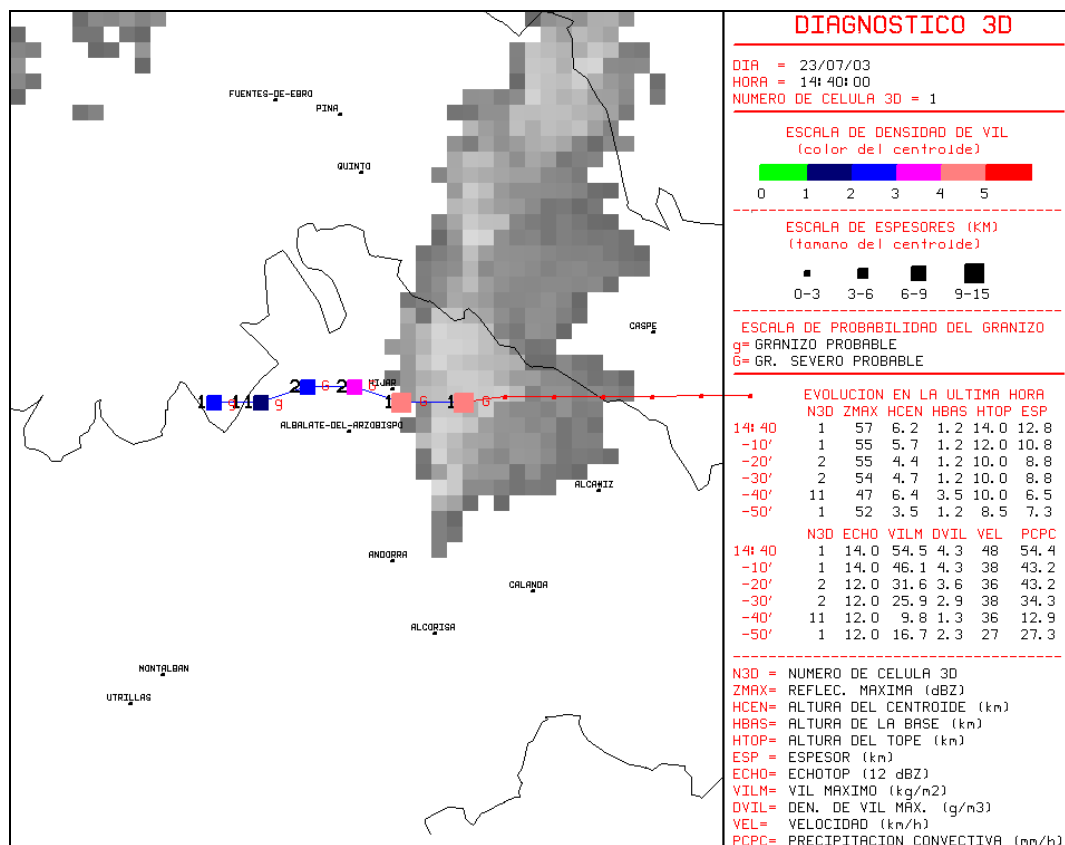


MÓDULO PARA LA ESTIMACIÓN DE GRANIZO BASADO EN DATOS RADAR

NOTA TÉCNICA S.T.A.P. Nº 44



Ampliación a las 14:40 UTC de la célula 3D que afectó a Alcañiz (Teruel) el día 23 de julio de 2003. En este producto se tiene información de la diagnosis convectiva, pudiéndose ver la evolución y posiciones de la célula ampliada a lo largo de la hora anterior. Se aprecia el resultado del diagnóstico de granizo (letra de color rojo) que se sitúan junto a la posición de cada centroide.

Ismael San Ambrosio Beirán

Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (S.T.A.P.)
 Area de Predicción y Aplicaciones
 Subdirección General de Predicción
 Instituto Nacional de Meteorología

NOTA TÉCNICA S.T.A.P. N° 44

MÓDULO RADAR PARA LA ESTIMACIÓN DE GRANIZO

I.- INTRODUCCIÓN

- I.1.- Objetivo
- I.2.- Generalidades sobre formación del granizo

II.- REVISIÓN DE CRITERIOS Y ALGORITMOS

- II.1.- Consideraciones previas
- II.2.- Criterio de Waldvogel
- II.3.- Criterio de VIL del día
- II.4.- Criterio de Densidad de VIL
- II.5.- Algoritmo de Detección de Granizo

III.- ESTUDIO PRELIMINAR

- III.1.- Evaluación de criterios y algoritmos
- III.2.- Conclusiones y selección de criterios

IV.- DESARROLLO DEL MÓDULO

- IV.1.- Metodología
- IV.2.- Ajuste de umbrales con la campaña 2001
- IV.3.- Verificación con la campaña de 2002
- IV.4.- Ajuste de umbrales con las campañas 2001 y 2002

V.- EJEMPLOS

- V.1.- Santander, 24 de junio de 2003
- V.2.- Alcañiz (Teruel), 23 de julio de 2003

VI.- CONCLUSIONES

VII.- ANEXOS

- VII.1.- Tablas de contingencia e índices de verificación
- VII.2.- Revisión de algunos test estadísticos

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFÍA

I.- Introducción

I.1.- Objetivo

I.2.- Generalidades sobre formación del granizo

I.- INTRODUCCIÓN

En numerosas regiones de España las tormentas con granizo son un fenómeno habitual sobre todo durante la primavera y el verano. Dentro de nuestro territorio las regiones del NE peninsular y las zonas del interior (en especial la meseta N) son las que parecen sufrir con más frecuencia la presencia de este meteoro, lo cual concuerda con algunos estudios que señalan el cuadrante nororiental como el más afectado por situaciones de convección profunda con granizadas.

Este tipo de fenomenología tiene como consecuencia más inmediata unas cuantiosas pérdidas económicas en el sector agrario. De hecho España es el país europeo con mayores pérdidas en agricultura debidas al granizo, según informes elaborados por la “Asociación Internacional de Aseguradores contra los daños ocasionados por el granizo”. Por otro lado, Agroseguro señala que la zona de mayor riesgo de España es el valle del Ebro, incluyendo a La Rioja, Navarra, Aragón, Lérida y Tarragona, donde se estima un impacto económico debido al granizo en torno a los 100 millones de euros anuales. Además hay que tener en cuenta que, según Sánchez et al. (1996), dependiendo del tipo de cultivo, las pérdidas en el sector agrícola se pueden producir ya con piedras de sólo 0,5 cm de diámetro.

Aunque los daños en la agricultura son los más importantes y generalizados, ya que afectan a mayores extensiones de terreno, y se pueden producir por granizo de muy diferentes tamaños, también hay que resaltar las pérdidas económicas debidas a granizo severo sobre infraestructuras, mobiliario urbano, vehículos, edificios, etc. Consideraremos a lo largo de todo este trabajo que granizo severo es aquel que tiene un diámetro superior a 1,9 cm, según la definición que aparece en el glosario del NWS (*National Weather Service*). En este sentido podemos recordar las impresionantes granizadas que los días 23 de julio y 16 de agosto de 2003 asolaron la localidad turolense de Alcañiz con piedras de más de 5 cm de diámetro, y que, además de los cuantiosos daños en la agricultura de la comarca, se saldaron, según las valoraciones iniciales publicadas en diversos medios de comunicación aragoneses (*Heraldo de Aragón*, *El Periódico de Aragón*, entre otros), con más de 3000 tejados total o parcialmente destruidos en el casco urbano de dicha población y más de 300 automóviles con importantes desperfectos en cristales y carrocerías.

Por todo ello nos parece importante poder disponer de una herramienta que permita al predictor tener información relativa a la posible presencia de este meteoro en aquellas tormentas detectadas por radar que se desarrollan en su área de responsabilidad. Se empieza la Nota Técnica planteando los objetivos de este trabajo, a continuación se hace un breve resumen de las teorías más actuales en cuanto a la formación y desarrollo del granizo en nubes de tormenta. En los siguientes capítulos se hace por un lado una exposición de algunos criterios radar para la detección de granizo, y se continúa con el desarrollo del módulo de granizo que presentamos. Finalizamos el trabajo con dos ejemplos del comportamiento de este módulo en situaciones de granizadas reales ocurridas durante el verano del año 2003.

I.1.- OBJETIVO

La predicción y detección del granizo es una tarea tan necesaria como compleja desde el punto de vista operativo. Al hecho de que las teorías sobre su formación no estén completamente desarrolladas, se añade el que las herramientas de que dispone el predictor no estén orientadas específicamente para este fin. Además, hay que tener en cuenta que sólo en algunas nubes convectivas que tienen granizo en altura éste va a llegar al suelo.

Durante los años 2000 y 2001 se desarrollaron en el Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (STAP) las aplicaciones 2D y 3D de identificación, seguimiento y extrapolación de estructuras y células radar (Martín et al., 2001; Martín & Carretero, 2001), con la finalidad de que los predictores dispusiesen de un procedimiento automático para analizar de manera objetiva la convección. Inicialmente estas aplicaciones utilizaron criterios simples basados en umbrales de reflectividad máxima, ecotop, VIL (*Vertically Integrated Liquid*) para el diagnóstico del granizo. Con objeto de completar estas aplicaciones, se consideró necesario mejorar los diagnósticos con la introducción de un módulo avanzado de granizo. Para empezar este desarrollo se implementaron diversos criterios para detección de granizo severo basados en la experiencia del SPC (*Storm Prediction Center*) y del NSSL (*National Severe Storms Laboratory*): criterio de Waldvogel para granizo de cualquier tamaño, criterio de VIL del Día, de densidad de VIL, y el Algoritmo de Detección de Granizo, de ahora en adelante HDA (*Hail Detection Algorithm*).

A lo largo de la campaña primavera-verano de 2001 se llevó a cabo una recogida de información sobre la ocurrencia de granizadas. Con esta información se hizo un estudio de valoración de los criterios antes mencionados, para comparar y analizar pormenorizadamente el comportamiento de cada uno de ellos. Esto, a su vez, nos permitió, posteriormente, seleccionar aquellos procedimientos que parecen más adecuados y que dan mejores resultados en las condiciones específicas de nuestro entorno geográfico. A partir de esta selección inicial de criterios se ha procedido a posteriores ajustes para optimizar el comportamiento y los resultados del módulo desarrollado, para que a partir de los valores de verificación obtenidos, el predictor operativo conozca, a la hora de utilizarlo, las limitaciones del mismo y la fiabilidad de sus resultados.

I.2.- GENERALIDADES SOBRE FORMACIÓN DEL GRANIZO

Posiblemente una de las definiciones de granizo más ampliamente aceptada es la que aparece en el glosario de la AMS (*American Meteorological Society*), y que lo define como “bola o forma irregular de hielo de un tamaño que va desde el de un guisante al de un pomelo”, esto supone que su tamaño puede variar aproximadamente entre 0,5 y 15 cm de diámetro.

De manera general el granizo cae de cumulonimbos, estando siempre asociado a procesos convectivos que generan tormentas. Según la opinión de muy diversos autores (Browning, 1977; Knight & Knight, 2001; etc) se puede decir que prácticamente todas las células convectivas, en especial las severas, contienen granizo, de hecho está presente en todas ellas aunque en ocasiones no llegue al suelo. Un hecho que se observa es que la presencia del granizo en superficie está siempre muy localizada en el tiempo y en el espacio, por lo que la cantidad y el tamaño del granizo que puede aparecer es tremendamente variable, aunque en general los tamaños más grandes y las mayores cantidades del mismo se asocian siempre a tormentas severas, que suelen tener una marcada organización interna y grandes desarrollos verticales asociados a fuertes corrientes ascendentes. Aunque esto es así de manera general, también aparece granizo en nubes convectivas con menos organización, de hecho alguno de los autores mencionados afirma que no existen diferencias claras y significativas entre las tormentas que producen granizo y las que no lo producen, planteando como cuestión clave en el tema del granizo: “¿Porqué algunas tormentas producen granizo en mayor cantidad y/o de mayor tamaño que otras?”.

No es la finalidad de este trabajo hacer una descripción detallada de la microfísica de nubes relacionada con los procesos que dan lugar al desarrollo y crecimiento del granizo. Por ello, diremos simplemente que, en general, las piedras de granizo crecen por procesos de acreción de gotitas de agua subfundida sobre cristalitas de hielo que se desplazan verticalmente a través de nubes superenfriadas.

Para que los procesos de microfísica que llevan a la formación del granizo se desarrollen debe existir un ambiente favorable a ello. En general, estas condiciones vienen dadas por la existencia de intensas corrientes ascendentes y descendentes dentro de la tormenta que contengan numerosas gotitas de agua subfundida y por la presencia de “embriones” de granizo, constituyendo todo ello el entorno básico para el crecimiento del granizo (Knight & Knight, 2003). Llamamos embriones a partículas de hielo de un tamaño tal que su velocidad de caída es de algunos metros por segundo y que, además, tienen la capacidad de crecer hasta tamaños de piedras de granizo en tan sólo algunas decenas de minutos.

En los párrafos anteriores hemos mencionado dos aspectos importantes con relación a la formación del granizo: la presencia de fuertes corrientes verticales y la organización interna de las estructuras convectivas. Ambos están relacionados con dos factores que favorecen el desarrollo de convección profunda y organizada, que son la existencia de inestabilidad y de cizalladura vertical del viento. El hecho de que aparezcan estas condiciones en el entorno viene marcado por la existencia de unas variables de carácter termodinámico, que deben cumplir unas condiciones específicas y determinantes. Un

desarrollo más completo y exhaustivo de estos aspectos se puede consultar en la Nota Técnica del STAP n° 35 (Martín et al., 2001), de aquí en adelante NT35.

Dentro de este entorno favorable, los procesos de formación del granizo tienen lugar en una región óptima de crecimiento que se extiende desde 0 hasta $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura a la que las gotitas de agua subfundida se congelan espontáneamente), lo que supone unos 5 a 6 km de espesor dentro de la nube. Hay que tener en cuenta que si la velocidad de ascenso de los embriones es demasiado grande, se pueden elevar fuera de la región óptima antes de alcanzar un tamaño suficientemente grande como para caer en forma de granizo; por otro lado, si esta velocidad es demasiado lenta, los embriones pueden caer antes de llegar a tener dicho tamaño.

La formación del granizo depende así de un equilibrio crítico entre flujos de aire dentro de la nube convectiva, trayectorias de gotitas de agua subfundida dentro de las corrientes ascendentes, y trayectorias de embriones potenciales de granizo. La interacción de estos factores, que depende a su vez de las variables de entorno ya mencionadas, va a determinar la cantidad de vapor de agua que se condensa y/o reevapora en la atmósfera media y superior, la cantidad del mismo que cae como lluvia, y la que cae como granizo.

Si consideramos ahora dos tipos idealizados de tormenta (supercelulares y multicelulares), a cada uno de ellos se le puede asociar una hipótesis ó esquema simplificado de formación de granizo (Knight & Knight, 2003). El modelo conceptual describe un proceso relativamente simple y organizado de reciclado de partículas de precipitación para formar embriones de granizo dentro de la tormenta. La figura 1.1 representa una sección horizontal y otra vertical de una supercélula típica, con las trayectorias en las que es posible el crecimiento del granizo. De manera resumida se representa una masa de aire húmedo que alimenta a la tormenta a través de un intenso flujo del S o del SE en superficie y que se eleva a través de las zonas centrales de la tormenta. Debido al flujo del W en niveles superiores, este aire adquiere un movimiento hacia el E en estos niveles. En la zona central las corrientes ascendentes pueden ser de $30\text{ ó }50\text{ ms}^{-1}$, por lo que dentro de esta corriente los pequeños cristales de hielo no tienen tiempo de crecer hasta tamaños muy grandes con velocidades de caída adecuadas. Es por ello que se integran dentro del flujo de salida y son expulsados en la cima de la tormenta, constituyendo el característico yunque de las supercélulas. En este flujo de salida el movimiento vertical del aire es muy débil, y algunas de esas partículas de hielo terminan por caer para incorporarse de nuevo al flujo de entrada en niveles bajos. De esta manera pasan a ser embriones que tienen una nueva oportunidad de crecer dentro de la corriente ascendente. Al tener ahora mayor tamaño, su velocidad respecto al aire es menor, por lo que ascienden más despacio y tienen más tiempo para crecer hasta el verdadero tamaño de granizo. En la mencionada figura se ve con más detalle diversas trayectorias posibles de embriones que pueden, o no, dar lugar a granizo.

Las tormentas multicelulares se componen de varias células convectivas individuales en diferentes estados de desarrollo, cada una de las cuales puede durar entre 45 y 60 minutos, tiempo que tardan las corrientes ascendentes en reforzarse hasta un máximo y decaer. Si cuando la corriente ascendente se refuerza hay embriones de granizo presentes, ese intervalo de tiempo puede ser suficiente para que estos crezcan y adquieran velocidades de caída de algunos metros por segundo, siempre que la corriente

ascendente no sea demasiado fuerte, en cuyo caso serían elevados demasiado alto dentro de la nube.

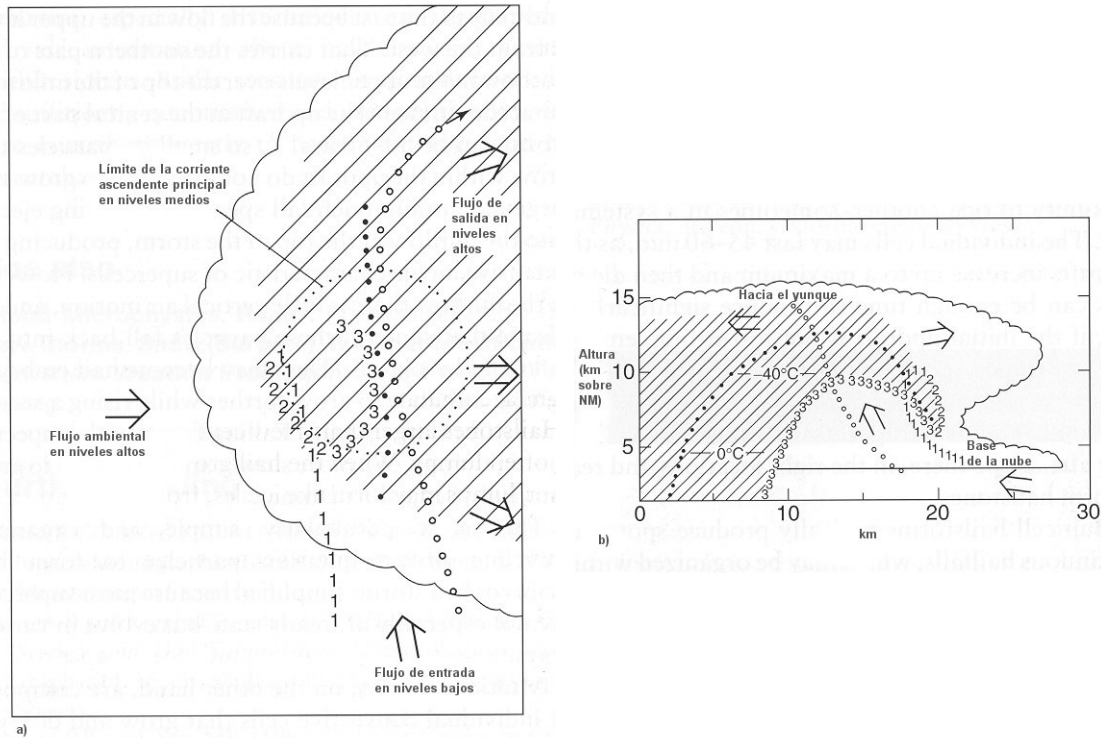


Figura 1.1 Flujos de aire y trayectorias de hidrometeoros dentro de una supercélula. (a) vista desde arriba, la flecha en la parte inferior representa el flujo alimentador en niveles bajos, el círculo de puntos es la región ocupada por la corriente ascendente principal, las otras flechas representan los flujos ambiental y de salida de la tormenta en niveles altos. El área sombreada es la región de la nube con hidrometeoros de tamaño suficiente para precipitar. (b) Corte vertical paralelo al flujo alimentador de la tormenta. Los círculos blancos representan la trayectoria de pequeños cristales de hielo con crecimiento directo que se desplazan rápidamente en la corriente ascendente principal, para salir en los niveles superiores y formar el yunque del cumulonimbo. Los círculos negros corresponden a la trayectoria de partículas en zonas de corrientes ascendentes más débiles, aumentan de tamaño y precipitan como granizo pequeño o como lluvia. Los número 1, 2, 3 son las trayectorias con formación de granizo grande: (1) crecimiento lento al elevarse en el borde de la corriente ascendente principal, (2) descenso de los embriones de granizo para volver al flujo alimentador, y (3) crecimiento final del granizo dentro de la fuerte corriente ascendente para caer en el borde de la misma. (Esquemas sacados de Knight & Knight (2003), y a su vez adaptados de Browning (1977) en: G. B. Foote & C. A. Knight (eds.)- “Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression”. AMS)

II.- Revisión de criterios y algoritmos

II.1.- Consideraciones previas

II.2.- Criterio de Waldvogel

II.3.- Criterio de VIL del día

II.4.- Criterio de Densidad de VIL

II.5.- Algoritmo de Detección de Granizo

II.1.- CONSIDERACIONES PREVIAS

La información de los radares meteorológicos constituye una herramienta fundamental para tratar de indicar la presencia de granizo durante el desarrollo de fenómenos convectivos. En este sentido hay que tener en cuenta que si hablamos de radares convencionales, como es el caso de los radares del INM, éstos no detectan el granizo de una manera directa, sino que hay que inferir su presencia por medio de técnicas o criterios que, en unos casos utilizan exclusivamente datos de radar, y en otros casos combinan esta información con datos de sondeos o con datos de modelos numéricos.

