

# Fotointerpretación aplicada al análisis dinámico de la línea de costa

Laura Del Río Rodríguez y Fco. Javier Gracia Prieto

*Dpto. de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real. e-mail: Javier.gracia@uca.es*

## 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS

La fotografía aérea constituye una de las herramientas más utilizadas en los estudios de dinámica y evolución costera, debido a la alta resolución de las imágenes, la posibilidad de comparar fotogramas aéreos tomados en la misma zona en distintas fechas (desde al menos la década de 1940), así como su facilidad de uso y el precio relativamente bajo. Las fotografías se toman desde aviones siguiendo bandas o pasadas, con una superposición de alrededor del 25% entre bandas consecutivas y del 60% entre fotografías contiguas. Esto hace que cada porción de terreno sea visible en dos fotografías consecutivas, con vistas tomadas desde puntos ligeramente desplazados. Las dos imágenes resultantes pueden ser entonces observadas mediante un estereoscopio, equipo que ajusta la visión de cada imagen a cada ojo del observador, obteniéndose así una visión tridimensional (estereoscópica) del terreno común a ambas fotografías.

La toma de las fotografías y su representación en un documento bidimensional supone una proyección cónica de la superficie tridimensional del terreno, lo cual introduce una cierta distorsión o desplazamiento hacia el exterior, más acusado en los objetos que tienen mayor desnivel. Por otro lado, los balanceos del avión, sus cambios de altitud o las imperfecciones de la lente fotográfica introducen otras deformaciones adicionales en la imagen que hacen que la escala de ésta varíe de un punto a otro en el fotograma. No obstante, el desplazamiento o deformación radial de un mismo objeto entre dos fotogramas consecutivos, junto con otros datos técnicos de la fotografía, sirven para calcular la altura de un objeto, muy útil para elaborar mapas topográficos.

Para corregir las distorsiones de las fotografías aéreas se realiza una **ortorrectificación o restitución fotogramétrica** de las imágenes, que consiste en corregir las fotografías para transformar la proyección cónica en una proyección cilíndrica ortogonal (en la que los rayos proyectantes paralelos entre sí y perpendiculares al plano de proyección, que es la fotografía). Esta transformación elimina los efectos del desplazamiento del relieve, de la inclinación del avión, etc., haciendo que la fotografía pueda ser utilizada como un mapa; este tipo de fotografías en las que todos los puntos tienen proyección ortogonal se denominan **ortofotografías**. En la actualidad el proceso de restitución es digital y se lleva a cabo mediante programas informáticos específicos. Para ello es necesario disponer de un modelo digital de elevaciones (MDE) detallado de toda la zona de estudio, o bien de un *software* fotogramétrico que permita generar el MDE a partir de los pares estereoscópicos digitales mediante procesos

de estereocorrelación. Asimismo, se requiere disponer de una serie de puntos de apoyo con datos altimétricos para cada fotograma, y de diversa información relativa a la cámara empleada.

## **2. APLICACIONES DE LAS FOTOGRAFÍAS AÉREAS EN DINÁMICA LITORAL**

Las aplicaciones de las fotografías aéreas en estudios litorales son múltiples. He aquí una pequeña selección:

- Cartografía geomorfológica y ambiental.- La alta resolución de las fotografías y la visión tridimensional del terreno permite diferenciar en detalle no sólo playas, dunas, marismas o acantilados, sino también aspectos más específicos como tipo y densidad de la vegetación, morfología dunar, perfil del acantilado, escalonamiento de niveles morfosedimentarios en marismas y estuarios, etc. El análisis estereoscópico de fotografías aéreas verticales resulta de gran utilidad para investigar con detalle estas formas, de donde se deriva la elaboración de mapas geomorfológicos, de vegetación, de usos del terreno, etc.
- Estudio de procesos físicos litorales.- En las fotografías aéreas costeras a menudo se pueden reconocer los frentes de oleaje, su distribución en distintas familias, su deformación por procesos de refracción, etc., muy útiles para el análisis dinámico del oleaje en zonas costeras. Además, es frecuente vislumbrar elementos de dinámica sedimentaria como barras sumergidas próximas a la costa, nubes de sedimento asociadas a desembocaduras fluviales, cuyo seguimiento permite deducir direcciones de corrientes litorales, sentido de la deriva litoral dominante, etc.
- Las escalas a las que se toman las fotografías aéreas (habitualmente entre 1:10.000 y 1:40.000) permiten evaluar con facilidad los efectos de las estructuras costeras (diques, espigones, rompeolas, etc.), por simple comparación entre fotografías tomadas antes y después de la ejecución de las obras.
- Las fotografías pueden utilizarse para realizar mediciones sobre las imágenes. Pueden medirse distancias con una buena precisión a partir de ortofotografías, o bien pueden usarse imágenes estereoscópicas para determinar alturas; dependiendo de la sofisticación del equipo de observación, los errores en la determinación de estas variables pueden llegar a ser muy pequeños.
- La comparación entre fotografías aéreas de distintos años permite observar la evolución de la línea de costa. Esta es una de las aplicaciones más valiosas de las fotos aéreas en dinámica litoral, ya que otro tipo de fuentes de información, como mapas o imágenes de satélite no permiten generalmente una resolución espacial y/o temporal suficiente para identificar líneas de costa de manera tan precisa y fiable.

