

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se procede a comentar los resultados que se han obtenido y que han sido representados mediante el uso de tablas y gráficas en el apartado 4 de la tesina.

5.1. Temporales

Con el estudio del número de temporales para cada año que sobrepasan cada uno de los umbrales establecidos, se puede observar la evolución del número de temporales con el tiempo, pudiendo estudiar así el clima extremal en la zona, determinando de esta manera, si los temporales acostumbran a tener alturas importantes, o si por el contrario, tienden a ser de poca altura.

ROSES

En la gráfica 1, que corresponde a la boya de Roses y en la que se representa el número de temporales por año y altura umbral, se ve, como era de esperar, que el grupo más numeroso es el que engloba a todos los temporales, el de altura de ola mínima de 150cm.

En los años 1992, 1994, 1996 y 1997 la proporción de olas de altura mayor de 200cm es muy importante, ya que solo hay 1 o 2 temporales comprendidos entre 150 y 200. En estos mismos años, exceptuando el 1994, la proporción de temporales mayores de 250 también es importante. La importancia no radica en el número de temporales, ya que en el 1997 solo hay 2, sino en el porcentaje que representa respecto los temporales mayores de 150; esto significa que gran número de los temporales que se produjeron en esos años eran con olas de gran altura. En el 1994 la importancia de los temporales de ola mayor de 250 disminuye.

Los años 1993, 1995 y 2002 son los que tienen mayor número de temporales de altura mínima de 150: 17, 12 y 12 temporales respectivamente. En el 1993 hay mucha diferencia entre los temporales de 150 y los otros, es decir, la mayoría de los temporales son de poca altura, menores de 200. En los otros dos años las diferencias se acortan, aunque siguen siendo grandes, más o menos del orden de la mitad. Hay que destacar que en el 1995 y 2002 hay poca diferencia entre las de 200 y las de 250; esto representa que cuando los temporales sobrepasan el umbral de 200, la mayoría también sobrepasa el de 250. Esto también sucede en el 2001 donde el número de temporales mayores de 200 es igual al número de temporales mayores de 250.

Hay que comentar el caso del año 2000, en el que solo se producen 3 temporales con alturas comprendidas entre 150 y 200. Estos valores no son del todo significativos, ya que faltan datos de los meses de invierno y principios de primavera, meses proclives a que haya gran número de temporales, muchos de los cuales son de gran magnitud.

Con los resultados hallados se puede obtener una idea del clima extremal de la zona. Se producen una media de 8,9 temporales al año, de los cuales 4,7 son mayores de 200cm de altura y de éstos, 2,9 son mayores de 250cm. Esto representa una media al año de 4,2 temporales con altura de ola comprendida entre 150 y 200cm, de 1,8 temporales entre

200 y 250cm y de 2,9 temporales con altura mayor de 250cm. En general y para resumir se puede decir que en la zona del golfo de Roses se producen pocos temporales pero con alturas importantes.

Hay que mencionar que la boya de Roses no registra un gran número de temporales, debido probablemente a que la boya esta ubicada en el golfo, quedando a resguardo de los temporales procedentes del N (Tramontana). En cambio la boya queda expuesta a los temporales procedentes del NEE (Levante), que son los que producen las alturas de ola elevadas.

En la tabla 3 de duraciones de los temporales según el umbral, se puede observar que a medida que aumenta el umbral de altura de ola, las duraciones máximas y las medias disminuyen. Estas observaciones eran de esperar ya que el temporal asciende hasta llegar al máximo para seguidamente descender formando un ángulo que tiene por vértice el máximo. Si se corta por 3 líneas paralelas entra ellas (cada una representa un umbral de Hs), cuanto más cerca del vértice se corte, menor será la longitud de la línea intersectada, que representa la duración del temporal para cada umbral. De este modo, el mismo temporal (con el mismo máximo) tendrá una duración menor a medida que el umbral de altura de ola sea mayor. Por este motivo la duración máxima disminuye y la media también.