Este tipo de determinaciones indirectas se suele basar en la estimación por medio del radar de algunas señales que pueden asociarse indirectamente a determinados procesos físicos que van ligados a la formación del granizo, como son las corrientes ascendentes suficientemente intensas, el contenido elevado de agua (líquida y/o sólida) mantenido en suspensión a gran altura o un cierto grado de organización en las células convectivas, entre otros.

En cualquier caso no hay que olvidar las importantes limitaciones que presenta el uso de la información radar para detectar la presencia del granizo, y mucho más para la estimación del tamaño del mismo. Todas estas limitaciones parten de que la mayoría de los radares operativos, en todo el mundo y no sólo los del INM, no están diseñados para la detección del granizo, sino que su finalidad es bien distinta y no son el instrumento adecuado para distinguir qué tipo de hidrometeoro está presente en un área de precipitación. Además, tenemos las limitaciones inherentes a la táctica de exploración, a la existencia de zonas de sombra, a los procesos de atenuación, a la resolución espacial y temporal, a la distancia del blanco al radar, etc. Por otro lado, hay que tener en cuenta otra serie de limitaciones que son debidas a la naturaleza del propio fenómeno que estamos analizando; así, por ejemplo los procesos de microfísica de nube que tienen lugar en la formación del granizo son conocidos de manera parcial, la exactitud de la información que se tiene sobre las variables de entorno en que se desarrollan las nubes tormentosas es siempre limitada y son, sin duda, factores importantes que condicionan el tamaño del granizo o la posibilidad de que llegue al suelo.

A lo largo de los años se han desarrollado gran número de técnicas basadas en datos de reflectividad (convencional y/o en modo Doppler) de radares para la detección del granizo y para la estimación de su posible tamaño. En la NT35 se hace una revisión bastante detallada de todas ellas. En este capítulo vamos a describir solamente aquellas técnicas mencionadas en el punto I.2, y que son las que hemos utilizado para el desarrollo de este módulo de granizo y en el estudio preliminar (San Ambrosio, 2001) que sirvió de punto de partida para este trabajo. Existen, por otro lado, distintas técnicas basadas en radares polarimétricos, pero no vamos a entrar a comentarlas ya que de momento no disponemos de este tipo de información en el INM. Últimamente se han empezado a desarrollar también técnicas basadas en redes neuronales (Marzban & Witt, 2001) que usan información radar y de distintos parámetros físicos del entorno para la detección y estimación del tamaño del granizo; ésta podría ser una línea de trabajo a tener en cuenta para posibles mejoras y desarrollos futuros en la detección del granizo.

II.2.- CRITERIO DE WALDVOGEL

Este método fue desarrollado en Suiza a finales de la década de los 70 por Waldvogel, Federer & Grimm (1979), para radares de banda S y con la finalidad de mejorar estrategias de siembra de nubes para supresión del granizo.

El método es relativamente sencillo y obtiene la probabilidad de existencia de granizo de cualquier tamaño, PG de ahora en adelante, en una nube convectiva a partir de la diferencia entre la altura máxima que alcanzan los ecos de 45 dBZ y la altura de la isocero, usada como parámetro del entorno en que se desarrolla la tormenta. El fundamento físico de este método está en que dentro de tormentas con fuertes corrientes verticales ascendentes los ecos de 45 dBZ pueden alcanzar mayor altura sobre la isocero. La probabilidad de granizo en superficie se obtiene por medio de una relación simple, la que se ve en la figura 2.1, con la diferencia de altura mencionada.

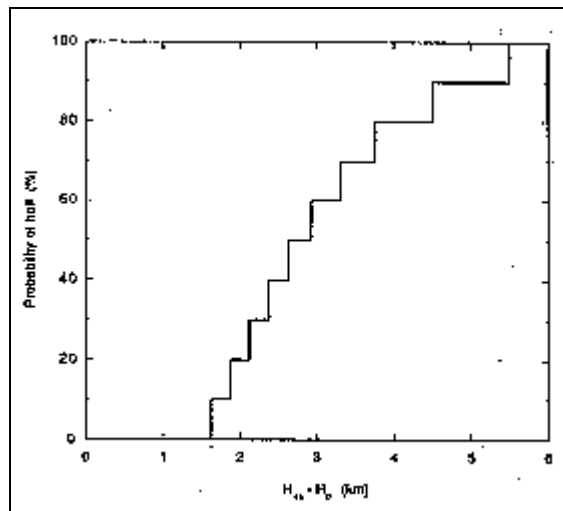


Figura 2.1 Probabilidad de granizo (PG) en superficie en función de $H_{45} - H_0$. Siendo H_{45} la altura máxima de los ecos de 45 dBZ sobre el radar, y H_0 la altura de la isocero (extraído de Waldvogel et al. 1979).

II.3.- CRITERIO DE VIL DEL DÍA

Un parámetro radar interesante, que ha sido ampliamente usado en la detección del granizo y de tiempo severo, es el VIL, que mide el contenido potencial de agua líquida precipitable por m² que existe dentro de una nube (Greene & Clark, 1972). Se mide en kg/m² y se calcula por medio de la siguiente integración en altura:

$$VIL = \sum_1^n 3,44 * 10^{-6} [(Z_i + Z_{i+1}) / 2]^{4/7} \Delta h$$

siendo Z_i y Z_{i+1} los valores de reflectividad, en mm⁶m⁻³, en dos niveles de la exploración radar separadas por un espesor Δh. En general, valores altos de reflectividad (debidos a un alto contenido de agua precipitable) a lo largo de espesores importantes de nubes convectivas dan lugar a valores altos de VIL.

La manera de integrar los valores de reflectividad en la vertical nos conduce a dos valores de VIL diferentes: el VIL-Grid y el VIL-Zmax. El VIL-Grid se calcula integrando todos los valores de reflectividad en la vertical de cada píxel del volumen cartesiano, y en el caso del procedimiento YRADAR_3D, en la vertical de la posición del centroide 3D de cada célula convectiva identificada, este procedimiento se describe más ampliamente en la NT35. En el caso del VIL-Zmax se integran sólo las reflectividades máximas en los CAPPIS que constituyen cada célula convectiva. En la figura 2.2 se puede ver de manera gráfica la diferencia del método de cálculo de los dos valores de VIL.

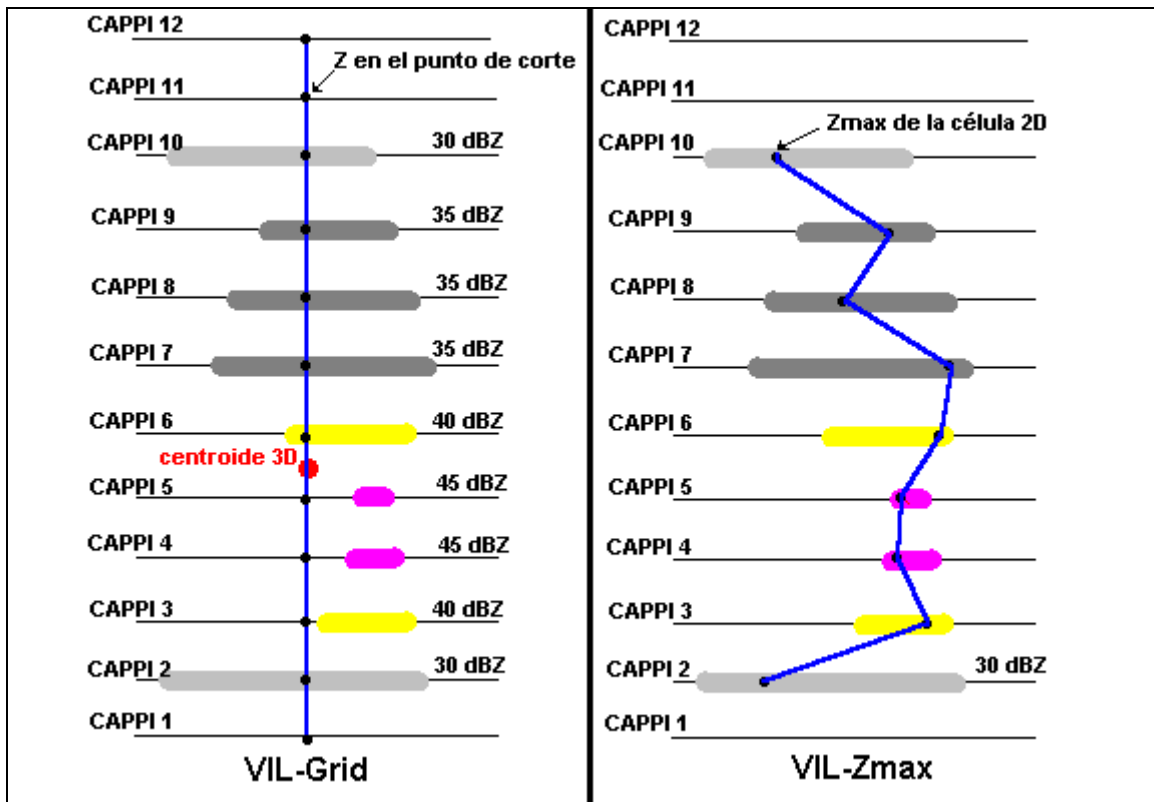


Figura 2.2 Diferencias en el cálculo del VIL-Grid y del VIL-Zmax en una célula 3D previamente identificada por el procedimiento YRADAR. (Figura sacada de la NT35).

El valor de VIL obtenido por uno y otro método puede llegar a diferir bastante, sobre todo en tormentas con rápido desplazamiento o en estructuras convectivas organizadas y con una marcada inclinación en la vertical, tal y como indican autores como Lewis III (199?), Martín et al. (2001), etc.

El VIL es un parámetro muy sencillo de usar, y por ello ha sido ampliamente utilizado de manera operativa en EEUU para detectar células tormentosas que puedan llevar asociado tiempo severo en superficie por medio del desarrollo de criterios basados en éste y en otros parámetros (Kitzmilller et al. 1995). Aunque se observa cierta correlación entre altos valores de VIL y una mayor probabilidad de granizo en superficie, resulta difícil encontrar valores o umbrales de VIL para discriminar la presencia de granizo. Esto se debe entre otras razones a que las condiciones atmosféricas varían, no sólo de manera estacional sino de un día a otro, modificándose la estructura térmica vertical, la distribución de humedad, la fuerza de las corrientes ascendentes, el tamaño y estructura de las tormentas, etc.

De esta manera se ha desarrollado el método del VIL del Día (VOD de aquí en adelante) que calcula un valor de VIL umbral para unas condiciones ambientales dadas en las que se desarrollan las tormentas que pueden producir granizo severo (Wilken, 1994). La idea que subyace es que el granizo que puede aparecer será de mayor tamaño si el aire en niveles medios-altos es más frío, o bien si el valor de VIL es más alto (mayor contenido de agua líquida elevada a una mayor altura por encima del nivel de congelación).

Existen diversos métodos para estimar el valor del VOD. En este trabajo hemos seleccionado dos para estudiar su comportamiento en nuestro entorno. Uno de ellos es el desarrollado en la NWSFO de Little Rock (Arkansas) y nos da el valor umbral para granizo severo, VOD1, en función de la temperatura en 500 hPa, (Lewis III, 199?), este valor se puede obtener a partir de la gráfica que se presenta en la figura 2.3 en la que se tiene una relación empírica que equivale a la recta de regresión:

$$VOD1 = 2,20 * T_{500} - 522,95$$

el valor VOD1 se obtiene en kg/m² a partir de la T₅₀₀ en Kelvin. El otro es una ecuación empírica desarrollada por Paxton y Shepherd en 1993 para la zona de Florida (Lenning et al, 1998) y que nos da el valor umbral para granizo severo, VOD2, en función de las temperaturas en 500 y en 400 hPa:

$$VOD2 = \frac{-1500}{T_{500} + T_{400}}$$

obteniéndose el valor VOD2 en kg/m² a partir de la T₅₀₀ y de la T₄₀₀ en °C.

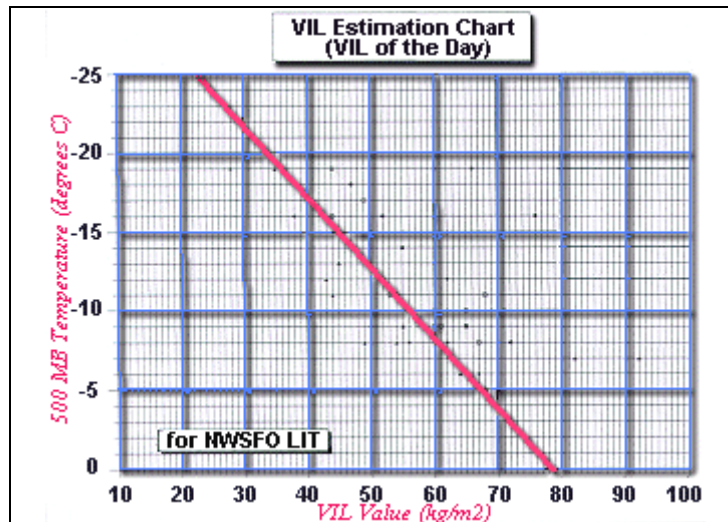


Figura 2.3 Método de cálculo del VIL del día de Wilken (1994) a partir de la temperatura en 500 hPa. La línea roja da el valor umbral para granizo severo.

Aunque el VOD trata de subsanar algunas deficiencias que presenta el uso del VIL para estimar la presencia de granizo en tormentas, siguen existiendo ciertas limitaciones, algunas de las cuales son inherentes al propio VIL y al procedimiento de cálculo del mismo. Otra limitación importante es la representatividad que pueden tener los datos de temperatura en altura que consideremos; obtenidos a partir de sondeos o bien a partir de modelos no dejan de ser una aproximación al entorno real en el que se desarrollan las tormentas y que éstas van a modificar en mayor o menor medida. Otro aspecto a tener en cuenta es que se está calculando un valor umbral a partir de unos parámetros ambientales concretos y que pueden no ser los más apropiados, de hecho Lenning et al. (1998) apuntan la necesidad de desarrollar ecuaciones más exactas para el cálculo del VOD basadas en otros parámetros como la altura de la isocero o la temperatura del termómetro húmedo en niveles bajos.

Una primera mejora introducida a la metodología del VOD es la desarrollada en la NWFO de Little Rock (Arkansas), que intenta detectar la presencia de granizo severo, estimando además su tamaño probable, en función del valor de VIL, de la temperatura en altura (temperatura en 500 hPa) y del ecotop, lo cual supone una aproximación a las teorías de la densidad de VIL. En la figura 2.4 se ve la gráfica usada para la estimación del tamaño del granizo por este método. Para usar esta gráfica se parte del valor de VIL y del valor de la temperatura en 500 hPa, estos valores se cortan en un punto de determinado valor de ecotop y en una región de la tabla que corresponde a un tamaño de granizo concreto. Si el ecotop de una tormenta determinada es 5000 pies más bajo que el valor dado por la tabla, lo que implica una mayor densidad de VIL, el tamaño probable del granizo será el de la categoría inmediatamente superior a la del punto de partida. Si, por el contrario, el ecotop es 5000 pies más alto (menor densidad de VIL), el tamaño probable del granizo será el de la categoría inmediatamente inferior. De cara a una aplicación práctica de estos algoritmos hay que tener en cuenta que el ecotop en los radares del NWS de EEUU se genera para reflectividades mayores de 18 dBZ, mientras en la red de radares del INM el ecotop se define para ecos mayores de 12 dBZ.

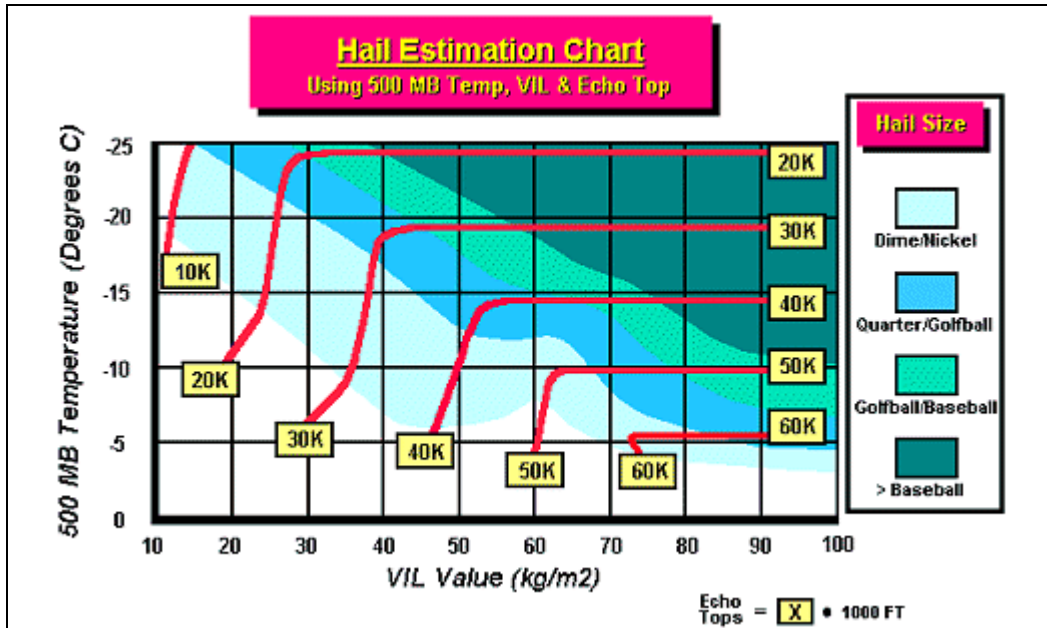


Figura 2.4 Gráfica de la NFWO de Little Rock (Arkansas) para la estimación del tamaño del granizo a partir de valores de VIL, de temperatura en 500 hPa y de valores de ecotop. Las cuatro categorías de tamaño equivalen a los siguientes diámetros de granizo: Dime/Niquel (1,9 a 2,4 cm), Quarter/Golfball (2,5 a 4,5 cm), Golfball/Baseball (4,5 a 6,2 cm) y >Baseball (mayor de 6,2 cm).

II.4.- CRITERIO DE DENSIDAD DE VIL

Parte de los inconvenientes que presenta el uso del VIL y del VIL del día se evitan por medio del concepto de la densidad de VIL (Amburn & Wolf, 1997), que normaliza el VIL de una tormenta con relación a su ecotop. Se calcula por medio del cociente:

$$DVILGrid = 1000 * \frac{VILGrid}{ECHOTOP}$$

donde la densidad de VIL (DVIL de ahora en adelante) se obtiene en g/m^3 , a partir del VIL-Grid (kg/m^2) que hemos definido en el punto II.2, y del ecotop en m.

Este valor de DVIL (DVIL-Grid) va a ser tenido en cuenta a lo largo de este trabajo junto con la DVIL celular (DVIL-Zmax en g/m^3) que se obtiene por medio de una fórmula similar:

$$DVILZ \max = 1000 * \frac{VILZ \max}{HTOP - HBAS}$$

en la que estamos dividiendo el VIL-Zmax (kg/m^2) de una célula convectiva por su espesor en m, que viene dado por la diferencia entre el tope y la base de la misma (HTOP-HBAS), siendo estos valores los que se obtienen en el proceso de identificación de células convectivas con la aplicación YRADAR_3D, (ver NT35), que considera sólo las reflectividades superiores a 30 dBZ.

De la experiencia en EEUU, señalada por Amburn & Wolf (1997), se tiene que la DVIL es muy útil para una identificación rápida de estructuras con altas reflectividades con relación a su espesor vertical, que a menudo son las que generan granizo. Estos autores establecen un umbral de $3,5 g/m^3$ que permite identificar alrededor del 90 % de las tormentas que producen granizo severo. Por otro lado, encuentran también una cierta correlación que permite una estimación del posible tamaño del granizo a partir de los valores de DVIL. La tabla 2.1 es el resultado que obtuvieron de su estudio para 221 casos de tormentas con granizo severo y no severo.

Hail Size	Ranges in VIL density					
	<3.0	3.0-3.4	3.5-3.9	4.0-4.4	4.5-4.9	>4.9
<19 mm (36)	27	7	0	2	0	0
19-24 mm (117)	6	10	32	44	18	7
25-45 mm (63)	0	1	5	18	16	23
>45 mm (5)	0	0	0	0	1	4
(Total number)	(33)	(18)	(37)	(64)	(35)	(34)

Tabla 2.1 Tamaño de granizo para distintos intervalos de DVIL (sacado de Amburn y Wolf, 1997).

A pesar de la ventajas que ofrece el uso de la DVIL, hay que tener en mente que no es un método perfecto para la detección del granizo y que sigue teniendo algunos inconvenientes; quizás el más importante es que no tiene en cuenta el entorno en que se genera la tormenta, de manera que tormentas con densidades de VIL similares dan lugar a tamaños de granizo dispares debido a que se desarrollan en condiciones medioambientales de carácter local diferentes.