### 3. CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA

En primer lugar hay que definir qué se entiende por línea de costa en la fotografía aérea, lo cual no es en absoluto inmediato. El contacto mar-tierra, cuya expresión más inmediata sería el nivel del mar instantáneo en el momento en que se toma la fotografía, es extremadamente cambiante y dinámico y está sujeto a oscilaciones de muy diversa naturaleza (cambios a escala de segundos debidos al vaivén del oleaje, cambios horarios debidos a la marea, cambios diarios debidos a las condiciones meteorológicas, cambios mensuales debidos a las variaciones del perfil de playa, etc). Por todo ello, generalmente se hace necesario emplear un indicador de la posición de la línea de costa (*shoreline proxy*) que refleje adecuadamente las tendencias del litoral, y que garantice que sus posibles variaciones son consecuencia de cambios costeros reales. Las características geomorfológicas locales influyen mucho en la elección del *proxy* idóneo para una determinada zona. En este sentido, existe una gran variedad de elementos que han sido empleados como indicadores de la línea de costa: escalón de playa, línea de *runup* del oleaje, línea de pleamares, escarpe erosivo, cresta de la berma, línea de vegetación estable, pie o cresta de duna, pie o borde superior del acantilado, etc.

El indicador más empleado para aproximar la posición de la línea de costa sobre fotografías aéreas es la **línea de pleamares**, considerada como equivalente al alcance medio de la pleamar sobre la playa e identificable por el cambio de tono que corresponde a la huella dejada en el sedimento por la pleamar anterior a la toma de la fotografía (consultable en anuarios de marea), llamada *marca de agua*. No obstante, el asumir la posición de la marca de agua como equivalente a la línea de pleamares medias presenta limitaciones, como la sobreelevación por tormentas, por representar en realidad la suma de la pleamar y el efecto del ascenso de las rompientes sobre el frente de playa (*runup*), por el efecto de la pendiente de la playa, que varía a lo largo del año, etc. En ocasiones la marca de agua correspondiente a la última pleamar apenas es apreciable, y el elemento que destaca es el *runup* del oleaje más reciente (Figura 1), aspecto especialmente problemático en playas de baja pendiente intermareal.

A menudo se hace necesario contar con un indicador independiente de la energía del oleaje o de la morfología de la playa. En la práctica, el principal elemento que cumple estos requisitos, y por tanto el más adecuado para estudios sobre variaciones costeras, es el **pie de duna**, muy utilizado para este fin (Ojeda et al., 2002). Para su identificación sobre una fotografía aérea, el pie de duna se suele considerar como la línea de contacto entre la parte alta de la playa (*backshore*) y la duna primaria (*foredune*), representando la transición entre los ambientes dominados por el oleaje y los dominados por el viento. A menudo este límite se establece según la vegetación dunar, por lo que se describe como la línea de vegetación estable o el límite hacia mar de la vegetación de la duna primaria, la cual presenta de por sí una gran variabilidad. Un aspecto importante del uso del pie de duna como *shoreline proxy* es el de su

alta representatividad para reflejar los procesos de erosión o acreción costera a diferentes escalas temporales.