BLANES

En la gráfica 2, correspondiente a la boya de Blanes, se observa una gran diferencia en el número de temporales entre los años anteriores al 1991 y los posteriores. En los años 1984 y 1989 no se produce ningún temporal. Hay que decir que en estos dos años faltan datos de los meses de invierno, donde habitualmente se producen gran número de temporales, siendo muchos de ellos de cierta importancia. Así pues estos valores no son del todo fiables.

En el 1985 y 1990 solo se produce 1 temporal con altura de ola comprendida entre 150 y 200cm. En el caso del 1985 también se puede explicar esta situación por una falta de datos en los meses de invierno, mientras que en el 1990 solo falta el mes de Octubre, por lo tanto se puede considerar un año poco tormentoso.

En los años 1986, 1987 y 1988 el número de temporales sigue siendo reducido pero hay una proporción de olas mayores de 200cm muy importante, sobretodo en el 1987 donde todos los temporales que se producen sobrepasan este valor.

En los años posteriores al 1990 el grupo más numeroso es el que engloba a todos los temporales. Solo en los años 1992, 1994, 1997 y 2002 se hace importante la proporción de olas con altura mayor de 200cm. Y el grupo de temporales con olas mayores a 250cm solo adquiere cierta importancia en los años 1992, 1996, 2001 y 2002.

En general se puede establecer una diferencia en el clima extremal de la zona entre los años anteriores al 1991, donde se producen pocos temporales pero con una altura de ola elevada, y los años posteriores, donde el número de temporales aumenta, pero que tienden a ser de poca altura.

En la tabla 4 se observa como las duraciones máximas y medias siguen el mismo patrón que para la boya de Roses. En este caso la duración máxima para los temporales con altura superior a 150cm es superior que para la de Roses, pero en cambio la media es inferior. En el caso de los temporales con altura superior a 250cm, la duración máxima de Blanes es inferior a la de Roses, y la media también. Las duraciones mínimas para todos los umbrales son bastante similares en las dos boyas.

LLOBREGAT

De la gráfica 3, que corresponde a la boya del Llobregat, se extraen que en general el grupo más numeroso es el de altura de ola mayor de 150cm. Solo en los años 1986, 1988, 1991 y 2002 hay una proporción importante de temporales con altura de ola superior a 200cm.

En los años 1984 y 1985 todos los temporales registrados por la boya tienen una altura de ola inferior a 200cm. Hay que destacar que en el 1984 faltan datos de los meses de invierno y en el 1985 de los de otoño, y que por lo tanto puede que los temporales importantes no hayan sido registrados.

En general se puede decir que el clima extremal en la zona del delta del Llobregat se caracteriza porque se producen temporales de poca altura. De media se producen 12,6 temporales al año, de los cuales 4 son mayores de 200cm y solo 1,7 son mayores de 250cm. Esto representa como media al año 8,5 temporales con alturas de ola entre 150 y 200cm, 2,4 temporales entre 200 y 250cm y solo 1,7 temporales con alturas superiores a 250cm. Es un clima caracterizado por la poca altura de ola de sus temporales, parecido al de Blanes, y en contraste con el de Roses, en el que hay un importante número de temporales de ola alta. Más pruebas de esta diferencia se encuentran si se estudian solamente los años comunes a las tres boyas (a partir del 1992), y se calcula, respecto al total, el porcentaje de temporales con altura de ola superior a 200cm, que para Roses es del 70,0%, para Blanes del 64,8% y para Llobregat del 52,3% y el porcentaje de temporales superiores a 500cm para Roses es del 2,5%, para Blanes del 0,6% y para Llobregat del 0,5%.

Si estudiamos la tabla 5, se observa que igual que en los casos anteriores y como era de esperar, las duraciones máxima y media disminuyen a medida que se aumenta el umbral. Los temporales con altura de ola superior a 250cm tienden a ser cortos, pues su duración media es de poco más de medio día.

La duración máxima de los temporales mayores de 150cm para la boya del Llobregat es la más alta de todas (4,4 días), seguida muy de cerca por la de Blanes (4,33 días); por el contrario la de Roses está más alejada (3,52 días). Las duraciones mínimas para cualquier umbral son similares en las tres boyas. En cuanto a las duraciones medias, las más bajas son para la boya del Llobregat para los umbrales de 150 y 250cm, y para el umbral de 200cm la más baja es para Blanes seguida muy de cerca por la del Llobregat.