II.5.- ALGORITMO DE DETECCIÓN DE GRANIZO

Finalmente vamos a revisar también este algoritmo, desarrollado por Witt et al. (1998), que es el más complejo y elaborado de los descritos hasta ahora. El HDA, Algoritmo de Detección de Granizo, consta de dos componentes diferentes, el primero trata de detectar granizo de cualquier tamaño por medio de la Técnica de Waldvogel, descrita en el punto II.2; y el segundo, que es el que nos interesa en este momento, trata de detectar granizo severo.

Una ventaja importante de este método es que parte de una relación directa reflectividad-granizo, por medio de la transformación de datos de reflectividad en flujo de energía cinética de granizo (Waldvogel et al., 1978a; Waldvogel et al., 1978b; Federer et al., 1986). Este criterio se basa, en primer lugar, en el cálculo de un parámetro denominado *Severe Hail Index* (SHI), cuyas unidades son $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ y que se obtiene mediante la integración:

$$SHI = 0.1 \int_{H_0}^{H_T} W_T(H) E dH \quad (1)$$

en la que E es el flujo de energía cinética de granizo, en $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$, que se calcula por:

$$E = 5 \times 10^{-6} \times 10^{0.084Z} \times W(Z)$$

donde W(Z) es la siguiente función de ponderación:

$$W(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z \leq Z_L \\ \frac{Z - Z_L}{Z_U - Z_L} & \text{para } Z_L < Z < Z_U \\ 1 & \text{para } Z \geq Z_U \end{cases}$$

En esta relación, Z es la reflectividad en dBZ. La función de ponderación W(Z) sirve para tener en cuenta sólo las reflectividades más altas, que en general están relacionadas con la presencia de granizo, por medio de dos valores umbral, Z_L y Z_U , que se pueden ajustar y a los que en nuestro caso hemos asignados los valores por defecto que tienen inicialmente en el algoritmo original, 40 y 50 dBZ respectivamente.

En la integral (1), para tener en cuenta la estructura térmica de la atmósfera, se introduce la función de ponderación térmica $W_T(H)$, que da más peso a aquellas reflectividades que se hallan en niveles con temperaturas más frías:

$$W_T(H) = \begin{cases} 0 & \text{para } H \leq H_0 \\ \frac{H - H_0}{H_{m20} - H_0} & \text{para } H_0 < H < H_{m20} \\ 1 & \text{para } H \geq H_{m20} \end{cases}$$

donde H es la altura de cada dato de reflectividad, H_0 es la altura de la isocero, y H_{m20} es la altura de la isoterma de -20°C , todas ellas sobre el nivel del mar. En nuestro caso los datos de H_0 y de H_{m20} los obtendremos a partir de las salidas del HIRLAM 0,5 interpolando a las posiciones de los centroides de cada célula 3D identificada.

La integral (1) se calcula teniendo en cuenta las reflectividades máximas en cada CAPPI en que se ha identificado cada célula tormentosa por el procedimiento YRADAR_3D, y se lleva a cabo para el espesor vertical de la célula desde la altura de la isocero (H_0) hasta el tope de la célula (H_T).

En segundo lugar este criterio calcula un umbral de alerta, denominado *Warning Threshold* (WT), y que obtendremos usando la ecuación propuesta por Witt et al. (1998):

$$WT = 57.6H_0 - 121.0$$

donde se obtiene WT en $\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}$ a partir del valor de la isocero (H_0) en km.

A partir de estos dos parámetros, SHI y WT, este algoritmo calcula por un lado la probabilidad de granizo severo (PGS de aquí en adelante), ajustando una función de probabilidad relativamente sencilla:

$$PGS = 29 \ln\left(\frac{SHI}{WT}\right) + 50$$

que nos da el valor de esta probabilidad en tanto por ciento. Por otro lado también nos permite obtener el tamaño de granizo máximo esperado (*Maximum Expected Hail Size*, MEHS de ahora en adelante), por medio de otra función sencilla:

$$MEHS = 2.54(SHI)^{0.5}$$

que nos da dicho tamaño, MEHS, en mm y que está ajustada de forma que el 75 % del granizo observado sea de menor tamaño que la correspondiente estimación.

III.- Estudio preliminar

III.1.- Evaluación de criterios y algoritmos

III.1.1.- Criterio de VIL del día

III.1.2.- Criterio de Densidad de VIL

III.1.3.- Algoritmo de Detección de Granizo

III.1.4.- Estimación del tamaño del granizo

III.2.- Conclusiones y selección de criterios

III.1.- EVALUACIÓN DE CRITERIOS Y ALGORITMOS

Durante la primavera y verano de 2001 se comenzó a recoger toda la información posible sobre la ocurrencia de granizadas, y se llevó a cabo un primer estudio (San Ambrosio, 2001) de valoración del comportamiento de cada uno de los criterios y algoritmos basados en datos radar para la detección del granizo que se han descrito en el capítulo II de esta Nota Técnica.

Para este estudio preliminar se seleccionaron seis situaciones con granizo severo que tuvieron lugar a lo largo de la mencionada campaña del 2001. Las situaciones elegidas fueron las siguientes:

- Bielsa (Huesca), noche del 4 de julio, granizo del tamaño de una pelota de tenis.
- Morella (Castellón), tarde del 8 de julio, granizo del tamaño de una pelota de tenis.
- Morella (Castellón), tarde del 9 de julio, granizo del tamaño de una pelota de golf.
- Ínes (Soria), tarde del 28 de julio, granizo del tamaño de una nuez.
- Peñafiel (Valladolid), tarde del 28 de julio, granizo del tamaño de una pelota de golf.
- Elche (Alicante), noche del 10 de octubre, granizo del tamaño de una pelota de tenis.

En este capítulo, como en el resto de la Nota Técnica, las referencias al tamaño de granizo se van a hacer por comparación con diferentes objetos, para ello tendremos en cuenta que el tamaño al que equivale cada una de estas referencias es el siguiente:

- Nuez: diámetros comprendidos entre 1,9 y 2,4 cm.
- Pelota de golf: diámetro entre 2,5 y 4,5 cm.
- Pelota de tenis: diámetro entre 4,6 y 6,2 cm.
- Se usará la referencia “Pequeño”, para todos los diámetros inferiores a 1,9 cm.

Por medio del procedimiento YRADAR_3D, y a partir de los CAPPIs de cada una de estas situaciones, se consiguió identificar las células convectivas y obtener la información necesaria para valorar los diferentes criterios. Para cada uno se obtuvo, así, determinada probabilidad de granizo severo y una estimación del tamaño del mismo.

Los resultados de probabilidad de granizo severo se evaluaron a partir de una serie de gráficos en los que se representó, para la duración completa de cada célula convectiva identificada:

- Una estimación del intervalo de tiempo en que se produjeron las granizadas, por medio de unas barras verticales, que en la leyenda figuran como PRE-GRAN. Estas barras no llevan asociada escala vertical, de manera que no tienen ningún valor cuantitativo ni respecto a la cantidad de precipitación ni respecto al tamaño del granizo.
- El valor que van tomando a lo largo de la vida de la tormenta determinados umbrales, como es el caso de los valores VOD1 y VOD2.
- El valor de los parámetros usados como indicadores de la presencia de granizo, y calculados a partir de los diferentes criterios, VIL máximo, PG, PGS y los dos valores de densidad de VIL (DVIL-Grid y DVIL-Zmax).

III.1.1.- Criterio de VIL del día

En la figura 3.1 está representada la evolución en cada granizada de los valores de VIL y de los dos umbrales utilizados (VOD1 y VOD2). Sólo en unas pocas granizadas el VIL supera de manera clara alguno de esos umbrales; en el resto de los casos este valor se queda, en general, muy por debajo de los valores de VOD1 y de VOD2. De todas formas, se pudo apreciar una tendencia al aumento de los valores de VIL durante los momentos previos a las granizadas, este aumento en algunos casos llegaba a ser bastante marcado.

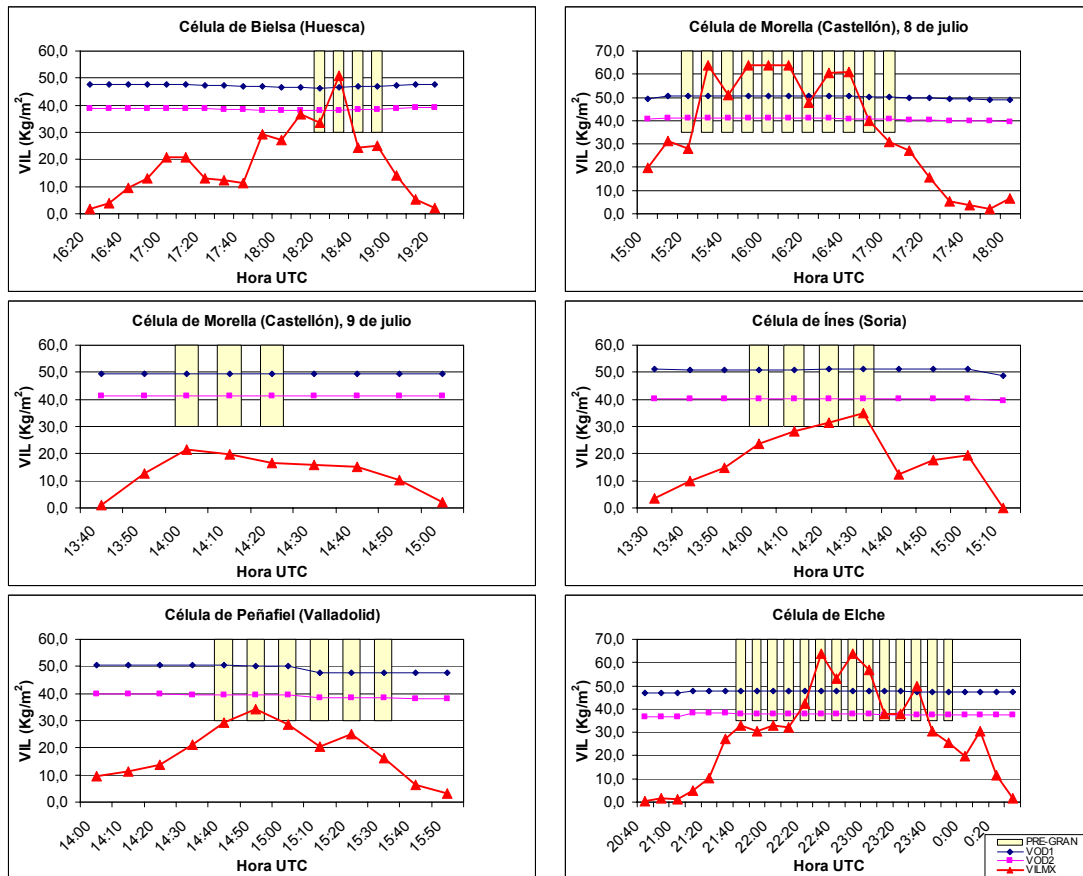


Figura 3.1 Precipitación de granizo en cada célula analizada y evolución del VIL máximo (VILMX) y de los dos valores umbral, VOD1 y VOD2.

III.1.2.- Criterio de Densidad de VIL

En la figura 3.2 se puede ver la evolución, para cada célula analizada, de los dos valores de densidad de VIL considerados (DVIL-Grid y DVIL-Zmax). Se pudo observar que la DVIL-Zmax presentaba valores más altos que la DVIL-Grid, como era de esperar al tratarse de convección profunda y con cierto grado de organización. Por otro lado, la DVIL-Grid presentaba, en general, crecimientos menos homogéneos, con frecuentes altibajos bruscos de su valor. En el comportamiento de la DVIL-Zmax, por el contrario, se observaron aumentos de su valor más constantes y además significativos, presentando valores próximos y superiores a los que aparecen en la bibliografía americana como críticos en cuanto a la presencia de granizo (Amburn & Wolf, 1997; Lewis III, 1997?).

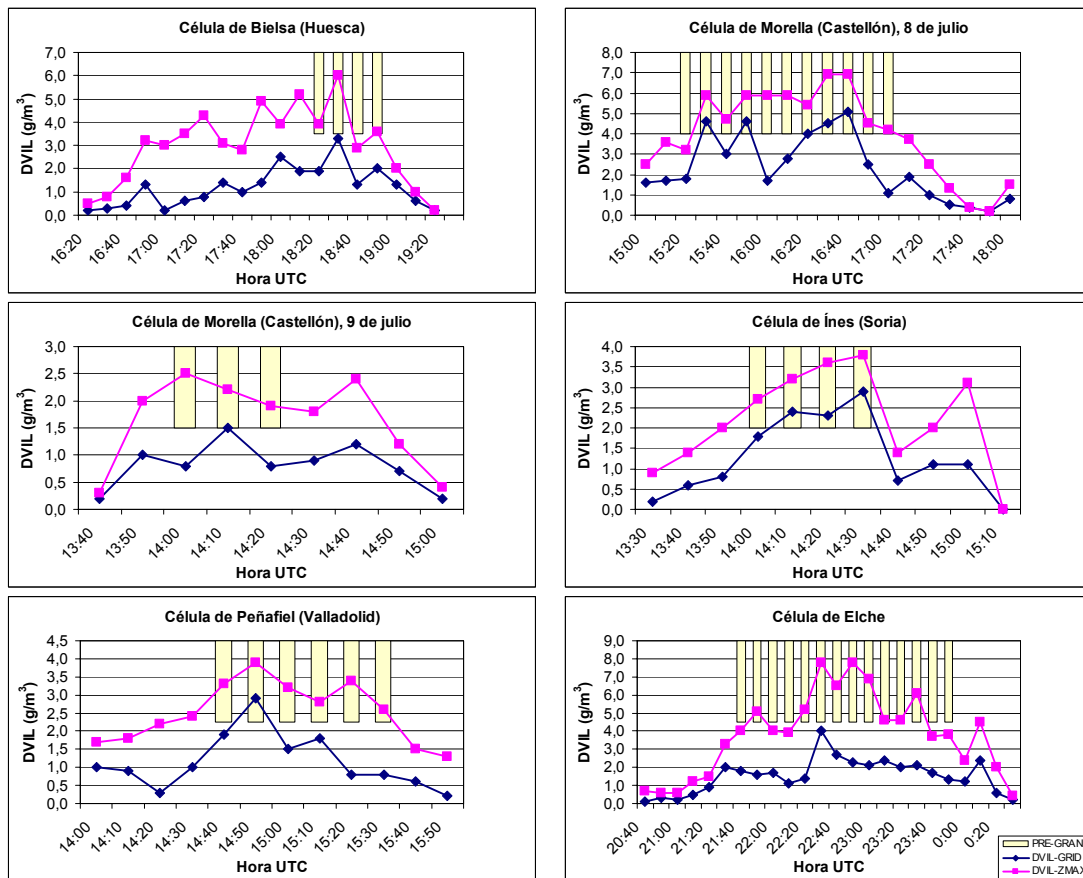


Figura 3.2 Precipitación de granizo en cada célula analizada y evolución de los valores de DVIL-Grid y de DVIL-Zmax.

III.1.3.- Algoritmo de Detección de Granizo

El análisis de la evolución de la PG (criterio de Waldvogel) y de la PGS (obtenido por el HDA) se puede apreciar en la figura 3.3. Se puso de manifiesto cómo en todos los casos la PG presenta unos valores significativos (por encima del 80 %) con aumentos bastante marcados en los momentos previos a las granizadas. Los valores de la PGS presentaban un comportamiento similar; aunque alcanzando valores inferiores a los de la PG, aunque son en general superiores al 30 ó 40 %.

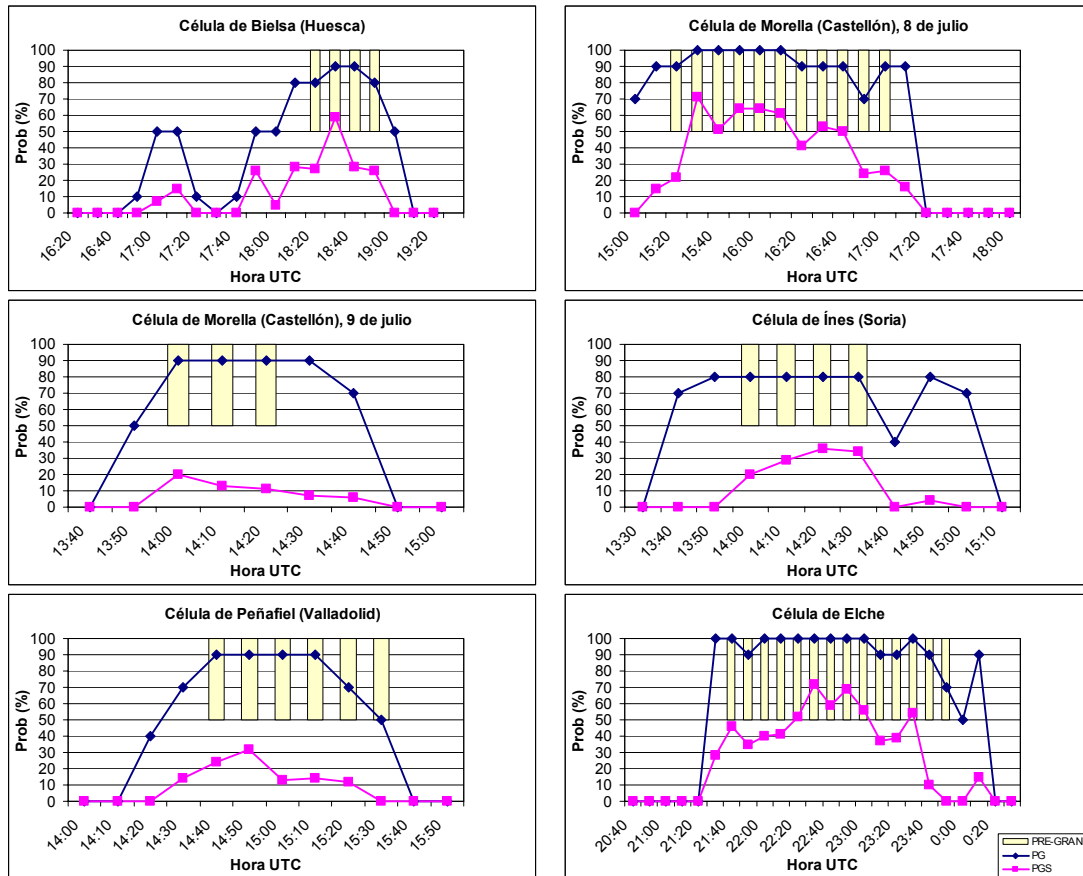


Figura 3.3 Precipitación de granizo en cada célula analizada y evolución de los valores de PG y de PGS.

III.1.4.- Estimación del tamaño del granizo

En la figura 3.4 se muestra un gráfico en el que se comparan los tamaños de granizo obtenidos por medio de cada criterio utilizado con relación al tamaño real observado en cada tormenta. Para cada célula analizada se representó el tamaño máximo observado y los tamaños máximos que se obtuvieron a lo largo de todo su ciclo de vida por medio de los siguientes criterios:

- HDA, que nos permite obtener también el MEHS, descrito en el punto II.5.
- Tamaño basado en el VIL, por medio del método desarrollado en la NWFO de Little Rock (Arkansas), descrito en el punto II.3.
- Tamaños obtenidos a partir de la DVIL-Grid y de la DVIL-Zmax, por medio de la tabla 2.1.

Los resultados obtenidos en la estimación del tamaño de granizo fueron más difíciles de evaluar que la ocurrencia del mismo. En algunos casos el que más se aproxima al tamaño observado es el estimado por medio del método de la NWFO de Little Rock, en otros casos se ajustan bien los tamaños basados en el criterio de la Densidad de VIL (especialmente en la DVIL-Zmax). En una de las granizadas, la de Morella del día 9 de julio, ninguno de los criterios se aproxima mínimamente al predecir el tamaño del granizo. En la Nota Técnica del STAP n° 37 (Martín et al., 2002) se hace una comparación más detallada de las mismas estimaciones del tamaño del granizo para el caso de la supercélula de Elche del 10 de octubre de 2001.

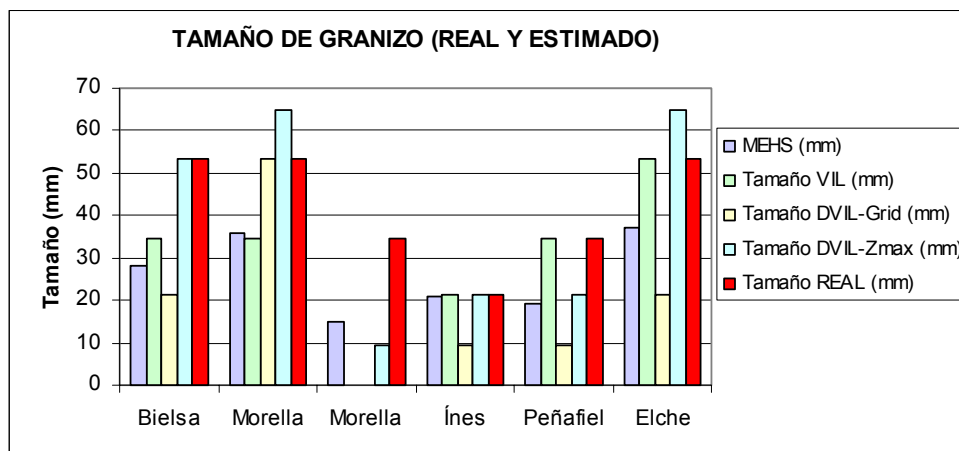


Figura 3.4 Tamaño de granizo, real y estimado por los diferentes criterios, en cada una de las células analizadas.