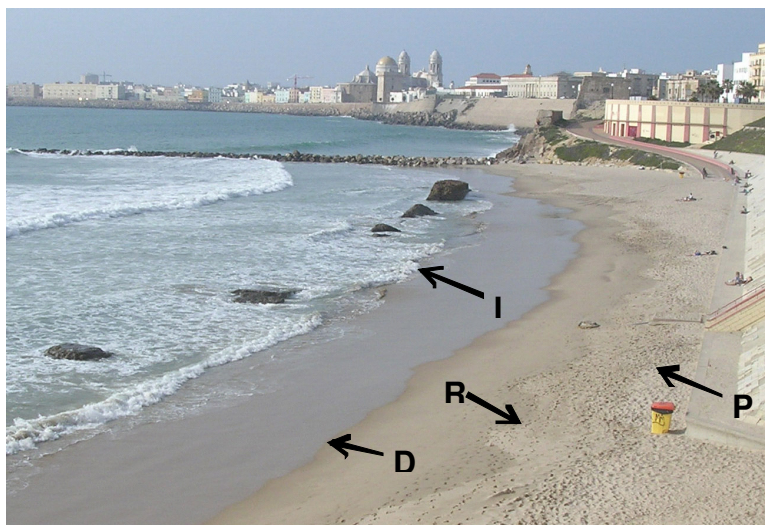


Figura 1. Marca de agua dejada por la última pleamar (P) y línea de *runup* actual (R) en la playa de Santa María del Mar (Cádiz). Otras líneas observables en una fotografía aérea serían el límite del drenaje del *backwash* (D) y el nivel del mar instantáneo (I). (Del Río, 2007)

En **costas acantiladas** la evaluación de los cambios costeros se suele realizar a partir de distintos elementos morfológicos como el borde superior en el caso de escarpes verticales, y la base en el caso de acantilados de baja pendiente, con el borde redondeado o con alta ocupación antrópica o abundante vegetación, donde no es posible delimitar el borde superior. A diferencia de la base del acantilado, el borde superior presenta el inconveniente de que para su identificación es imprescindible apreciar el relieve de la zona, por lo que es necesario emplear pares estereoscópicos. Por otro lado, la naturaleza de los acantilados hace que únicamente puedan registrar retroceso, excepto en el caso de avances relativos de la base por acumulación de materiales por deslizamientos o caídas de bloques.

Si se parte de fotografías aéreas georreferenciadas, y una vez obtenidas las líneas de costa de las distintas fechas, y tras la digitalización de los indicadores elegidos, la comparación entre ellas y la cuantificación de las tasas de cambio se lleva a cabo mediante herramientas SIG (Ojeda et al., 2002). El procedimiento consiste en definir una línea base fija paralela a la costa y posteriormente trazar una serie de transeptos perpendiculares que cortan a las líneas de costa, separados entre sí una cierta distancia, que se fija en función de las características morfológicas de la zona y la resolución requerida en el estudio. Las intersecciones de los transeptos con las líneas de costa se emplean para cuantificar a lo largo de cada transepto la distancia entre la línea base y las posiciones de la línea de costa en las distintas fechas. Existen programas informáticos que automatizan todo el proceso (como por ejemplo el *Digital Shoreline Analysis System DSAS 2.2.1*, desarrollado por el Servicio Geológico de los EEUU; Thieler et al., 2003).

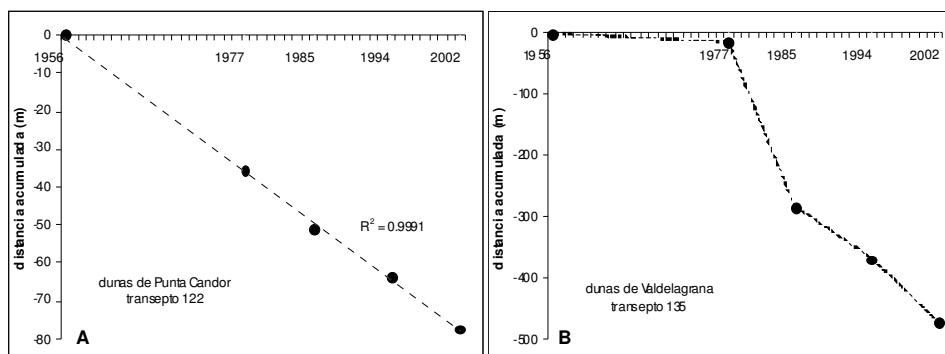


Fig. 2. Ejemplos de los contrastes existentes en los ritmos de erosión del pie de duna en distintos tramos de la costa gaditana. A) Tasas de cambio constantes. B) Tasas extremadamente variables (Del Río, 2007).