En el anejo número 2 se recogen los datos de los temporales de cada una de las boyas. Estos datos se componen de la fecha y hora de inicio y final del temporal, la duración del mismo, la altura de ola media y la máxima (los máximos utilizados en la tesina) y el

periodo medio y máximo. Las filas sombreadas corresponden a los temporales independientes, de los que se obtienen los máximos.

5.2. Máximos de temporal

Los máximos de temporal son los datos con los que se lleva a cabo la caracterización del clima extremal. Así mismo estos datos se ajustarán a las funciones de distribución. En el apartado anterior se han analizado todos los temporales que fueron registrados por las boyas y que superaron los diferentes umbrales que se han establecido. En este apartado solo se hace referencia a los máximos independientes (sin correlación entre ellos).

En las tablas 6, 7 y 8 se observan algunos valores estadísticos de los máximos. La boya de Roses es de la que se dispone de menos datos puesto que fue la que se instaló más tarde y por lo tanto tiene menor número de años de registro.

El temporal con la máxima altura de ola se produce en Roses, a bastante distancia (casi a 1m) de Blanes y Llobregat que son similares. Esto era de esperar a partir del estudio de los temporales realizado en el apartado anterior, donde en la zona de Roses el porcentaje de olas con altura elevada era superior que en la zona de Blanes y del Llobregat. Por el contrario los valores mínimos son parecidos en las tres boyas. La boya del Llobregat tiene las alturas medias más pequeñas para los tres umbrales y Roses las más altas, puesto que los máximos son mayores y los mínimos similares.

5.3. Bondad de ajuste

Con el test de bondad de ajuste se decide cual es la distribución que mejor se ajusta a los datos a partir del índice de verosimilitud. Para cada boya el índice varía según el umbral, puesto que varían los datos a estudiar, así que se obtiene una gráfica comparando los índices de las diferentes funciones y métodos de ajuste, para cada umbral en cada boya. Las gráficas que muestran los índices van de la 4 a la 12.

ROSES

Si estudiamos la boya de Roses para el umbral de 150cm (gráfica 4), se observa que en general la función de Weibull es la que cuenta con los índices más elevados, a excepción del caso del método de los momentos que no pasa el test. La función de Gumbel es la que en general tiene los índices más bajos, y la de Frechet está en una posición intermedia, excepto para el ajuste del método de los momentos que tiene un valor inferior a algunos ajustes de la función de Gumbel.

Dentro de la función de Weibull el ajuste con mayor índice es el de mínimos cuadrados con la fórmula de Weibull, con un valor de 9,575. El valor del índice más elevado para la función de Gumbel es 4,437 y para la de Frechet 6,985, ambos bastante lejos del valor de la Weibull. El segundo índice mayor también pertenece a la función de Weibull con el ajuste de mínimos cuadrados, pero en este caso con la fórmula de Goda, y tiene un valor de 8,541.

Para el umbral de 200cm (gráfica 5) no hay mucha diferencia entre Weibull y Gumbel. La función de Gumbel es más constante, todos los índices tienen un valor aproximado de 7, excepto el método de mínimos cuadrados con la fórmula de Gringorten que solo llega al 4,459. Por el contrario en la función de Weibull hay más variación y además cuenta con los dos índices más elevados de toda la gráfica, que están alrededor del 8,5; para el método de los momentos y el de mínimos cuadrados con la fórmula de Weibull los valores disminuyen hasta 3,8 y 5,7 respectivamente. En este caso la función de Frechet cuenta con los valores más bajos, donde dos de los tres ajustes que tiene no pasan el test.

Así pues para este umbral la función que mejor se ajusta es la de Weibull con el método de mínimos cuadrados con la fórmula de Petrauskas y Aagard con 8,587, seguida muy de cerca por la fórmula de Goda (también para la función de Weibull) con 8,562.