III.2.- CONCLUSIONES Y SELECCIÓN DE CRITERIOS

A la vista de los resultados anteriores se extrajeron una serie de conclusiones y consideraciones a tener en cuenta en el posterior desarrollo del módulo de estimación de granizo. Los principales aspectos que podemos destacar en este sentido son los siguientes:

- La utilización operativa del criterio de VIL del Día parecería en principio poco adecuada ya que requeriría inicialmente el desarrollo de ecuaciones mucho más efectivas para el cálculo de un umbral eficaz de dicho valor.
- El uso operativo del criterio de la Densidad de VIL, a priori, sería adecuado especialmente si se usa la Densidad de VIL-Zmax. En cualquier caso sería recomendable una revisión y adaptación de umbrales.
- Los resultados obtenidos con el HDA nos hacen pensar que también podría ser adecuado para el uso operativo. Aunque sería deseable poder ajustar de manera adecuada las funciones de probabilidad para la PG y la PGS.
- Teniendo en cuenta la dificultad para obtener la suficiente información de retorno sobre granizadas que nos permita ajustar los diferentes criterios, pensamos que podría dar buenos resultados el uso conjunto de la Densidad de VIL-Zmax y de la PG y/o la PGS, sin la mencionada revisión de umbrales.
- Ninguna de las técnicas analizadas para la estimación del tamaño del granizo da unos resultados que se ajusten de forma adecuada a las observaciones, de manera que no podemos considerarlas suficientemente fiables de cara a su uso operativo.

En este estudio previo no se pudieron evaluar las tasas de falsas alarmas, ya que no estaba completa la base de datos de granizadas del año 2001. A partir de estas conclusiones iniciales se han abordado unos estudios más extensos para poder valorar estas técnicas de una manera más precisa, sobre todo si se quieren ajustar unos umbrales fiables para nuestro entorno geográfico.

IV.- Desarrollo del módulo

IV.1.- Metodología

IV.1.1.- Obtención de datos de granizo observados

IV.1.2.- Selección de tormentas sin granizo

IV.1.3.- Análisis radar de cada tormenta

IV.2.- Ajuste de umbrales con la campaña 2001

IV.2.1.- Casos de granizo de esta campaña

IV.2.2.- Comportamiento de cada criterio

IV.2.3.- Combinación de criterios

IV.2.4.- Determinación de umbrales

IV.2.5.- Independencia, significación e intervalos de confianza

IV.3.- Verificación con la campaña de 2002

IV.3.1.- Evaluación subjetiva

IV.3.2.- Modificaciones en la altura de los CAPPIs

IV.3.3.- Verificación objetiva

IV.4.- Ajuste de umbrales con las campañas 2001 y 2002

IV.4.1.- Comportamiento de cada criterio

IV.4.2.- Combinación de criterios

IV.4.3.- Nueva determinación de umbrales

IV.4.4.- Independencia, significación e intervalos de confianza

IV.- DESARROLLO DEL MÓDULO

En puntos anteriores de esta Nota Técnica se ha hecho una breve revisión de aspectos genéricos sobre la formación del granizo y se han descrito de manera sucinta algunas metodologías de detección del mismo basadas en información radar. También se han revisado los resultados que se consiguieron en su día al hacer un estudio preliminar sobre el comportamiento de algunos criterios radar para detección de granizo, lo cual nos ha permitido seleccionar tres criterios (criterio de Waldvogel, DVIL y HDA) que a priori parecen tener un mejor comportamiento en nuestro entorno geográfico.

En este capítulo se va a proceder a hacer un estudio más exhaustivo del comportamiento de los tres criterios seleccionados para conseguir establecer un algoritmo que permita detectar la presencia del granizo a partir de información radar. En primer lugar se hace una descripción de la metodología de trabajo que se ha seguido en cuanto a la obtención de información de granizadas y de tormentas sin granizo, y en cuanto al análisis posterior de dichas tormentas y a la selección de qué información de las mismas se ha utilizado para los posteriores estudios. En el segundo punto de este capítulo se procede al análisis detallado del comportamiento de los tres criterios seleccionados en todas las tormentas que constituyen la base de datos del 2001 (tormentas con granizo severo, tormentas con granizo pequeño y tormentas sin granizo) que permita encontrar alguna similitud en estos criterios o en alguna combinación de los mismos. El objetivo de este análisis es establecer finalmente unos umbrales de carácter experimental, que permitan detectar el granizo a partir de la información radar, y que van a ser seleccionados a partir de tablas de contingencias y del cálculo de diferentes índices de verificación.

Estos primeros umbrales establecidos se experimentaron durante el año 2002, y al final de dicha campaña se procedió a una evaluación y a una verificación objetiva de los mismos, lo cual está desarrollado en el punto IV.3. Posteriormente a esta verificación, se optó por una revisión y un nuevo ajuste de umbrales, que se llevó a cabo tras un nuevo análisis del comportamiento de los criterios en toda la base de datos del 2001 y del 2002. Este proceso de reajuste de umbrales se desarrolla en el punto IV.4.

IV.1.- METODOLOGÍA

IV.1.1.- Obtención de datos de granizo observados

El punto básico y fundamental para el desarrollo de este trabajo es disponer de una base de datos de calidad y suficientemente fiable sobre granizadas. Este hecho no es trivial, ya que la obtención de esta información es realmente difícil por diversos motivos: no todas las tormentas producen granizo, una misma tormenta a lo largo de su ciclo de vida hay momentos en que da lugar a granizo y otros en que no, y además en un mismo instante puede estar dando granizo en determinado lugar y en otros estar dando precipitación líquida. De esta manera, la información de granizo observado en superficie es un dato puntual específico que está muy localizado en el tiempo y en el espacio. Por otro lado, debe afectar a un área con cierta densidad de población y que esta población se vea afectada en grado suficiente por la granizada como para que la presencia del granizo trascienda de alguna manera, salvo en áreas muy concretas en las que se hayan implantado redes de granizómetros.

La información que se ha utilizado sobre granizadas proviene, por un lado, de diversos medios de información, fundamentalmente periódicos, radio y televisión; esta información se ha utilizado como un dato de entrada inicial para ser confirmado y contrastado a través de los diversos Centros Meteorológicos Territoriales (CMT, de aquí en adelante) y red de colaboradores, de manera que, por medio de este apoyo el dato de determinada granizada se ha podido precisar más en su localización, en el momento de ocurrencia, o bien se ha descartado. Se ha obtenido información adicional a través de Internet, esta información ha sido tratada del mismo modo que la anterior. En otras ocasiones se ha partido de la información radar en la que se han detectado estructuras convectivas suficientemente intensas como para que pudiesen dar granizo, y con esta información se ha solicitado a los correspondientes CMT que confirmasen si en las áreas afectadas se tenía información o no, de posibles granizadas.

Por otro lado, una importante fuente de información que se ha utilizado han sido los *Resúmenes de Incidencias* que la ADV, “*Agrupació de Defensa Vegetal de les Terres de Ponent*”, elabora los días en que hay tormentas que afectan a su zona de actuación durante cada campaña anual. La ADV disponía en el año 2001 de una red de granizómetros repartidos por las comarcas del SW de la provincia de Lleida, ver figura 4.1. Esta red es bastante densa y uniforme, contando con 170 granizómetros repartidos por la región mencionada, lo que supone una densidad de 1 granizómetro cada 16 km². Esto permite disponer de una información sumamente fiable en cuanto a la presencia o no de granizo, tamaño y localización espacial y temporal del mismo.

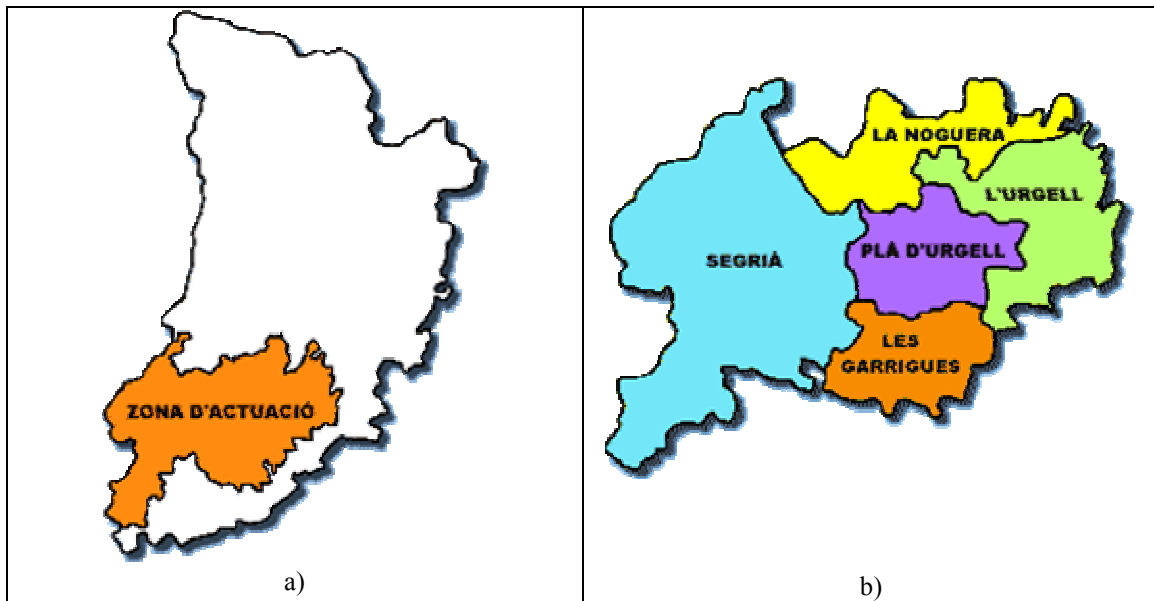


Figura 4.1 Zona de actuación de la ADV, (a) situación general en la provincia de Lleida y (b) detalle de las comarcas que están incluidas en la misma. Mapas sacados de la página web de la ADV (<http://www.advponent.org/>)

IV.1.2.- Selección de tormentas sin granizo

Tan importante como disponer de datos seguros de granizadas es disponer de datos de tormentas que no han dado granizo, pero tener información fiable en este sentido resulta bastante más difícil. El hecho de no tener datos de granizo en determinado punto no indica que determinada tormenta no haya producido granizo, ya que puede haberlo producido pero nadie lo ha observado, o si alguien lo ha observado no ha sido suficientemente significativo como para trascender a alguna de nuestras fuentes de información.

Para obtener información sobre tormentas sin granizo hemos optado por utilizar exclusivamente la información elaborada por la ADV. Así, si una tormenta ha afectado a su zona de actuación y en los resúmenes de incidencias no hay informes de granizadas relativos a las zonas afectadas, hemos considerado como un hecho seguro que dicha tormenta no ha producido granizo en el intervalo de tiempo en que ha estado activa en las mencionadas comarcas. En estos casos los datos que tendremos en cuenta dentro de este estudio van a ser exclusivamente aquellos de las exploraciones radar en que estas tormentas han estado dentro de este área geográfica. A partir de esta selección inicial de tormentas sin granizo, incluiremos en nuestra base de datos únicamente aquellas tormentas con una duración mínima de 20 minutos, es decir, las que el procedimiento YRADAR_3D haya identificado y seguido, por lo menos, en dos exploraciones consecutivas del radar.

IV.1.3.- Análisis radar de cada tormenta

Durante las dos campañas, 2001 y 2002, una vez que se han seleccionado las situaciones con granizo de las que tenemos información suficientemente fiable, se ha procedido a un análisis pormenorizado a partir de los volúmenes cartesianos generados por el radar más próximo o más adecuado a cada situación. Para llevar a cabo este análisis se ha utilizado una versión modificada de la aplicación YRADAR_3D con las situaciones de granizo seleccionadas, de las que previamente se habían archivado los volúmenes cartesianos de las exploraciones radar y las salidas correspondientes del modelo HIRLAM 0.5. Con esta aplicación se han generado los resultados correspondientes a los diferentes parámetros relativos a los criterios que queremos utilizar (PG, PGS, DVIL-Grid y DVIL-Zmax).

a.- Asignación granizada-célula 3D

Con la mencionada aplicación, se ha llevado a cabo un análisis convectivo de todas las exploraciones radar disponibles para cada una de las situaciones seleccionadas, dentro de un intervalo temporal suficientemente amplio para abarcar los momentos en que se produjo granizo. A partir de este análisis lo primero que hemos intentado es identificar la célula convectiva 3D que ha ocasionado cada granizada. Este proceso ha consistido en una asignación subjetiva de la célula más próxima al lugar de cada granizada durante el intervalo de tiempo en que cayó el granizo. En las figuras 4.2 y 4.3 se ve un ejemplo de una asignación de este tipo que se refiere a unas intensas granizadas que tuvieron lugar el 8 de julio de 2002, aproximadamente entre las 12:30 y las 14:30 en la provincia de Soria a lo largo de una franja desde el Burgo de Osma hasta la capital de la provincia, y que dejaron piedras del tamaño de pelotas de golf. En la figura 4.2, se comprueba la proximidad de la célula 3D identificada con el número 2 a la localidad del Burgo de Osma a las 12:40. Del mismo modo en la figura 4.3 se puede apreciar como a las 14:00 la célula 3D identificada con el número 2 ha pasado prácticamente por encima de Soria capital. El procedimiento de seguimiento o *tracking* utilizado en la aplicación permite identificarla como una misma célula, que se ha ido desplazando en dirección NE desde el SW hacia el NE de la provincia. Se trata, por otro lado, de una estructura convectiva que destaca entre las células que la circundan, por su intensidad de VIL y de DVIL y por su desplazamiento claramente anómalo con relación a ellas.

Aunque en la mayoría de los casos este proceso de asignación se ha realizado sin dificultad, ha habido ocasiones en que no se ha podido hacer de una manera tan clara. A veces, en el lugar y a la hora en que se tenía información de una granizada, no se pudo encontrar ninguna célula 3D suficientemente próxima como para que pudiese ser responsable de dicha granizada. Para estos casos se ha establecido un umbral subjetivo de unos 25 ó 30 km de distancia, y de unos 30 a 40 minutos de separación temporal entre la posible célula causante de la granizada y el punto donde ésta se produjo. En los casos en que no se han cumplido estos requisitos, inicialmente se revisó la información para poder corregir posibles errores en la transcripción de los datos de observación, si finalmente no se pudieron subsanar esos errores, estas granizadas fueron descartadas de la base de datos.

En otras ocasiones hemos encontrado que determinada granizada podía ser asignada a varias células 3D, que en el momento de ocurrencia de la misma fueron identificadas muy próximas entre sí y al lugar donde se recogió el granizo. En estos casos se ha

optado por considerar como responsable de las granizadas a la célula más intensa de todas ellas.

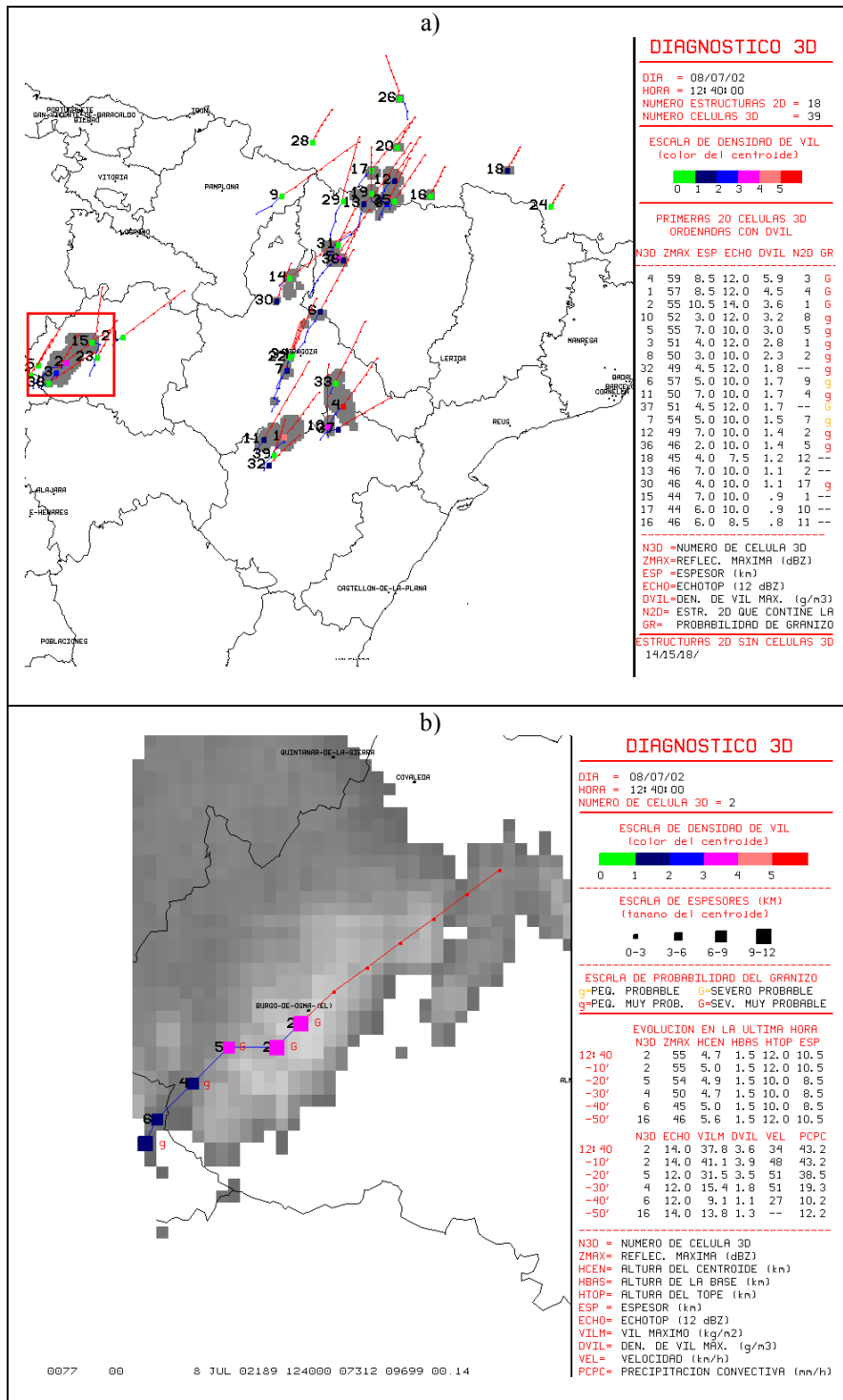


Figura 4.2 Ejemplo de asignación a células 3D de las granizadas que tuvieron lugar durante el día 8 de julio de 2002 en la provincia de Soria entre las 12:30 y las 14:30 UTC; (a) la célula nº 2, enmarcada en rojo, está prácticamente sobre el Burgo de Osma a las 12:40 UTC, (b) este hecho se aprecia mejor en la correspondiente ampliación.