La representación de los datos obtenidos permite obtener una idea cuantitativa bastante aproximada de las variaciones de la línea de costa. Estas variaciones pueden ser lineales, mostrando una tendencia de variación continua asociada a causas que actúan a medio y largo plazo (Figura 2A), o bien pueden ser muy variables e irregulares, asociadas a intervenciones antrópicas puntuales, eventos energéticos aislados, etc. (Figura 2B). Para el primer caso es posible obtener un ritmo medio o tasa de variación de la línea de costa, mientras que el segundo caso requiere de un estudio específico de relaciones causa-efecto. Para calcular las tasas de variación de la línea de costa a partir de los datos obtenidos se aplican diversos métodos estadísticos, como la tasa de punto final, la media de las tasas, la tasa de regresión lineal, o la tasa de *jackknife* (Dolan et al., 1991; Morton et al., 2004; Genz et al., 2007):

- La **tasa de punto final** (*end-point rate*) consiste en considerar únicamente la línea de costa más antigua y la más reciente, y dividir la distancia entre ellas por el número de años transcurridos. Se trata del método más sencillo, ampliamente utilizado en los estudios costeros tradicionales, aunque tiene la desventaja de no incluir la información de las líneas de costa intermedias.
- La **media de las tasas** (*average of rates*) consiste en calcular una tasa de punto final para cada par de datos disponible, y promediar todas las tasas resultantes. Este método tiene las ventajas de considerar toda la información existente y de ser sensible a cambios sustanciales en la tendencia evolutiva, por lo que en cierta medida filtra la variabilidad a corto plazo.
- Para calcular la **tasa de regresión lineal** (*linear regression rate*) se realiza un ajuste de todos los datos, calculando una recta de regresión cuya pendiente representa la tasa de variación. Las principales ventajas de este método son la utilización de todos los datos, su sencillez de aplicación y la robusta base estadística en la que se apoya, razones por las cuales es el método más utilizado en la actualidad.
- Por último, la **tasa por estimación herramental** (*jackknifing*) consiste en realizar una regresión lineal iterativa, en la que se calculan rectas de ajuste para todas las combinaciones posibles de los datos, dejando fuera un dato distinto cada vez; la media de las pendientes de

las rectas de regresión representa la tasa de cambio. Las ventajas del método son similares a las de la regresión lineal, además de verse menos afectado por los valores atípicos.

- Por otro lado, cuando se emplea la fotogrametría aérea digital para evaluar las variaciones de la línea de costa, existen diversas fuentes de error que deben ser tomadas en consideración (Morton et al., 2004):
- Errores relacionados con el modo de adquisición de la fotografía: distorsión de la lente de la cámara, relieve del terreno, variaciones de altitud del avión y balanceos del mismo.
- Errores relacionados con las técnicas de procesado de la imagen: pérdida de resolución por el escaneado del fotograma y errores derivados del proceso de georreferenciación del mismo.
- Errores relacionados con elementos sobre el terreno que causan variabilidad costera a corto plazo y/o no relacionada con procesos de erosión o acreción (fotogramas tomados durante un evento de oleaje de gran altura o tras una regeneración artificial, acantilados estabilizados artificialmente, dunas revegetadas, etc.).

La mayoría de estos errores se pueden evitar hasta cierto punto mediante diversos procedimientos. En cualquier caso, siempre existe un cierto grado de incertidumbre en las posiciones de la línea de costa interpretadas y en las tasas de cambio que de ellas se derivan, y es necesario cuantificar o estimar, en la medida de lo posible, dicha incertidumbre, de modo que los resultados de la medición deben siempre incluir los correspondientes rangos de error (Del Río, 2007).

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Del Río, L. (2007). Riesgos de erosión costera en el litoral atlántico gaditano. Tesis Doctoral, Universidad de Cádiz (inédita), 496 pp.
- Dolan, R.; Fenster, M.S. y Holme, S.J. (1991). Temporal análisis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723-744.
- Genz, A.S.; Fletcher, C.H.; Dunn, R.A.; Frazer, L.N. y Rooney, J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawai. *Journal of Coastal Research*, 23(1), 87-105.
- Morton, R.A.; Miller, T.A. y Moore, L.J. (2004). National assessment of shoreline change: Part 1 - Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the US Gulf of Mexico. USGS Open-File Report nº 2004-1043, 45 pp.
- Ojeda, J.; Borgniet, L.; Pérez, A.M. y Loder, J.F. (2002). Monitoring morphological changes along the coast of Huelva (SW Spain) using soft-copy photogrammetry and GIS. *Journal of Coastal Conservation*, 8, 69-76.
- Thieler, E.R.; Martin, D. y Ergul, A. (2003). The Digital Shoreline Analysis System, version 2.0: Shoreline change measurement software extension for ArcView. USGS Open-File Report nº 2003-076.