Para el umbral de 250cm (gráfica 6) Frechet tiene dos índices elevados, entre ellos el máximo de toda la gráfica, con un valor de 9,49 para el método de mínimos cuadrados con la fórmula de Goda y Onozawa. Hay que comentar también que Frechet cuenta con el único valor que no pasa el test, que es para el método de los momentos. El siguiente grupo con los índices más elevados es para la función de Gumbel, con un índice, el de mínimos cuadrados con la fórmula de Gringorten, muy cercano al máximo de Frechet, con un valor de 9,387. La función de Weibull también tiene un índice elevado de 8 para mínimos cuadrados con Weibull, pero tiene dos valores bajos, cercanos a 4, para el método de los momentos y máxima verosimilitud.

BLANES

Para la boya de Blanes y el umbral de 150cm (gráfica 7), la función de Weibull es la que dispone de los índices más elevados, casi todos por encima de 13, entre los que se encuentra el máximo, para el ajuste de mínimos cuadrados con la fórmula de Weibull con un valor de 13,370. El segundo índice más elevado es también para la función de Weibull pero con el ajuste de máxima verosimilitud con un valor de 13,327, muy cercano al primero. Como excepción hay que decir que para el método de los momentos el índice es de 0,28, y no pasa el test. Los índices para las funciones de Frechet y Gumbel son bastante parecidos, la mayoría están entre 6 y 7, excepto en el método de los momentos para la función de Frechet con 0,032 y el método de máxima verosimilitud para la función de Gumbel con 3,353, que ninguno de los dos pasa el test.

Para el umbral de 200 (gráfica 8) la función de Weibull sigue siendo la que cuenta con los índices más elevados, entre los que se encuentra el máximo de 13,074 también para mínimos cuadrados con la fórmula de Weibull. En este caso el método de los momentos también tiene un índice pequeño, de 2,955, y no pasa el test. Gumbel tiene un valor bastante elevado, de 11,5 para mínimos cuadrados con Weibull pero el resto se mantiene entre 5 y 7,5. Por último, Frechet tiene dos valores medios de 4,795 y de 6,585 y el tercer índice es de 0,003, el más bajo de todos y que por supuesto no pasa el test.

Para el umbral de 250cm (gráfica 9) las tres funciones siguen el mismo esquema, tienen los índices para el ajuste con mínimos cuadrados elevados, y los del método de los momentos y máxima verosimilitud bajos. La función de Frechet contiene el máximo con 13,142 para mínimos cuadrados con Goda y Onozawa, y el mínimo con 0,004 para

el método de los momentos, y el otro ajuste con mínimos cuadrados también tiene un índice elevado. Para la función de Gumbel, los dos ajustes con mínimos cuadrados (con las fórmulas de Weibull y Gringorten) tienen índices elevados, de 11,603 y 13,097 respectivamente, siendo este último el segundo índice más elevado de la gráfica, mientras que el método de los momentos y el de máxima verosimilitud cuentan con índices bajos, 4,941 y 4,56 respectivamente. Para Weibull pasa algo similar, los tres ajustes con mínimos cuadrados tienen índices altos entre 9,5 y 10,5 mientras que los ajustes con el método de los momentos y máxima verosimilitud tienen valores de índice bajos, alrededor de 3,5.

LLOBREGAT

Para la boya del Llobregat y el umbral de 150cm (gráfica 10) sucede un hecho curioso, y es que no hay ningún ajuste de Gumbel que pase el test, y todos los valores oscilan entre 2 y 2,7. La función de Weibull es la que cuenta con los índices más elevados para los ajustes de mínimos cuadrados, donde se encuentra el máximo para la fórmula de Goda, con un índice de 12,718. El índice para el ajuste por máxima verosimilitud es solo de 6,437 y el del método de los momentos no pasa el test. Frechet con los dos ajustes por mínimos cuadrados tiene índices elevados, de 10,397 para la fórmula de Weibull y de 8,78 para la Goda y Onozawa, pero para el ajuste por el método de los momentos el índice es de 0, que por supuesto no pasa el test.