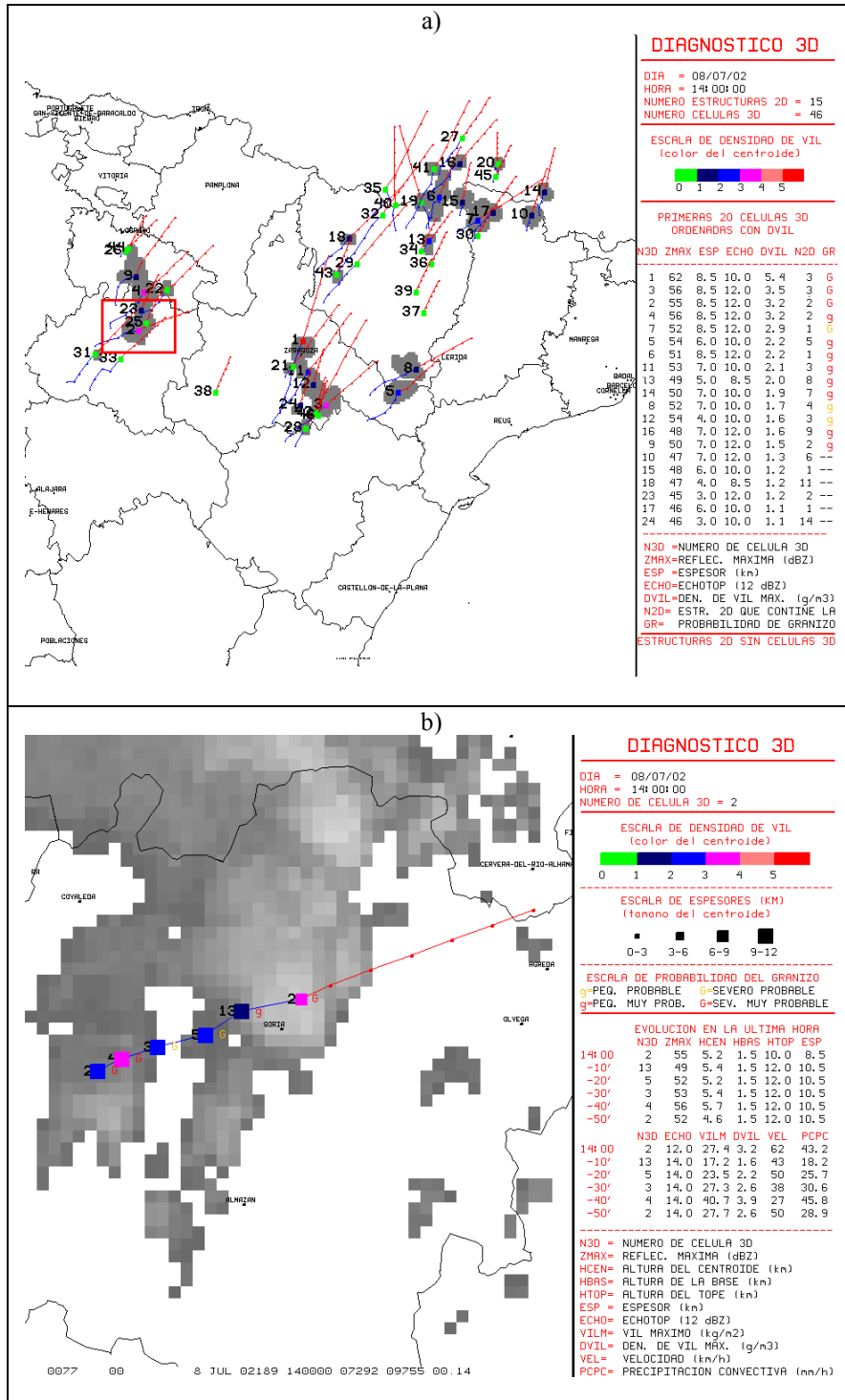


Figura 4.3 Ejemplo de asignación a células 3D de las granizadas que tuvieron lugar durante el día 8 de julio de 2002 en la provincia de Soria entre las 12:30 y las 14:30 UTC; (a) la célula n° 2, enmarcada en rojo, está prácticamente sobre Soria a las 14:00 UTC, (b) esto se ve claramente en la ampliación.

b.- Análisis de la evolución de cada célula 3D

Una vez que identificadas las células 3D que han generado cada una de las granizadas, el procedimiento de seguimiento o *tracking* nos permite reconstruir el ciclo completo de vida de cada una de estas células tormentosas, desde que aparece por primera vez como

tal en un proceso de identificación, hasta que desaparece. A lo largo de todo este tiempo el procedimiento YRADAR_3D calcula para cada célula identificada una serie de parámetros con los datos radar correspondientes a cada exploración: Zmax en cada CAPPI, ecotop, altura de la base y del tope de la célula, espesor de la misma, posición del centroide, VIL-Grid, VIL-Zmax, etc. A partir de esta información y de las variables de entorno interpoladas del modelo, se generan los diferentes resultados relativos a probabilidad de granizo para todo el ciclo de vida de cada célula 3D, usando los criterios seleccionados.

Esto nos permite representar gráficamente los valores de los parámetros que queremos analizar, es decir, la PG (probabilidad de granizo según el criterio de Waldvogel), PGS (probabilidad de granizo severo según el HDA), DVIL-Grid y DVIL-Zmax, y estudiar cómo es su evolución a lo largo del ciclo de vida de las células 3D, y, en especial, analizar su comportamiento durante las granizadas y en los momentos previos a las mismas.

En la figura 4.4 se presenta el ejemplo del análisis correspondiente a la célula tormentosa que afectó a Salou (Tarragona) el día 8 de septiembre de 2002, dejando en esta población, entre las 18:10 y las 18:50 UTC, una importante granizada con piedras del tamaño de pelotas de golf. Estas gráficas son similares a las que se han usado en el punto III.1. Simplemente cabe añadir que los momentos en los cuales no se representan barras verticales no deben ser considerados como de no existencia de granizo, sino como de ausencia de información al respecto, es decir, cuando no hay barras amarillas no sabemos si esta célula produjo granizadas en los lugares a los que estuvo afectando. En la parte superior de la figura se representa la evolución de los valores que va tomando para cada exploración radar la PG y la PGS, y en la parte inferior se representa del mismo modo la evolución de la DVIL-Grid y de la DVIL-Zmax.

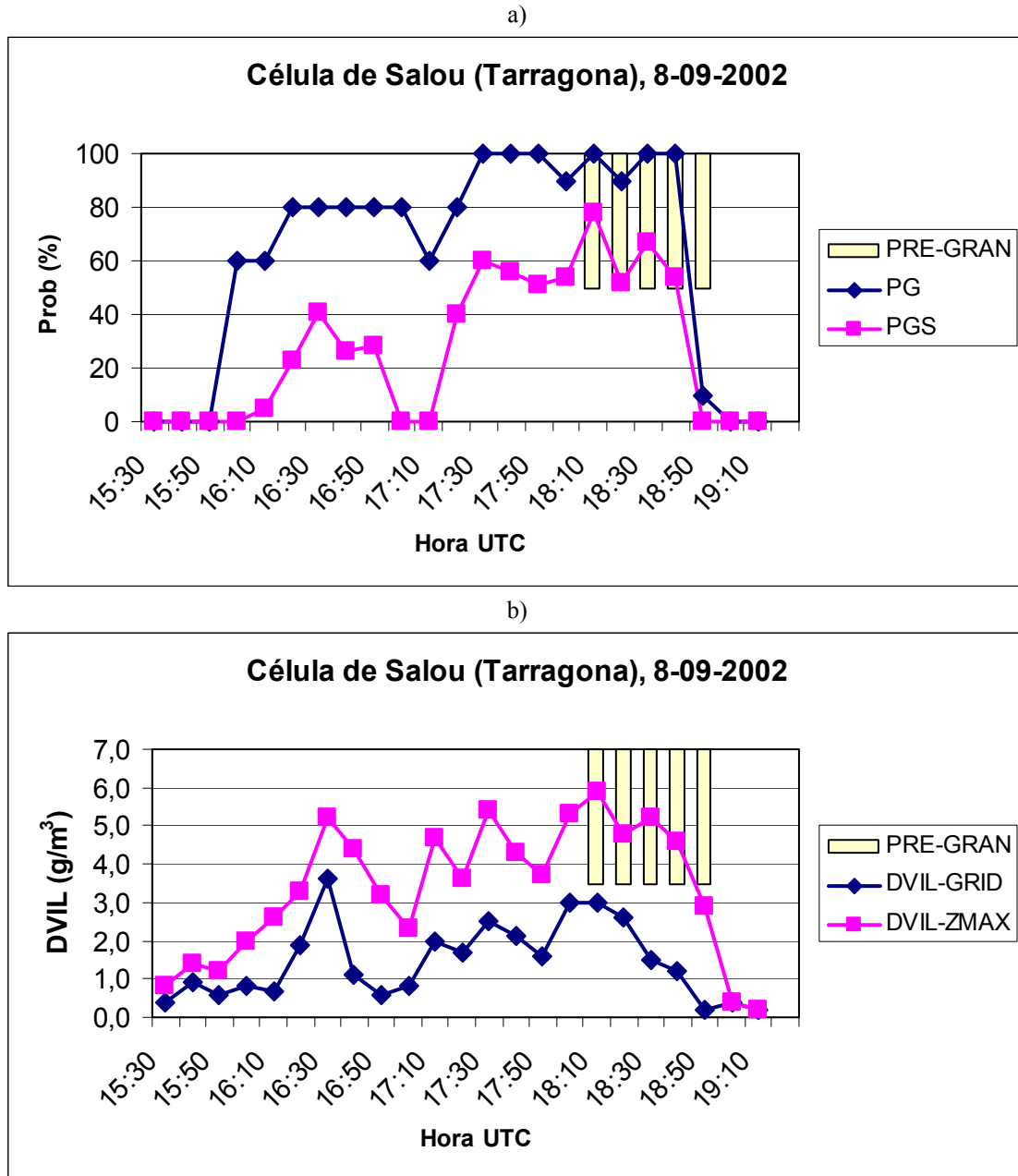


Figura 4.4 Análisis del ciclo de vida de la célula tormentosa que afecto a Salou el 8 de septiembre de 2002, dejando granizo severo entre las 18:10 y las 18:50 UTC (barras verticales amarillas): (a) evolución de los valores de PG y PGS, y (b) evolución de la DVIL-Grid y de la DVIL-Zmax.

c.- Selección de la información a analizar de cada célula 3D

Como vemos en la figura 4.4, en el ciclo de vida de una célula 3D tenemos disponible una cantidad muy grande de información que deberíamos contrastar con unos datos muy localizados en el tiempo y en el espacio, que son los que se refieren a la presencia de granizo en superficie. Esto es así especialmente cuando analizamos células con un ciclo de vida largo; para estos casos, y también como criterio general, consideramos que no es adecuado trabajar con toda la información obtenida a partir de todas las exploraciones radar del ciclo completo de vida de la célula, ni tampoco quedarnos con la información puntual de una única exploración (que podría ser, por ejemplo, la de los parámetros radar más intensos) para relacionarla con el dato de presencia de granizo. Así, debemos

seleccionar un intervalo de tiempo en torno a los momentos en que se produce el granizo, del cual tomaremos los valores de los parámetros que queremos estudiar para relacionarlos con el dato de presencia de granizo en superficie.

El razonamiento que hemos seguido para concretar este intervalo de tiempo es el siguiente. Por un lado nos parece necesario que englobe todo el intervalo de duración de cada granizada, dado que la finalidad del módulo es detectar la presencia de granizo en cualquier momento que se produzca, y no únicamente en sus fases más adversas. Nos parece conveniente, por otro lado, ampliar este intervalo con los 10 minutos anteriores y posteriores a la granizada para tener en cuenta la falta de precisión en la estimación de la hora y duración de la granizada y el desfase que pueda haber entre la ocurrencia del meteoro y las exploraciones radar, que tienen lugar cada 10 minutos. Consideramos también oportuno ampliar este intervalo de tiempo en otros 30 minutos anteriores a la presencia del granizo, ya que antes de que el granizo caiga al suelo dentro de la tormenta tienen lugar diferentes procesos que dan lugar a su formación y crecimiento, y así trataremos de evaluar hasta qué punto este módulo sería capaz de anticipar la ocurrencia de granizo. Siguiendo estos razonamientos, hemos establecido lo que vamos a llamar criterio temporal CT50, que consiste en un intervalo de 50 minutos en torno a cada granizada, que representamos en la figura 4.5.

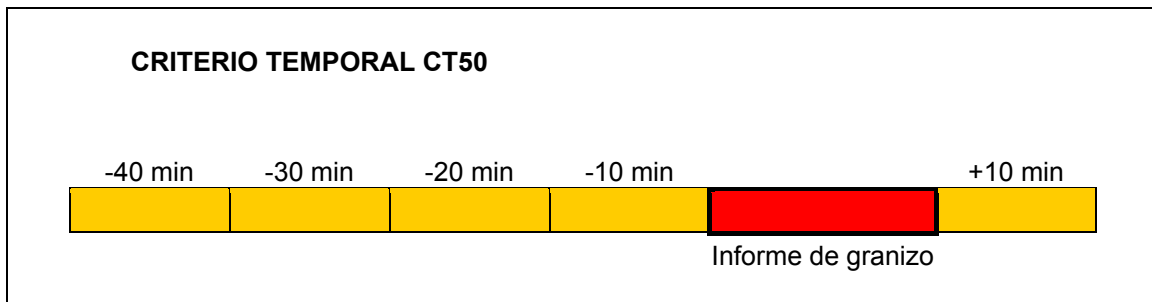


Figura 4.5 Representación gráfica del criterio temporal CT50, intervalo de 50 minutos en torno al periodo de duración de una granizada, representado por el informe de granizo, en rojo en la figura.

En base a este criterio, se establece un número máximo de información radar a utilizar siempre que tratemos con células tormentosas de duración suficientemente larga, que es la información relativa a las exploraciones radar que tienen lugar durante los 40 minutos anteriores a una granizada, las que se efectúan durante la propia granizada, y la de los 10 minutos posteriores a la misma, como se ve en la figura 4.6. Este criterio no tendrá sentido cuando trabajemos con células de menor duración, en cuyo caso tendremos que usar la información que esté disponible, que será de menor duración que el CT50. En el caso de tormentas sin granizo utilizaremos los datos radar tal y como se explicó en el punto IV.1.2.

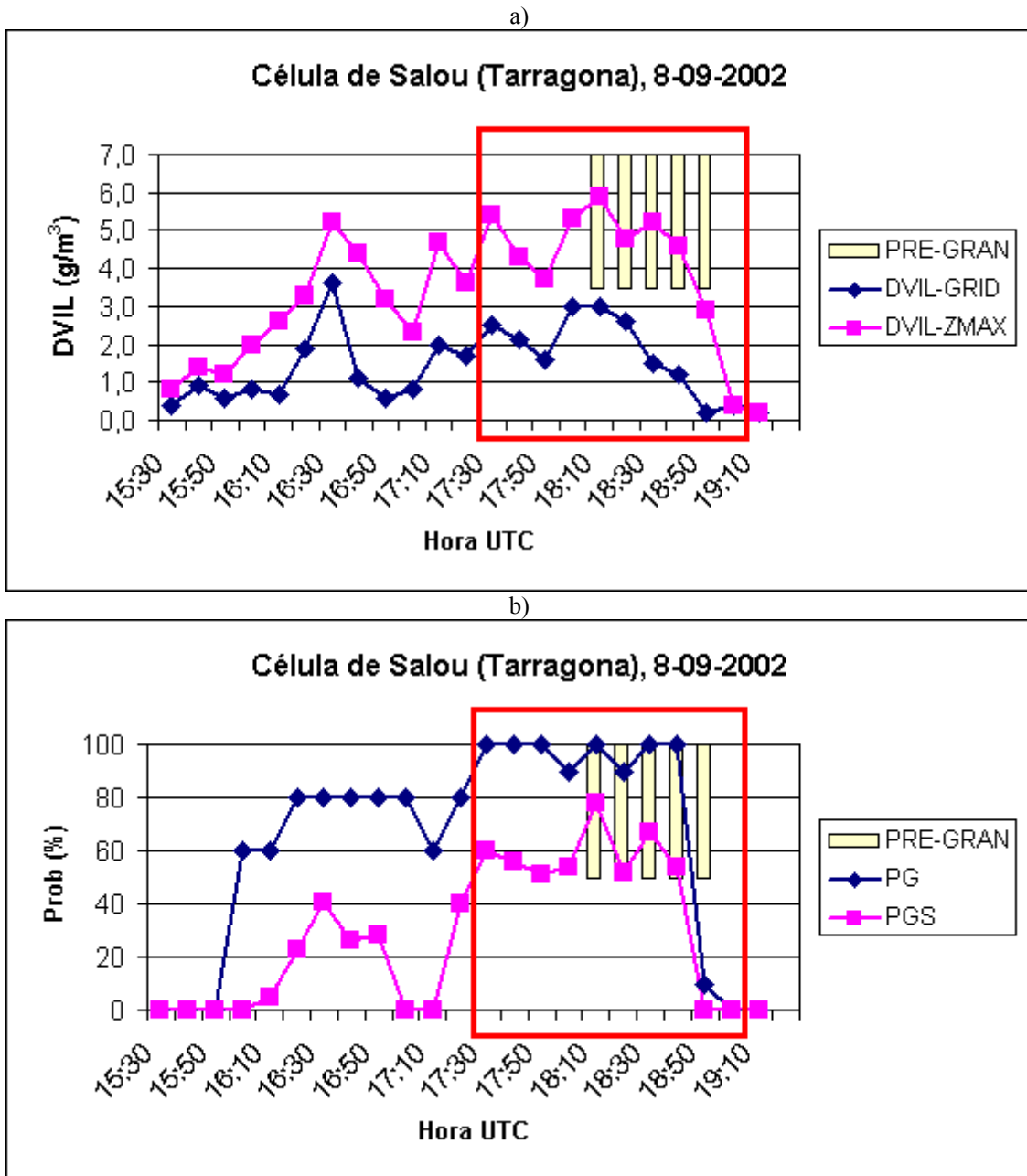


Figura 4.6 Aplicación del criterio CT50 para seleccionar la información que se va a usar de (a) DVIL-Grid y DVIL-Zmax, y (b) de PG y PGS, a lo largo del ciclo de vida de la célula que afectó a Salou el 8 de septiembre de 2002. La información seleccionada es la que queda dentro de los recuadros de color rojo.

IV.2.- AJUSTE DE UMBRALES CON LA CAMPAÑA 2001

IV.2.1.- Casos de granizo de esta campaña

Durante la campaña del año 2001 hemos seleccionado una base de datos constituida por las granizadas que aparecen en la tabla 4.1. En esta tabla se presenta, para cada granizada, la fecha y hora en que se produjo, las localidades a las que afectó, el tamaño del granizo que se observó en cada caso, resaltando en negrita los casos que fueron de granizo severo, y en la última columna, el radar con el que se ha analizado cada situación.

FECHA	HORA UTC	LUGAR	TAMAÑO	RADAR
01-may-01	6:30 a 7:30	Alcira y la Ribera	Nuez	Valencia
	8:30 a 9:00	Camp de Turia	Pequeño	Valencia
09-may-01	12:00 a 14:00	Toledo	Pequeño	Madrid
22-may-01	desde 13:30	NW de Granada	Pequeño	Málaga
13-jun-01	hacia las 13:30	Castellterçol (Barcelona)	Pequeño	Barcelona
	hacia las 14:00	Castellterçol (Barcelona)	Pequeño	Barcelona
03-jul-01	16:30 a 17:40	Gimenells (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia las 18:20	La Coma i La Pedra (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia las 18:40	La Coma i La Pedra (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
04-jul-01	18:00 a 19:00	Bielsa (Huesca)	Pelota tenis	Zaragoza
08-jul-01	15:20 a 18:00	Morella, (Castellón)	Pelota tenis	Barcelona
09-jul-01	14:00 a 17:00	Morella, (Castellón)	Pelota golf	Barcelona
14-jul-01	hacia las 17:30	Gimenells (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia las 18:00	Raimat (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	17:30 a 19:00	Valmanya (Lleida)	Nuez	Zaragoza
19-jul-01	05:00 a 05:30	Golmés (Lleida)	Pequeño	Barcelona
28-jul-01	12:30 a 16:30	Ínes y San Esteban (Soria)	Nuez	Valladolid
		Peñafiel (Valladolid)	Pelota golf	Valladolid
03-sep-01	16:30 a 17:30	Flix (Tarragona)	Pequeño	Zaragoza
	13:00 a 13:40	Emb. Pena (Beceite, Teruel)	Pequeño	Zaragoza
10-oct-01	21:00 a 24:00	Campo de Elche (Alicante)	Pelota tenis	Murcia

Tabla 4.1 Casos de granizo seleccionados durante la campaña del 2001.

Según se aprecia en esta tabla, disponemos de un total de 8 situaciones de granizo severo, 13 situaciones que dieron granizo no severo, y además pudimos disponer de la información relativa a 24 tormentas que no dieron granizo. Esto supone un total de 45 células tormentosas para analizar. Por otro lado se aprecia que la mayor parte de las situaciones de granizo de esta campaña han afectado a regiones dentro de la cobertura del radar de Zaragoza, en total 9 granizadas (casi el 43%), otras 5 han estado en la cobertura del radar de Barcelona (casi el 24%), 2 han estado en la del radar de Valencia y otras 2 en el de Valladolid (casi un 10% para cada uno de ellos). Las tres granizadas restantes se han analizado con los radares de Madrid, Málaga y Murcia. En cuanto a los casos de tormentas sin granizo, al estar todas situadas en la misma zona geográfica, comarcas del SW de Lérida, han sido analizadas indistintamente con los radares de Zaragoza (54% de las tormentas) o con el de Barcelona (46% de los casos).

IV.2.2.- Comportamiento de cada criterio

Según hemos visto, del total de tormentas de esta campaña que vamos a estudiar, establecemos una clasificación de las mismas en tres grupos o clases bien diferenciadas: tormentas que han dado granizo severo, tormentas que han dado granizo no severo, y tormentas que no han dado granizo. Para todas estas tormentas se ha procedido a analizar, en cada una de las exploraciones radar dentro del intervalo temporal CT50, los valores de los parámetros obtenidos con los criterios seleccionados. De esta manera, hemos considerado todas las exploraciones pertenecientes a cada caso, como datos que se corresponden a una única categoría de tormenta, la que tiene asociada según el granizo observado en cada caso. Para cada una de las exploraciones radar de cada tormenta, estudiaremos el comportamiento de tres parámetros calculados por medio de los criterios que estamos analizando:

- ✓ Criterio de DVIL, se toma un único valor, el máximo de los dos valores calculados (DVIL-Grid y DVIL-Zmax).
- ✓ Criterio de Waldvogel, del cuál obtenemos la probabilidad de granizo de cualquier tamaño, PG.
- ✓ Algoritmo de Detección de Granizo (HDA), que nos permite calcular la probabilidad de granizo severo (PGS).

