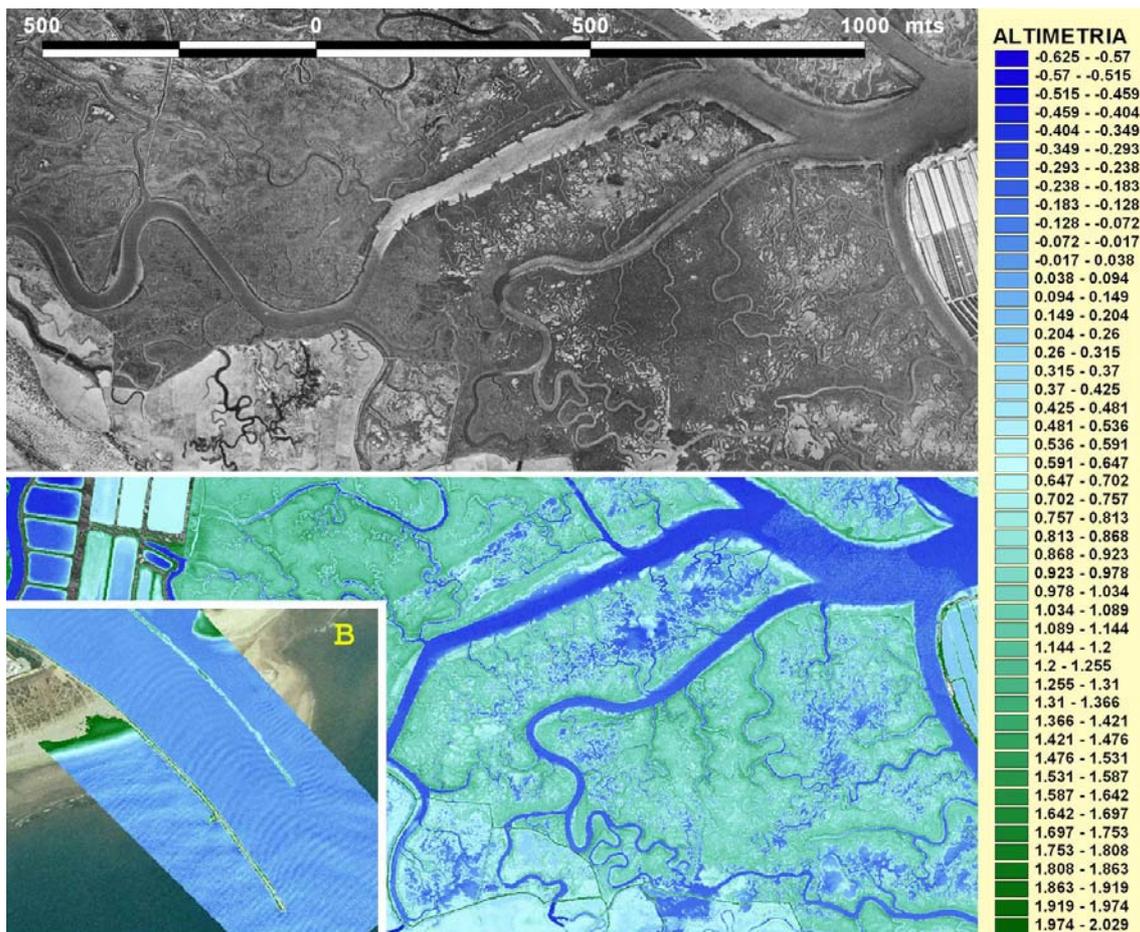


Figura. 6. Imagen rectificada del vuelo fotogramétrico de 1956 (“vuelo americano”) y MDT_Lidar para un sector de la zona intramareal. B: Detalle del MDT -Diques de acceso

al puerto de Isla Cristina- donde se puede observar el oleaje de fondo –swell-, el oleaje de viento -sea- y los procesos de refracción y difracción del mismo.

Fte: Elaboración propia.

BIBLIOGRAFIA.

Intergovernmental Panel on Climate Change –IPCC- (2001): *The scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge.

Fraile, P., (2005): *Niveles medios y máximos del mar en los mareógrafos del litoral andaluz*, Memoria de Investigación, Universidad de Sevilla.

Junta de Andalucía (2005): *Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Relieve y Orografía*. DVD editado por Junta de Andalucía, Sevilla.

Márquez Pérez, J. (1994): *Evaluación del impacto producido por una subida del nivel del mar en el área costera de las "Marismas del Odiel", (Huelva)*. Trabajo investigación del Programa de Doctorado (tesina). Universidad de Sevilla

Ministerio de Medio Ambiente -MMA-, (2005): *Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, Ministerio de Medio Ambiente.

Morris, JM et alia (2005): “Integrated LIDAR Elevation Data, Multispectral imagery and neural network modelling for marsh characterization”. **International Remote Sensing**. Preview article. Taylor and Francis.

Ojeda Zújar, J. y Marquez Pérez, J (1997) :“Modelos digitales de elevaciones (MDE) para la caracterización altimétrica de espacios marismesños: las marismas del Odiel (Huelva, España)”. **Revista de la Sociedad Geológica de España**, 10 (1-2): 147-161

Titus, J.; Richman, C. (2000), *Maps of Lands Vulnerable to Sea Level Rise: Modeled Elevations along the U.S. Atlantic and Gulf Coasts*, Climate Research.

Pugh, D., (2004), *Changing Sea Levels*, Cambridge University Press.