Para el umbral de 200cm (gráfica 11) Weibull es la que tiene en general los índices más elevados, excepto para el ajuste del método de los momentos que el índice es de 3,951. Entre el resto se encuentra el máximo que en este caso es para el mismo ajuste que para el umbral anterior, es decir, para el ajuste de mínimos cuadrados con Goda y tiene un valor de 15,542, seguido muy de cerca por el segundo índice que corresponde también a la función de Weibull con el ajuste de mínimos cuadrados y la fórmula de Petrauskas y Aagard con un valor de 15,540. La función de Gumbel en este caso tienen todos los valores medios excepto uno que es elevado, éste último es para el ajuste por mínimos cuadrados con Weibull con un valor de 13,394, el resto oscilan entre 7 y 9. Para la función de Frechet con el ajuste del método de los momentos el índice vale 0 y por supuesto no pasa el test; para los otros ajustes el valor de los índices está entre 6 y 8.

Para el umbral de 250cm (gráfica 12) el máximo es para la función de Gumbel con el ajuste de mínimos cuadrados con la fórmula de Gringorten, con un valor de 15,617. Cabe destacar que todos los ajustes realizados con mínimos cuadrados en las tres funciones de distribución tienen unos índices similares. Solo encontramos dos casos que no pasan el test, y los dos son con el ajuste del método de los momentos, el primero con la función de Frechet y el segundo con la de Weibull.

Para resumir cuales son las funciones y métodos de ajuste que se escogen en cada caso, se estudia la tabla 10 donde se observa que el método de ajuste es el de mínimos cuadrados, independientemente de la función a usar. En las tres boyas, para los umbrales de 150 y 200 es la función de Weibull, en cambio para el umbral de 250 es la función de Gumbel.

En cuanto a los valores del índice, en la boya de Roses y Blanes el más elevado es para el umbral de 150, en cambio para la del Llobregat es para el de 250. Roses es la que

tiene los índices más bajos y Llobregat la que los tiene más altos a excepción del umbral 150 que es mayor en Blanes. Así pues, el índice más elevado es para la boya del Llobregat para el umbral de 250 y con la función de Gumbel y el método de ajuste de mínimos cuadrados con la fórmula de Gringorten, con un valor de 15,617. Por el contrario el índice más bajo es para la boya de Roses para el umbral de 200 y con la función de Weibull y el método de ajuste de mínimos cuadrados con la fórmula de Petruskas y Aagard, con un valor de 8,587.

De las tablas 11, 12 y 13 se puede destacar que en la boya del Llobregat es donde hay más casos en los que no se pasa el test; concretamente para el umbral de 150 hay exactamente 6, para el de 200 hay 1 y para el de 250 hay 2. La boya de Roses solo tiene 2 casos que no cumplen para el umbral de 150, 2 para el de 200 y 1 para el de 250, y la de Blanes 3 para 150, 2 para 200 y 1 para 250. En general es para el umbral de 150 para el que se cumple menos veces el test, porque es donde hay más datos, y a medida que un ajuste se hace con más datos, es más difícil pasar el test ya que las bandas se estrechan. En la boya del Llobregat hay más datos que en el resto de boyas, hecho que en cierta manera explica el aumento del número de casos que no pasan el test.

5.4. Elección del ajuste

Las tablas 14, 15 y 16 contienen las estimas puntuales de las alturas de ola del mejor ajuste para cada umbral. Para poderlos comparar entre sí es más fácil representarlos gráficamente (gráficas 13, 14 y 15).

Para la boya de Roses se observa en todo momento que el ajuste que representa al umbral de 150cm tiene las estimas de altura de ola mayores que los otros dos umbrales. Por el contrario, el umbral de 250cm es el que tienen las estimas más bajas, aunque está bastante igualado con el umbral de 200cm para periodos bajos.

Para la boya de Blanes también es con el umbral de 150cm con el que se obtienen las estimas de altura de ola más elevadas, aunque en este caso hay muy poca diferencia con los otros umbrales, sobretodo para periodos pequeños.

Por el contrario la boya del Llobregat no sigue el mismo patrón que los otras dos. En este caso el umbral que en general produce las mayores estimas de altura de ola es el de 250cm. Hay una excepción, para periodos inferiores a 10 años, que es superado por el umbral de 200cm, pero al ser un periodo corto, no se considera representativo, eligiendo por lo tanto, el umbral de 250cm.