A continuación pasamos a analizar el comportamiento de cada uno de estos criterios en la base de datos de esta campaña.

a.- Distribución de casos según la DVIL

En la figura 4.7 hemos representado en un diagrama de barras la distribución del número de casos según rangos de valores de DVIL para cada una de las tres categorías de tormentas. A la vista de esa figura se observa lo siguiente:

1. Las tormentas sin granizo presentan un máximo muy marcado para el rango de valores de 0 a $0,5 \text{ gm}^{-3}$, a partir de este máximo el número de casos disminuye de forma importante hacia valores altos de DVIL.
2. Prácticamente el 90% de las tormentas sin granizo presenta valores de DVIL inferiores a 2 gm^{-3} .
3. El mayor número de tormentas con granizo no severo se presenta para el rango de valores entre 1 y $1,5 \text{ gm}^{-3}$, a partir de este máximo el número de casos disminuye suavemente hacia valores altos de DVIL.
4. La práctica totalidad de tormentas que han dado granizo severo presentan valores de DVIL superiores a $1,5 \text{ gm}^{-3}$. Para este tipo de tormentas no aparece un máximo bien definido en ningún rango de valores de DVIL.
5. Entre $1,5$ y 4 gm^{-3} se presentan casi en la misma proporción tormentas con granizo severo y tormentas con granizo no severo.
6. Las tormentas con granizo no severo y las tormentas sin granizo aparecen en proporciones similares entre $0,5$ y 2 gm^{-3} de DVIL.

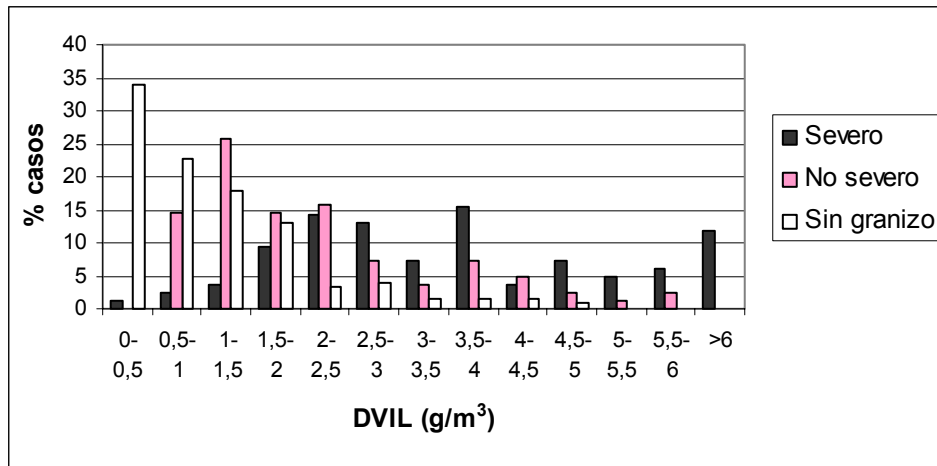


Figura 4.7 Diagrama de barras con la distribución de los valores de DVIL para las tres categorías de tormentas.

b.- Distribución de casos según la PG

El diagrama de barras de la figura 4.8 representa la distribución porcentual del número de casos en cada grupo de tormentas según los valores de PG. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La distribución del número de casos de las tormentas sin granizo presenta un máximo muy marcado para valores de PG entre 0 y 10, en este rango de valores se sitúa el 90 % de los casos.
2. Para ese mismo rango de valores de PG las tormentas que han dado granizo no severo presentan un máximo que supone el 60 % de los casos.
3. El número de casos de tormentas que han dado granizo severo presenta un aumento progresivo, aunque no muy bien definido, hacia valores altos de PG, con un máximo cercano al 50 % de los casos para valores de PG superiores a 90.
4. Encontramos un rango de valores de PG, entre 50 y 80, en el que se presentan casi en la misma pequeña proporción tormentas con granizo severo y tormentas con granizo no severo.

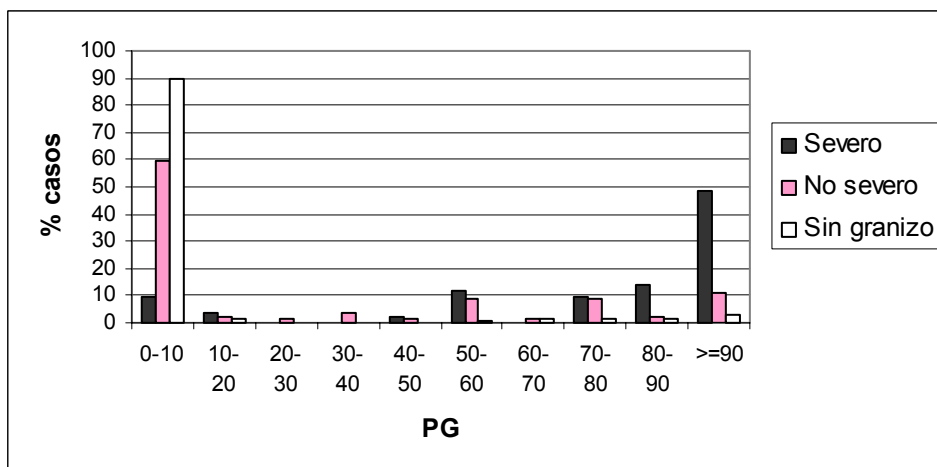


Figura 4.8 Diagrama de barras con la distribución de los valores de PG para las tres categorías de tormentas.

c.- Distribución de casos según la PGS

La distribución del número de casos según los valores de la PGS están representados en la figura 4.9, por medio de un diagrama de barras similar a los utilizados en los dos puntos anteriores. En este diagrama se puede observar lo siguiente:

1. Prácticamente el 100 % de las tormentas sin granizo presenta valores de PGS inferiores a 10.
2. Las tormentas con granizo no severo presentan un máximo muy marcado para valores de PGS inferiores a 10. En este rango de valores se encuentra casi el 80 % de los casos.
3. La distribución del número de casos de tormentas que han dado granizo severo presenta valores de PGS más o menos uniformes en todos los rangos de valores de este parámetro, con cierta tendencia a disminuir lentamente hacia valores altos de la PGS. No hay ningún caso para valores superiores a 80.

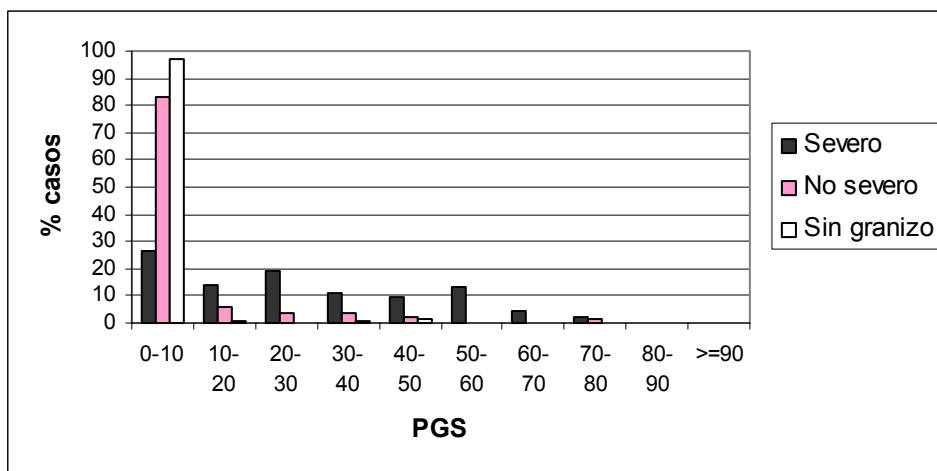


Figura 4.9 Diagrama de barras con la distribución de los valores de PGS para las tres categorías de tormentas.

IV.2.3.- Combinación de criterios

En base a los resultados del punto anterior parece evidente que tratar de discriminar entre tormentas con granizo severo, con granizo no severo, o tormentas sin granizo basándonos en un único criterio de los analizados podría dar unos resultados poco satisfactorios. Obtendríamos una herramienta de detección que daría tasas elevadas de falsas alarmas para alguna de las tres categorías seleccionadas, o bien para evitar esto nos daría probabilidades de detección bajas para otras categorías de granizo. Por ejemplo, a la vista de la figura 4.7, parece evidente que intentar detectar granizo severo con un valor bajo de DVIL (p. ej. $1,5 \text{ gm}^{-3}$) daría como resultado un probabilidad de detección alta pero también una tasa elevada de falsas alarmas, ya que existe un número importante de casos de tormentas con granizo no severo que tienen valores de DVIL superiores a este umbral.

Partiendo de estas consideraciones, parece adecuado pasar a hacer un análisis tratando de combinar los valores de los tres parámetros que estamos usando (DVIL, PG y PGS). En principio, y dado que el número de casos de que disponemos no es muy elevado, consideramos que puede ser suficiente hacer este análisis solamente con combinaciones binarias de estos parámetros, sin entrar en procedimientos más complejos (análisis de componentes principales, por ejemplo), que podrían ser más adecuados cuando se disponga de un mayor número de casos para analizar.

a.- Distribución de casos según valores de DVIL y de PG

En las figuras 4.10.a, 4.10.b y 4.10.c hemos representado el número de casos correspondientes a las tres categorías de granizo que estamos analizando según los valores de DVIL (eje de abscisas) y los de PG (eje de ordenadas). Estas gráficas nos permiten resaltar lo siguiente:

1. La mayor parte de las tormentas que han dado granizo severo (figura 4.10.a) presentan valores altos de PG y valores medios ó altos de DVIL. Aparece también cierto número de casos con valores medios de PG y medios-altos de DVIL, así como algún caso sobre el eje de abscisas (valores muy bajos de PG y medios-bajos de DVIL).
2. El número mayor de casos con granizo no severo (figura 4.10.b) se sitúa sobre el eje de abscisas ($PG < 10$), con valores de DVIL medios (entre $0,5$ y $2,5 \text{ g/m}^3$). Hay también cierto número de casos con granizo no severo en otras áreas del gráfico.
3. La mayor parte de los casos de tormentas sin granizo (figura 4.10.c) quedan agrupados sobre el eje de abscisas, pero con valores bajos de DVIL (inferiores a $1,0 \text{ g/m}^3$). Sólo aparecen algunos casos aislados sobre otras zonas de la gráfica.

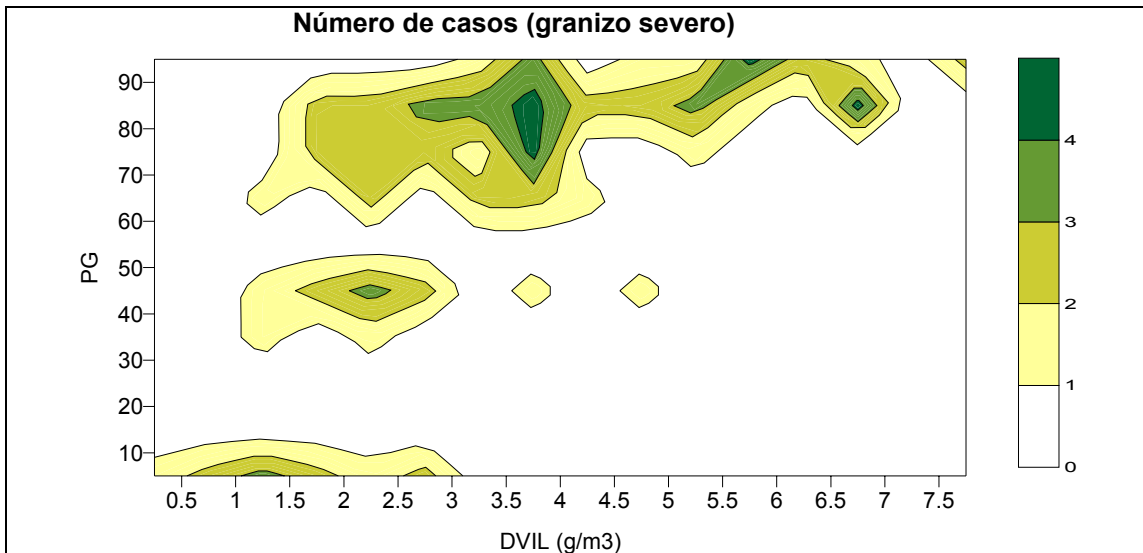


Figura 4.10.a Distribución de tormentas con granizo severo según la relación entre PG y DVIL.

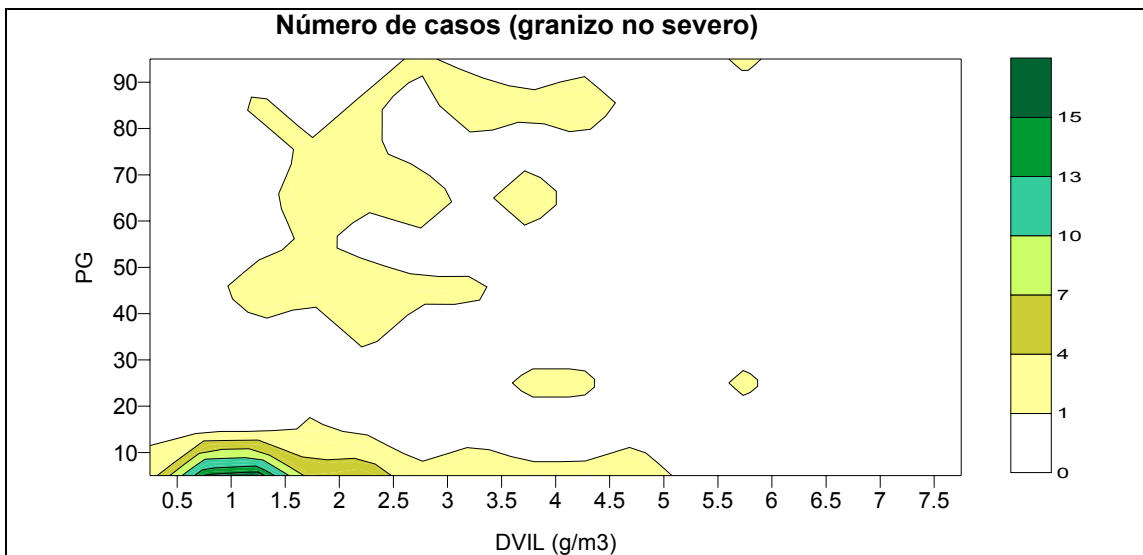


Figura 4.10.b Distribución de tormentas con granizo no severo según la relación entre PG y DVIL.

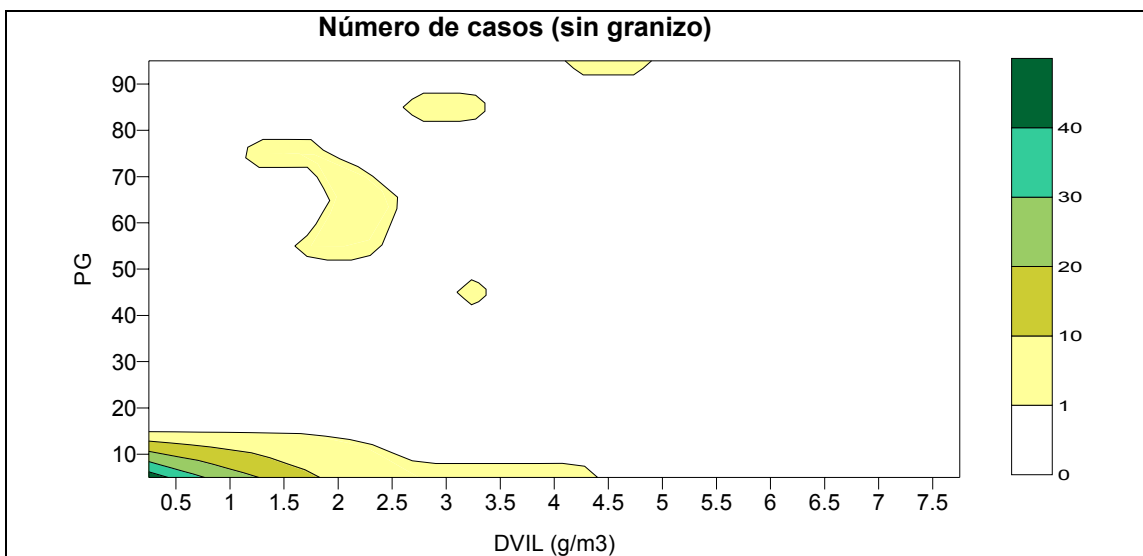


Figura 4.10.c Distribución de tormentas sin granizo según la relación entre PG y DVIL.

b.- Distribución de casos según valores de DVIL y de PGS

Del mismo modo que en el punto anterior, hemos construido unos gráficos para analizar la distribución de casos según los valores de DVIL (eje de abscisas) y de PGS (eje de ordenadas). Estos gráficos ponen de manifiesto que:

1. Todos los casos con granizo severo (figura 4.11.a) quedan representadas sobre una región de la gráfica que indica cierta tendencia al aumento de los valores de PGS con el valor de DVIL.
2. La mayor parte de las tormentas con granizo no severo (figura 4.11.b) se agrupan sobre el eje de abscisas (valores de PGS < 10), pero con valores medios de DVIL (entre 0,5 y 2,5 g/m³). Hay algunos casos de tormentas con granizo no severo en áreas del gráfico que suponen valores medios de PGS y medios-altos de DVIL.
3. Prácticamente todas las tormentas sin granizo (figura 4.11.c) quedan agrupadas sobre el eje de abscisas con valores bajos de DVIL.

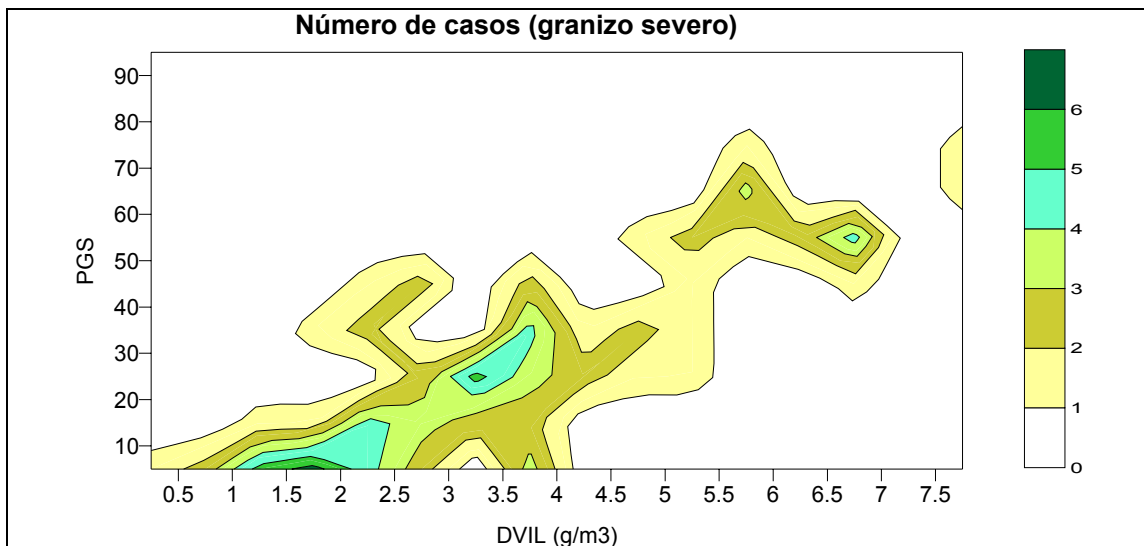


Figura 4.11.a Distribución de tormentas con granizo severo según la relación entre PGS y DVIL.

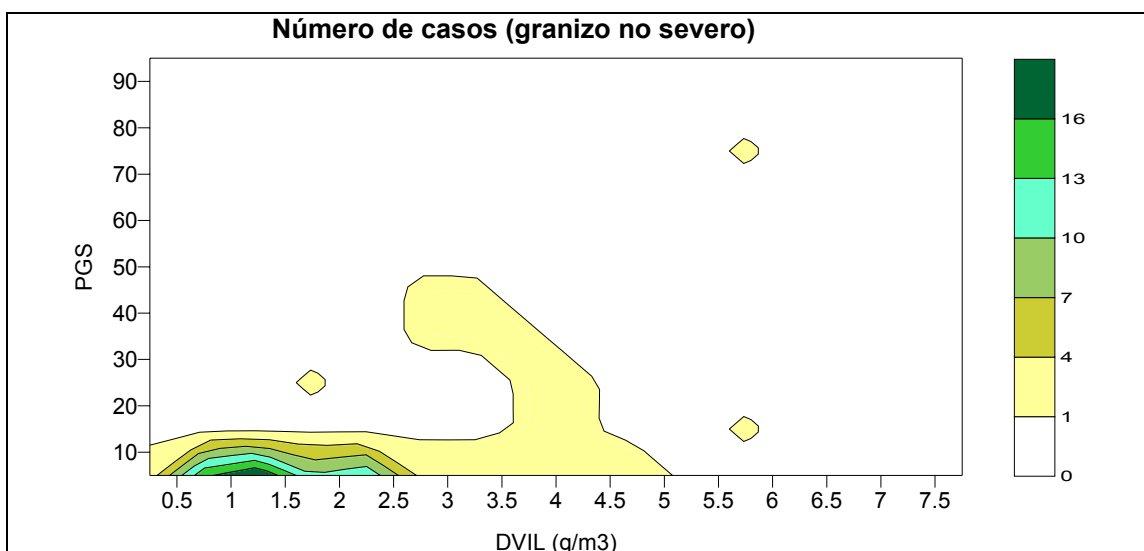


Figura 4.11.b Distribución de tormentas con granizo no severo según la relación entre PGS y DVIL.

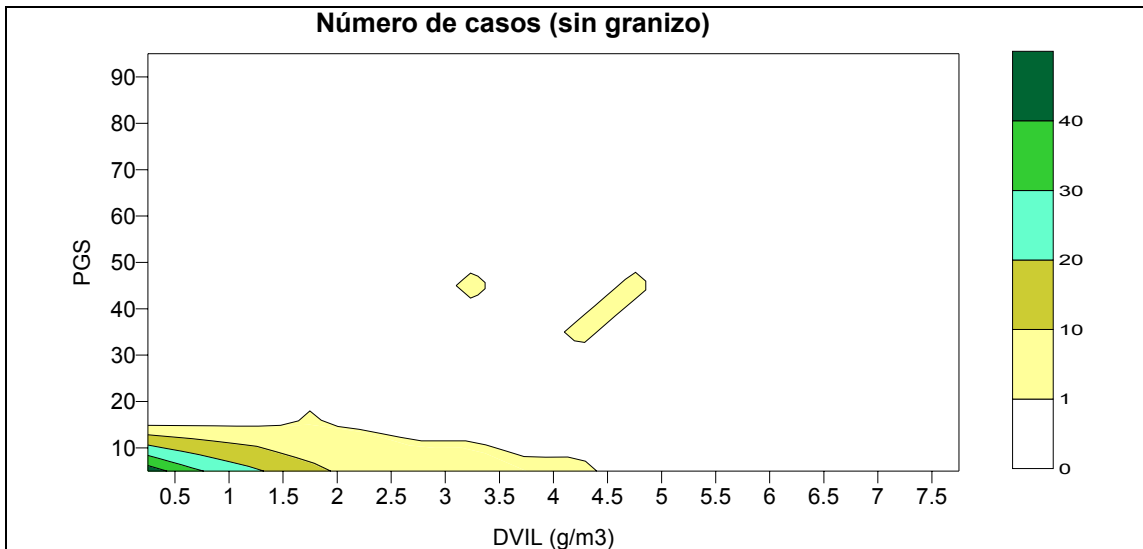


Figura 4.11.c Distribución de tormentas sin granizo según la relación entre PGS y DVIL.

c.- Distribución de casos según valores de PG y de PGS

Finalmente hemos representados los mismos casos, pero en función de los valores de PG (eje de abscisas) y de PGS (eje de ordenadas). Estas gráficas nos permiten resaltar lo siguiente:

1. Casi todas las tormentas con granizo severo (figura 4.12.a) aparecen en zonas de valores medio y bajos de PGS y de valores medios o altos de PG. Hay también un número elevado de casos para valores bajos de ambos parámetros.
2. La mayor parte de las tormentas con granizo no severo (figura 4.12.b) se agrupan en áreas de valores bajos de PGS y en un amplio rango de valores PG, con un máximo para PG < 10.
3. Prácticamente todas las tormentas sin granizo (figura 4.12.c) presentan valores muy bajos de PGS y de PG.

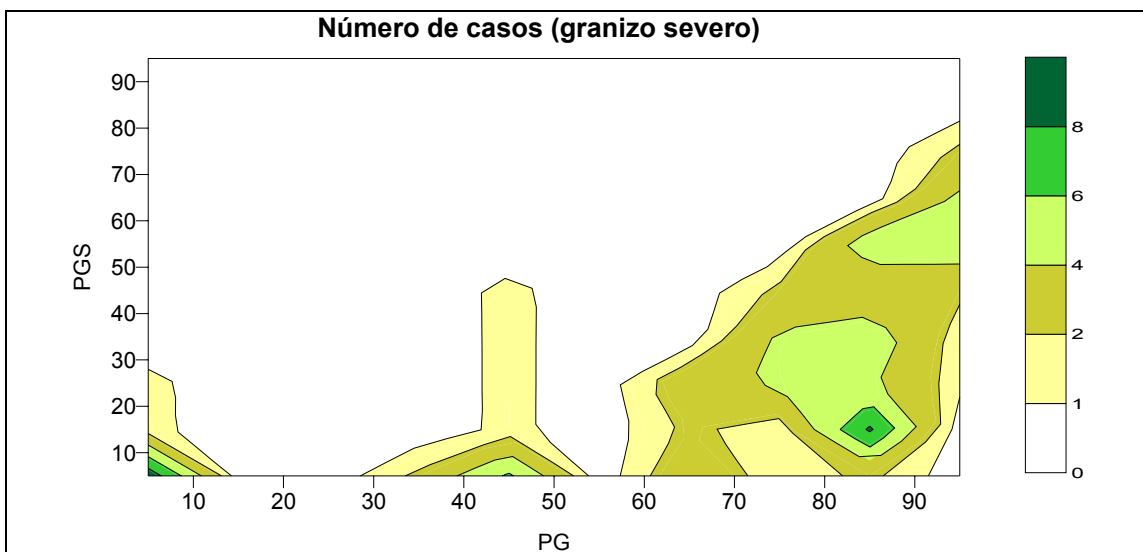


Figura 4.12.a Distribución de tormentas con granizo severo según la relación entre PGS y PG.

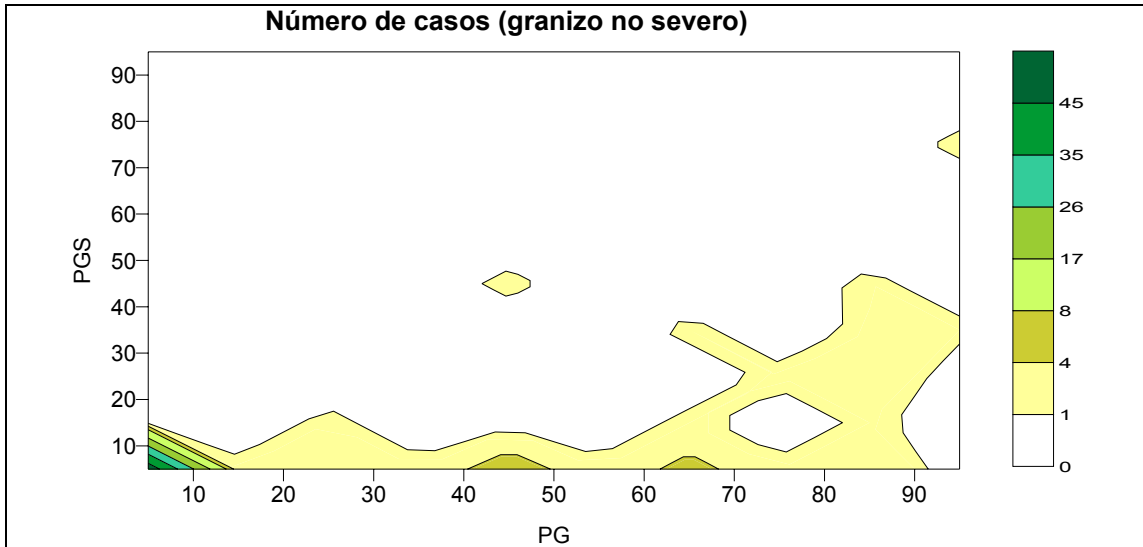


Figura 4.12.b Distribución de tormentas con granizo no severo según la relación entre PGS y PG.

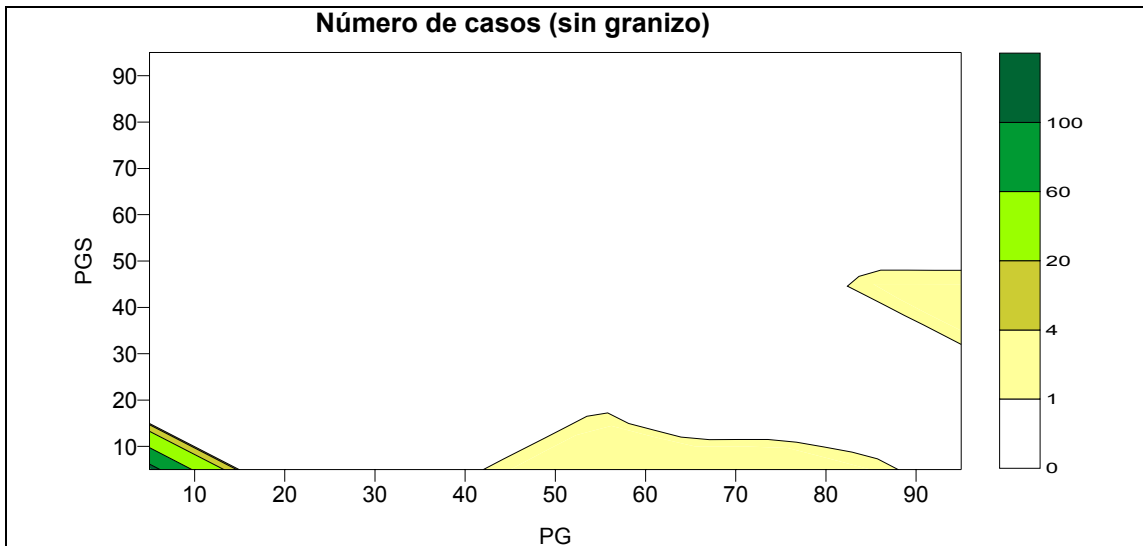


Figura 4.12.c Distribución de tormentas sin granizo según la relación entre PGS y PG.

IV.2.4.- Determinación de umbrales

A partir de los resultados presentados en los apartados anteriores, se ha optado por construir tablas de contingencia correspondientes a diferentes umbrales basados en diversas combinaciones de los criterios seleccionados. Se han usado tablas de contingencia 2x2, que se han considerado más adecuadas para el caso de predicciones dicotómicas, en general, o como en nuestro caso para la detección, por ejemplo, de “granizo severo sí”, o “granizo severo no”. En el capítulo VII (Anexos) se puede ver con cierto detalle la utilización de tablas de contingencia para la verificación de predicciones dicotómicas, así como una relación de diversos índices de verificación que se pueden calcular a partir de ellas, con una explicación de la utilidad y limitaciones de cada uno de ellos.

Para efectuar la selección de los umbrales más favorables a partir de nuestra base de datos, se han elaborado las correspondientes tablas de contingencia para cada posible combinación de criterios. Por un lado se van a seleccionar unos umbrales para determinar la presencia de granizo severo y, por otro, unos umbrales para la detección de granizo no severo. La selección de los umbrales definitivos se va a hacer a partir de las tablas de contingencia obtenidas para cada caso, como información básica de partida, y en base a los valores de los distintos índices que se calculen para cada una de ellas. Los primeros resultados de este proceso se presentaron en la 4ª Conferencia Plinius, San Ambrosio et al. (2002). Finalmente, para los umbrales seleccionados para detectar cada categoría de granizo, se van a calcular los intervalos de confianza para algunos de los índices obtenidos, y se va a tratar de valorar su significación y la independencia de los datos que constituyen las tablas de contingencia respectivas.

a.- Umbrales para detección de granizo severo

Para la determinación de los umbrales de detección de granizo severo se va a partir de la base de datos completa que se ha detallado en el apartado IV.2.1, es decir de la información radar correspondiente a las 45 tormentas analizadas, lo cual supone generar tablas de contingencia que tendrán como frecuencias marginales 84 datos en la fila correspondiente a “Observado Sí”, es decir datos relativos a la presencia de granizo severo, y 206 datos en la fila de “Observado No”, que son los datos de las tormentas que dieron lugar a granizo no severo y de las tormentas que no produjeron granizo. Las frecuencias marginales relativas a las columnas “Predicción Sí” y “Predicción No” se corresponden con los resultados que se obtienen al reproducir cada situación usando cada una de las combinaciones de criterios que queremos valorar.

A la vista de los resultados iniciales que se obtienen con las distintas tablas de contingencia para las numerosas combinaciones de criterios posibles, se decide ajustar a priori dos posibles umbrales para granizo severo. Uno será menos restrictivo, le llamaremos “umbral para granizo severo probable”, y se obtiene de las tablas en las que se observa un mayor número de éxitos, pero también un número relativamente alto de falsas alarmas. El otro posible umbral será más restrictivo, le llamaremos “umbral para granizo severo muy probable”, y sale de las tablas de contingencia con menor número de falsas alarmas, pero también con menor número de éxitos.

En la tabla 4.2 se presentan algunos resultados que se han obtenido para diversos umbrales en los dos grados de restricción que se han establecido. Se presentan las tablas

de contingencia relativas a aquellos umbrales que dan mejores resultados para cada criterio o combinación de criterios. Es decir, que si tomamos por ejemplo las tablas correspondientes al umbral de “ $DVIL \geq 2,0$ ” para granizo severo probable, y al de “ $DVIL \geq 3,5$ ” para granizo severo muy probable, quiere decir que para estos dos valores, usando este criterio, se obtiene un cierto compromiso entre éxitos y falsas alarmas dentro de cada grado de restricción, de manera que al variar estos valores para tener una mejora en determinado sentido, se tiene un empeoramiento en otro.

A partir de las tablas de contingencia se han calculado diferentes índices de verificación que nos van a permitir hacer una selección más objetiva de los umbrales que den un resultado más fiable. En la tabla 4.3 se pueden ver los valores de estos índices para los diferentes umbrales considerados en el caso de “granizo severo probable”, y en la tabla 4.4 se ven los valores correspondientes para los umbrales tenidos en cuenta en el caso de “granizo severo muy probable”.

Considerando los resultados que se presentan en las tablas 4.3 y 4.4 podemos seleccionar un umbral para cada caso, que sea aquel que da unos valores objetivos mejores, aunque pueda resultar difícil de valorar ya que en algunos casos se tienen valores mejores en algunos índices mientras que algunos otros empeoran.

Los dos umbrales seleccionados aparecen resaltados en amarillo en ambas tablas. A continuación explicamos razonadamente por qué se ha seleccionado cada uno de ellos. Dejamos para más adelante el cálculo del grado de significación y de los intervalos de confianza para algunos de los índices obtenidos:

- **Umbral para GRANIZO SEVERO PROBABLE:** se ha optado por la combinación de los criterios: “ $DVIL \geq 1,5$ y $PGS \geq 10$ ”. Como se ve en la tabla 4.3 se trata del umbral que presenta los valores más altos de CSI (índice crítico de aciertos), PC (proporción correcta) y OR (proporción de sucesos raros). El valor de FAR (tasa de falsas alarmas) es uno de los menores (0.22), mientras que el ORSS (índice de pericia de la proporción de sucesos raros) y el BIAS están muy próximos a 1; el BIAS ligeramente inferior indicando que puede haber cierta tendencia a infrapredicir la presencia de granizo severo, y el ORSS indicando un alto grado de asociación entre los casos previstos y observados. También se obtienen los mejores valores del HSS (índice de pericia de Heidke), que indica una mejora del 67% sobre la decisión aleatoria y del HK (discriminante de Hanssen y Kuipers), revelando una buena capacidad para separar los casos con granizo severo de aquellos en los que no está presente.
- **Umbral para GRANIZO SEVERO MUY PROBABLE:** hemos seleccionado la siguiente combinación de criterios: “ $DVIL \geq 2,0$ y $PGS \geq 20$ ”. En la tabla 4.4 se observa que se trata de un umbral que presenta unos valores altos de POD (probabilidad de detección), CSI y PC, aunque no sean los mejores, pero presenta un valor de FAR muy bajo (0,18), mejorado únicamente por el umbral “ $PGS \geq 25$ ”, que por otro lado da peores resultados en los demás índices. El BIAS, algo inferior a 1, indica que puede haber cierta tendencia a infrapredicir la presencia de granizo severo. Con este umbral se obtiene el mejor valor del OR y un valor de ORSS muy próximo a 1, que indica un alto grado de asociación entre los casos previstos y observados. Con este umbral también se obtienen valores muy buenos del HSS, que indica una mejora del 58 % sobre la decisión aleatoria y del HK, que revela una buena capacidad para separar los casos con granizo severo y sin granizo severo.

a)				b)			
PG >= 50				PG >= 80			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	71	13	84	obs. SI	53	31	84
obs. NO	37	169	206	obs. NO	17	189	206
total	108	182	290	total	70	220	290
PGS >= 10				PGS >= 25			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	62	22	84	obs. SI	43	41	84
obs. NO	18	188	206	obs. NO	9	197	206
total	80	210	290	total	52	238	290
PGS >= 10 y PG >= 50				PGS >= 20 y PG >= 80			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	60	24	84	obs. SI	43	41	84
obs. NO	16	190	206	obs. NO	10	196	206
total	76	214	290	total	53	237	290
DVIL >= 2,0				DVIL >= 3,5			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	70	14	84	obs. SI	41	43	84
obs. NO	53	153	206	obs. NO	20	186	206
total	123	167	290	total	61	229	290
DVIL >= 2,0 y PG >= 40				PG >= 80 o DVIL >= 2,0 y PGS >= 20			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	67	17	84	obs. SI	60	24	84
obs. NO	28	178	206	obs. NO	19	187	206
total	95	195	290	total	79	211	290
DVIL >= 1,5 y PGS >= 10				DVIL >= 2,0 y PGS >= 20			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	62	22	84	obs. SI	49	35	84
obs. NO	17	189	206	obs. NO	11	195	206
total	79	211	290	total	60	230	290

Tabla 4.2 Tablas de contingencia obtenidas para la selección de (a) umbrales de detección de “granizo severo probable” y (b) umbrales de detección de “granizo severo muy probable”.

Umbral:	PG >=	50						
	POD =	0,85	BIAS=	1,29	HSS=	0,61		
	FAR=	0,34	PC=	0,83	OR=	24,95		
	CSI=	0,59	HK=	0,67	ORSS=	0,92		
Umbral:	PGS>=	10						
	POD =	0,74	BIAS=	0,95	HSS=	0,66		
	FAR=	0,23	PC=	0,86	OR=	29,43		
	CSI=	0,61	HK=	0,65	ORSS=	0,93		
Umbral:	PGS>=	10	y	PG >=	50			
	POD =	0,71		BIAS=	0,90	HSS=	0,66	
	FAR=	0,21		PC=	0,86	OR=	29,69	
	CSI=	0,60		HK=	0,64	ORSS=	0,93	
Umbral:	DVIL>=	2,0						
	POD =	0,83	BIAS=	1,46	HSS=	0,51		
	FAR=	0,43	PC=	0,77	OR=	14,43		
	CSI=	0,51	HK=	0,58	ORSS=	0,87		
Umbral:	DVIL>=	2,0	y	PG >=	40			
	POD =	0,80		BIAS=	1,13	HSS=	0,64	
	FAR=	0,29		PC=	0,84	OR=	25,05	
	CSI=	0,60		HK=	0,66	ORSS=	0,92	
Umbral:	DVIL>=	1,5	y	PGS>=	10			
	POD =	0,74		BIAS=	0,94	HSS=	0,67	
	FAR=	0,22		PC=	0,87	OR=	31,33	
	CSI=	0,61		HK=	0,66	ORSS=	0,94	

Tabla 4.3 Valores de los índices de verificación calculados para las tablas de contingencia relativas a los umbrales para detección de “granizo severo probable”.

Umbral:	PG >=	80						
	POD =	0,63	BIAS=	0,83	HSS=	0,58		
	FAR=	0,24	PC=	0,83	OR=	19,01		
	CSI=	0,52	HK=	0,55	ORSS=	0,90		
Umbral:	PGS>=	25						
	POD =	0,51	BIAS=	0,62	HSS=	0,53		
	FAR=	0,17	PC=	0,83	OR=	22,96		
	CSI=	0,46	HK=	0,47	ORSS=	0,92		
Umbral:	PGS>=	20	y	PG >=	80			
	POD =	0,51		BIAS=	0,63	HSS=	0,52	
	FAR=	0,19		PC=	0,82	OR=	20,56	
	CSI=	0,46		HK=	0,46	ORSS=	0,91	
Umbral:	DVIL>=	3,5						
	POD =	0,49	BIAS=	0,73	HSS=	0,43		
	FAR=	0,33	PC=	0,78	OR=	8,87		
	CSI=	0,39	HK=	0,39	ORSS=	0,80		
Umbral:	PG >=	80	o	DVIL>=	2,0	y	PGS>=	20
	POD =	0,71		BIAS=	0,94		HSS=	0,63
	FAR=	0,24		PC=	0,85		OR=	24,61
	CSI=	0,58		HK=	0,62		ORSS=	0,92
Umbral:	DVIL>=	2,0	y	PGS>=	20			
	POD =	0,58		BIAS=	0,71	HSS=	0,58	
	FAR=	0,18		PC=	0,84	OR=	24,82	
	CSI=	0,52		HK=	0,53	ORSS=	0,92	

Tabla 4.4 Valores de los índices de verificación calculados para las tablas de contingencia relativas a los umbrales para detección de “granizo severo muy probable”.

b.- Umbrales para detección de granizo no severo

Para la determinación de los umbrales de detección de granizo no severo se ha considerado la misma base de datos, pero eliminando las 8 tormentas que dieron granizo severo, es decir haremos un análisis similar al anterior pero con la información radar de 37 tormentas. De este modo ahora se van a generar tablas de contingencia que tendrán como frecuencias marginales 82 datos en la fila correspondiente a “Observado Sí”, es decir datos relativos a la presencia de granizo no severo, y 124 datos en la fila de “Observado No”, que son los datos que provienen de tormentas que no dieron lugar a granizo. Las frecuencias marginales relativas a las columnas “Predicción Sí” y “Predicción No” se obtienen igual que en el apartado anterior.