Con todo lo mencionado hasta el momento se puede dar solución a uno de los problemas planteados en esta tesina. En la tabla 17 se observan las funciones de distribución, los métodos de ajuste y los umbrales de altura de ola más adecuados con los que se caracteriza de la forma más representativa posible el clima extremal en cada una de las tres zonas del litoral catalán estudiadas.

5.5. Ajuste de la función

Otro de los objetivos de esta tesina era poder dar el valor de las alturas de ola asociadas a diferentes periodos de retorno. Estas alturas se obtienen tras realizar el ajuste con la función y los datos correspondientes, según el umbral seleccionado. El ajuste proporciona una estima puntual de la altura de ola para cada periodo de retorno dado, y también la estima del periodo de retorno para cada altura de ola dada, pero nos centraremos en las estimas de las alturas de ola, por ser el parámetro más importante en el cálculo de las obras marítimas.

Estos resultados son obtenidos mediante técnicas estadísticas así que el hecho de dar una estima puntual no es correcto, debido a la incertidumbre que la rodea. Para que los resultados se consideren fiables han de estar acompañados de un intervalo de confianza, con una confianza elevada, en este caso del 90%, para tener una cierta seguridad (un 90% de probabilidad) de que la altura real estará dentro de dicho intervalo.

Para la boya de Roses el intervalo de confianza se ha realizado con el método de simulación estadística mediante 2000 iteraciones. Se han descartado los otros métodos por ser incompatibles con la función y el ajuste seleccionados o por dar unos intervalos irregulares e inexactos como es el caso de Cramer.

En la tabla 18 se observa la estima puntual de altura de ola, la esperanza de la estima, la desviación típica de ésta y los límites del intervalo de confianza, tanto el inferior como el superior de la boya de Roses. La esperanza de la estima no es más que la media de las estimaciones de las 2000 simulaciones estadísticas. Como se puede observar no coinciden con las estimas puntuales, esto significa que el método de estimación no es centrado sino que tiene cierto sesgo que va creciendo a medida que aumenta el periodo de retorno hasta llegar a valores importantes. El intervalo no es simétrico sino que es más corto en el límite inferior, haciendo que la esperanza de la estima sea superior a la estima puntual. En la gráfica 16 se aprecia que los intervalos son bastante anchos, esto se debe a que se optimizan los 3 parámetros de la función de distribución, y por ello la incertidumbre aumenta (hay muchas más posibilidades cuando se pueden ajustar 3 parámetros que cuando uno se fija a un valor constante).

Para la boya de Blanes el intervalo de confianza también se realiza con el mismo método, con la simulación estadística mediante 2000 iteraciones, puesto que se utiliza la misma función de distribución y el mismo método de ajuste.

En la tabla 19 se observan los mismos valores que en la tabla anterior, la estima puntual de altura de ola, la esperanza de la estima, la desviación típica y los límites del intervalo de confianza para el caso de Blanes. En este caso la esperanza de la estima de altura de ola tampoco coincide con la estima, ya que el método de estimación tampoco es centrado. El intervalo no es simétrico sino que es más corto en el límite inferior, haciendo que la esperanza de la estima sea superior a la estima puntual. Para esta boya la diferencia entre la estima y la esperanza de la estima es inferior que en la boya de Roses; si se observa la gráfica 17 se puede apreciar que los intervalos son más estrechos que en Roses. Los valores de las estimas son mayores en Roses que en Blanes, el límite superior e inferior del intervalo en Roses también es mayor que en Blanes.

Para la boya del Llobregat se ha realizado el intervalo de confianza con las fórmulas empíricas propuestas por Goda que solo son válidas para Gumbel y Weibull (con unos valores concretos del parámetro c) con el ajuste de mínimos cuadrados. En este caso estamos con Gumbel y con mínimos cuadrados, así que se pueden utilizar estas fórmulas.

Este método para hallar los intervalos de confianza tiene como diferencia con el anterior que es centrado, es decir, las estimas de las alturas de ola coinciden con el valor medio del intervalo. Esto se ve claramente en la gráfica 18 donde se observa que el intervalo es totalmente centrado. En la tabla 20 se muestra la estima puntual de la altura de ola acompañada del valor que con el que se obtiene el límite superior e inferior del intervalo, estos límites también están escritos en la tabla junto con la desviación típica de la estima.