Con los resultados iniciales que se tienen en las distintas tablas de contingencia obtenidas para estas situaciones de granizo, se decide establecer otros dos posibles umbrales. Uno menos restrictivo, al que llamaremos “umbral para granizo no severo probable”, lo ajustaremos a partir de las tablas en que se observa un mayor número de éxitos, aunque también tienen un número relativamente alto de falsas alarmas. El otro umbral, más restrictivo, es el que llamaremos “umbral para granizo no severo muy probable”, y se refiere a los valores para los que se obtiene un menor número de falsas alarmas, pero también un menor número de éxitos. Las tablas de contingencia con algunos resultados que se han obtenido para estos dos grados de restricción se pueden ver en la tabla 4.5.

Para hacer la selección objetiva de unos umbrales para la categoría de granizo no severo usaremos también los índices de verificación calculados a partir de las tablas de contingencia (tabla 4.5). En la tabla 4.6 se pueden ver los valores de estos índices para los umbrales en el caso de “granizo no severo probable”, y en la tabla 4.7 se ven los valores para el caso de “granizo no severo muy probable”.

Considerando todos estos valores podemos seleccionar un umbral para cada caso, siguiendo criterios similares a los del apartado anterior. Los umbrales finalmente seleccionados aparecen resaltados también en amarillo en ambas tablas. A continuación se explica cómo se ha llevado a cabo la selección de los dos umbrales correspondientes a la categoría de “granizo no severo”:

- **Umbral para GRANIZO NO SEVERO PROBABLE:** se ha optado por utilizar únicamente el criterio: “ $DVIL \geq 1,3$ ”. Como se ve en la tabla 4.6 se trata del umbral que presenta los mejores valores de POD y CSI. Aunque el valor de FAR es relativamente alto (0.41), debido a que las demás opciones dan valores de POD bajos, con este umbral se obtiene el mejor CSI. El valor del BIAS es algo mayor que 1. El criterio basado en “ $DVIL \geq 1,3$ o $PG \geq 20$ ” da los mismos valores para todos los índices, así como idénticas tablas de contingencia, por lo que consideramos que esta sentencia no mejora la de “ $DVIL \geq 1,3$ ”, que por otro lado es más sencilla. Los valores que se obtienen para los demás índices calculados, PC, HK, HSS, OR y ORSS se encuentran entre los más favorables, aunque son valores muy similares a los de los otros umbrales considerados.

a)				b)			
PG >= 20				PG >= 50			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	31	51	82	obs. SI	26	56	82
obs. NO	11	113	124	obs. NO	11	113	124
total	42	164	206	total	37	169	206
PG >= 10				DVIL >= 1,5			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	33	49	82	obs. SI	49	33	82
obs. NO	13	111	124	obs. NO	32	92	124
total	46	160	206	total	81	125	206
DVIL >= 1,3				DVIL >= 1,5 y PG >= 20			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	60	22	82	obs. SI	29	53	82
obs. NO	42	82	124	obs. NO	11	113	124
total	102	104	206	total	40	166	206
DVIL >= 1,0 y PG >= 10				DVIL >= 2,0 o PG >= 30			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	33	49	82	obs. SI	45	37	82
obs. NO	13	111	124	obs. NO	18	106	124
total	46	160	206	total	63	143	206
DVIL >= 1,3 o PG >= 20				PG >= 20 - 6,67*DVIL			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	60	22	82	obs. SI	38	44	82
obs. NO	42	82	124	obs. NO	16	108	124
total	102	104	206	total	54	152	206
PG >= 20 - 8,33*DVIL				PG >= 30 - 10,00*DVIL			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	40	42	82	obs. SI	38	44	82
obs. NO	19	105	124	obs. NO	14	110	124
total	59	147	206	total	52	154	206

Tabla 4.5 Tablas de contingencia obtenidas para la selección de (a) umbrales de detección de “granizo no severo probable” y (b) umbrales de detección de “granizo no severo muy probable”.

Umbral:	PG >=	20			
	POD =	0,38	BIAS=	0,51	HSS= 0,32
	FAR=	0,26	PC=	0,70	OR= 6,24
	CSI=	0,33	HK=	0,29	ORSS= 0,72
Umbral:	PG>=	10			
	POD =	0,40	BIAS=	0,56	HSS= 0,32
	FAR=	0,28	PC=	0,70	OR= 5,75
	CSI=	0,35	HK=	0,30	ORSS= 0,70
Umbral:	DVIL>=	1,3			
	POD =	0,73	BIAS=	1,24	HSS= 0,38
	FAR=	0,41	PC=	0,69	OR= 5,32
	CSI=	0,48	HK=	0,39	ORSS= 0,68
Umbral:	DVIL>=	1,0	y	PG >=	10
	POD =	0,40		BIAS=	0,56
	FAR=	0,28		PC=	0,70
	CSI=	0,35		HK=	0,30
				HSS=	0,32
				OR=	5,75
				ORSS=	0,70
Umbral:	DVIL>=	1,3	o	PG >=	20
	POD =	0,73		BIAS=	1,24
	FAR=	0,41		PC=	0,69
	CSI=	0,48		HK=	0,39
				HSS=	0,38
				OR=	5,32
				ORSS=	0,68
Umbral:	PG >=	20 - 8,33*DVIL			
	POD =	0,49	BIAS=	0,72	HSS= 0,35
	FAR=	0,32	PC=	0,70	OR= 5,26
	CSI=	0,40	HK=	0,33	ORSS= 0,68

Tabla 4.6 Valores de los índices de verificación calculados para las tablas de contingencia relativas a los umbrales para detección de “granizo no severo probable”.

Umbral:	PG >=	50						
	POD =	0,32	BIAS=	0,45	HSS=	0,25		
	FAR=	0,30	PC=	0,67	OR=	4,77		
	CSI=	0,28	HK=	0,23	ORSS=	0,65		
Umbral:	DVIL >=	1,5						
	POD =	0,60	BIAS=	0,99	HSS=	0,34		
	FAR=	0,40	PC=	0,68	OR=	4,27		
	CSI=	0,43	HK=	0,34	ORSS=	0,62		
Umbral:	DVIL >=	1,5	y	PG >=	20			
	POD =	0,35		BIAS=	0,49	HSS=	0,29	
	FAR=	0,28		PC=	0,69	OR=	5,62	
	CSI=	0,31		HK=	0,26	ORSS=	0,70	
Umbral:	DVIL >=	2,0	o	PG >=	30			
	POD =	0,55		BIAS=	0,77	HSS=	0,42	
	FAR=	0,29		PC=	0,73	OR=	7,16	
	CSI=	0,45		HK=	0,40	ORSS=	0,75	
Umbral:	PG >=	20 - 6,67*DVIL						
	POD =	0,46	BIAS=	0,66	HSS=	0,35		
	FAR=	0,30	PC=	0,71	OR=	5,83		
	CSI=	0,39	HK=	0,33	ORSS=	0,71		
Umbral:	PG >=	30 - 10,00*DVIL						
	POD =	0,46	BIAS=	0,63	HSS=	0,37		
	FAR=	0,27	PC=	0,72	OR=	6,79		
	CSI=	0,40	HK=	0,35	ORSS=	0,74		

Tabla 4.7 Valores de los índices de verificación calculados para las tablas de contingencia relativas a los umbrales para detección de “granizo no severo muy probable”.

- **Umbral para GRANIZO NO SEVERO MUY PROBABLE:** en este caso se ha optado por la combinación del criterios: “ $DVIL \geq 2,0$ o $PG \geq 30$ ”. En la tabla 4.7 se puede ver que presenta los valores más altos de POD, CSI, PC y OR, excepto para el POD que se obtiene con el umbral “ $DVIL \geq 1,5$ ”, que es algo superior, aunque en este caso su FAR es mucho más elevado (0,40), lo que hace que con éste último criterio no se mejore el valor del CSI. El valor de FAR (0.29) se ve mejorado por algunos de los otros umbrales, pero en estos casos el valor del resto de los índices es peor que el que conseguimos con este umbral. El ORSS y el BIAS están ligeramente por debajo de 1; el BIAS (0,77) indicando cierta tendencia a infrapredicir la presencia de granizo no severo, y el ORSS de 0,75, que denota un alto grado de asociación entre los casos previstos y observados. También se observan en este caso los mejores valores de HSS, que indica una mejora del 42 % sobre la decisión aleatoria, y del HK, revelando también una buena capacidad para separar los casos con y sin presencia de granizo no severo.

Teniendo en cuenta este análisis, se consideró adecuado durante la campaña del 2002 poner en entornos operativos, pero de manera experimental, un módulo de detección de granizo con cuatro categorías basadas en los umbrales que hemos definido:

- GRANIZO SEVERO MUY PROBABLE: cuando la $DVIL \geq 2,0$ y la $PGS \geq 20$.
- GRANIZO SEVERO PROBABLE: cuando la $DVIL \geq 1,5$ y la $PGS \geq 10$.
- GRANIZO PEQUEÑO MUY PROBABLE: cuando la $DVIL \geq 2,0$ ó la $PG \geq 30$.
- GRANIZO PEQUEÑO PROBABLE: cuando la $DVIL \geq 1,3$.

La implementación de este módulo se hará de manera que a cada célula 3D identificada por el procedimiento YRADAR se le tratará de asignar una categoría de granizo en orden descendente de adversidad. Es decir se comprobará en primer lugar si cumple los requisitos para estar en la categoría de “granizo severo muy probable”, si cumple estas condiciones quedará asignada a ella, si no las cumple se irán comprobando las restantes categorías hacia las de menor adversidad.

IV.2.5.- Independencia, significación e intervalos de confianza

En el apartado IV.1 hemos apuntado la dificultad que entraña obtener una información fiable sobre granizadas. Este hecho puede plantear ciertas dudas de cara a considerar la posible calidad de la muestra de datos con la que hemos trabajado, ya que además no partimos de un conocimiento fiable en cuanto a la climatología de este meteoro, es decir, no podemos responder con certeza las cuestiones ¿qué porcentaje de tormentas en nuestro país dan lugar a granizo?, ¿en cuántas de las tormentas que dan granizo éste es severo?. En este sentido sólo hay algunos estudios locales, como el de Pascual (2002) que señala determinadas proporciones para las tormentas en los Llanos de Lleida, a partir de los datos registrados por la ADV. Por este motivo, se podría pensar que nuestros datos estuviesen sesgados ya que desconocemos si la proporción de observaciones de granizo y de no granizo se aproxima o no a la climatología del fenómeno, lo cual podría de alguna manera influir en los resultados obtenidos. Para tratar de subsanar esta posible deficiencia se han evaluado en los apartados anteriores determinados índices (como el HSS, el HK, el OR y el ORSS) que son considerados como medidas más robustas y menos sensibles a sesgos en los datos utilizados que otros índices más clásicos (POD, FAR, CSI), y que hace que sean prácticamente invariantes a ciertos desajustes (Stephenson, 2000).

Las medidas de verificación que hemos calculado a partir de las tablas de contingencia son, por estos motivos, estimaciones de ciertos valores que llevan asociadas incertidumbres muestrales y, por lo tanto, cabe la posibilidad de que los umbrales seleccionados como buenos hayan dado los mejores resultados para estos índices debido simplemente a un muestreo casual, y sobre todo, según indica Stephenson (2000), si estos valores se hubiesen calculado a partir de un número insuficiente de datos independientes. En los siguientes apartados, a partir de los datos de las tablas de contingencia correspondientes a los cuatro umbrales seleccionados, se va a realizar un test de independencia, a calcular intervalos de confianza para el POD y el FAR, a calcular el error estándar del HK y a realizar un test de significación del OR. A pesar de que la base de datos con la que hemos trabajado se puede considerar como no aleatoria, consideramos que esto nos permitirá valorar si los resultados obtenidos en la sección anterior nos están revelando un buen comportamiento de los umbrales seleccionados, ya que en definitiva no pretendemos hacer un estudio específico acerca de la muestra de tormentas que constituyen la base de datos, sino simplemente valorar el significado de los índices calculados.

a.- Test de independencia

Para los cuatro umbrales seleccionados los valores del ORSS obtenidos se pueden ver en la tabla 4.8.

CATEGORÍA DE GRANIZO	ORSS
SEVERO MUY PROBABLE	0,92
SEVERO PROBABLE	0,94
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,75
PEQUEÑO PROBABLE	0,68

Tabla 4.8 Valores del ORSS para los cuatro umbrales seleccionados.

Estos valores del ORSS, próximos a 1, indican claramente un alto grado de asociación entre los datos observados y las datos previstos por el módulo de detección de granizo para cada categoría establecida, especialmente en las categorías de granizo severo.

Vamos a efectuar también el test χ^2 de independencia para las cuatro tablas de contingencia correspondientes a los umbrales de detección seleccionados, que son las que aparecen en la tabla 4.9. En nuestro caso efectuaremos este test con un nivel de significación $\alpha = 0,01$, y para 1 grado de libertad, al tratarse de tablas 2x2.

a)				c)			
DVIL >= 2,0		y PGS >= 20		DVIL >= 2,0		o PG >= 30	
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	49	35	84	obs. SI	45	37	82
obs. NO	11	195	206	obs. NO	18	106	124
total	60	230	290	total	63	143	206
b)				d)			
DVIL >= 1,5		y PGS >= 10		DVIL >= 1,3			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	62	22	84	obs. SI	60	22	82
obs. NO	17	189	206	obs. NO	42	82	124
total	79	211	290	total	102	104	206

Tabla 4.9 Tablas de contingencia para las que se va a efectuar el test de independencia χ^2 de Pearson, correspondientes a los cuatro umbrales seleccionados, a) granizo severo muy probable, b) granizo severo probable, c) granizo pequeño muy probable y d) granizo pequeño probable.

Para analizar la independencia entre los datos observados y previstos con este test, establecemos la siguiente Hipótesis nula (H_0) y alternativa (H_1):

- H_0 : los datos de granizo observado y de granizo previsto son independientes.
- H_1 : los datos de granizo observado y de granizo previsto no son independientes.

Los resultados obtenidos con este test se pueden ver en la tabla 4.10, donde aparece el valor de $\chi^2(0,01; 1)$ para efectuar el contraste, el valor del estadístico J obtenidos para cada caso, y el valor de significación correspondiente a este valor, $\text{prob}(J)$, es decir, la probabilidad de que con este valor se cumpla la hipótesis nula.

CATEGORÍA DE GRANIZO	$\chi^2(0,01; 1)$	J	Prob(J)
SEVERO MUY PROBABLE	6,63	98,92	$2,63 \cdot 10^{-23}$
SEVERO PROBABLE	6,63	126,10	$2,93 \cdot 10^{-29}$
PEQUEÑO MUY PROBABLE	6,63	36,00	$1,97 \cdot 10^{-9}$
PEQUEÑO PROBABLE	6,63	28,94	$7,45 \cdot 10^{-8}$

Tabla 4.10 Valores obtenidos al efectuar el test de independencia χ^2 de Pearson para los cuatro umbrales seleccionados.

Dado que en todos los casos el valor de J es muy superior al de $\chi^2(0,01; 1)$ queda rechazada la Hipótesis nula, H_0 , con un nivel de significación por lo menos del 1 %, de manera que hay una probabilidad muy alta de que exista una asociación importante

entre los datos de detección obtenidos por medio del módulo implementado y los datos de observación de granizo que hemos usado para su desarrollo. En la última columna de la tabla 4.10 se ha calculado a partir de la distribución $\chi^2(0,01; 1)$ la probabilidad de que para cada valor de J obtenido se cumpla la hipótesis nula, es decir la de que los datos observados y previstos en cada tabla de contingencia sean independientes. Se aprecia en esta columna que las probabilidades obtenidas son prácticamente nulas.

b.- Intervalos de confianza para POD y FAR

En este apartado se valorará hasta qué punto los valores obtenidos para estos dos índices (POD y FAR) están influidos por el proceso muestral y calcularemos a partir de la muestra estudiada los valores máximo y mínimo que tendrían estos parámetros para un nivel de significación $\alpha = 0,01$, para el cual, a partir de la distribución normal, obtenemos un cuantil $z_{\alpha/2} = z_{0,005} = 2,575$.

Para los valores de POD y de FAR obtenidos en nuestro caso, ver tablas 4.3, 4.4, 4.6 y 4.7, se obtienen los intervalos de confianza que presentamos en las tablas 4.11 y 4.12.

CATEGORÍA DE GRANIZO	POD	Máximo	Mínimo
SEVERO MUY PROBABLE	0,58	0,71	0,44
SEVERO PROBABLE	0,74	0,84	0,60
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,55	0,68	0,41
PEQUEÑO PROBABLE	0,73	0,84	0,59

Tabla 4.11 Intervalos de confianza de los valores de POD obtenidos para los cuatro umbrales seleccionados.

CATEGORÍA DE GRANIZO	FAR	Máximo	Mínimo
SEVERO MUY PROBABLE	0,18	0,34	0,09
SEVERO PROBABLE	0,22	0,35	0,12
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,29	0,45	0,17
PEQUEÑO PROBABLE	0,41	0,54	0,30

Tabla 4.12 Intervalos de confianza de los valores de FAR obtenidos para los cuatro umbrales seleccionados.

Con estos resultados se puede afirmar con una confianza del 99 % que, para los cuatro umbrales seleccionados, los valores de POD tienen un valor significativamente alto y que los valores de FAR tienen un valor significativamente bajo. Es decir, en el peor de los casos, el valor de POD no es probable que sea inferior a 0,41, que sería la categoría de granizo pequeño muy probable, y el valor de FAR no es probable que sea superior a 0,54, que sería la categoría de granizo pequeño probable.

c.- Error estándar para el HK

Los valores obtenidos en nuestro caso están presentados en la tabla 4.13, en la que se da el error estándar obtenido y el valor mínimo del HK correspondiente a cada categoría de detección de granizo.

CATEGORÍA DE GRANIZO	HK	error	HK-error
SEVERO MUY PROBABLE	0,53	0,06	0,47
SEVERO PROBABLE	0,66	0,05	0,61
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,40	0,06	0,34
PEQUEÑO PROBABLE	0,39	0,06	0,33

Tabla 4.13 Error estándar del HK y valor mínimo que podría tener para los cuatro umbrales seleccionados.

Como se ve en esta tabla, los valores del error estándar calculados son bastante pequeños, por lo que se puede afirmar que los valores que se han obtenido para el HK serán significativamente mayores que cero.

d.- Test de significación del OR

Si establecemos las hipótesis de trabajo siguientes:

- H_0 : los datos de granizo observado y de granizo previsto son independientes.
- H_1 : los datos de granizo observado y de granizo previsto no son independientes.

Considerando un nivel de significación $\alpha = 0,01$, y el cuantil de la distribución normal, que en nuestro caso será $z_{\alpha/2} = z_{0,005} = 2,575$, con nuestros datos se obtienen los valores de $\ln(\text{OR})$, del error estándar y del producto $L_{\min} = \text{error} * z_{\alpha/2}$ que aparecen en la tabla 4.14 para los cuatro umbrales seleccionados.

CATEGORÍA DE GRANIZO	$\ln(\text{OR})$	error	L_{\min}
SEVERO MUY PROBABLE	3,21	0,38	0,98
SEVERO PROBABLE	3,44	0,35	0,91
PEQUEÑO MUY PROBABLE	1,97	0,34	0,87
PEQUEÑO PROBABLE	1,67	0,31	0,81

Tabla 4.14 Test de significación del OR, con el valor de su error estándar y el valor mínimo admisible (L_{\min}) para un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

Con estos resultados podemos afirmar con una confianza del 99 % que no se cumple la Hipótesis nula para ningún umbral seleccionado. Por lo tanto, los datos previstos por nuestro módulo de detección de granizo no son independientes de las observaciones, y por consiguientes, con al menos un 99 % de confianza, los umbrales seleccionados son útiles y los índices obtenidos no se deben simplemente a un muestreo casual.

IV.3.- VERIFICACIÓN CON LA CAMPAÑA 2002

Como ya se ha mencionado, los umbrales obtenidos a partir de los datos de la campaña del 2001 se incluyeron en un módulo experimental de granizo dentro de la aplicación YRADAR, para evaluar su comportamiento durante la campaña de 2002. Con los resultados de esta campaña se ha llevado a cabo, por un lado, una evaluación subjetiva de la utilidad del módulo y, por otro, una verificación objetiva, contrastando con datos de granizo observados obtenidos durante el periodo de primavera-verano del año indicado.

IV.3.1.- Evaluación subjetiva

A lo largo de la campaña de primavera-verano de 2002 los predictores de los distintos GPs y del CNP pudieron utilizar la nueva versión de la aplicación YRADAR que incluía el módulo de granizo desarrollado, además de otras mejoras. Una vez finalizada la campaña se distribuyeron entre los predictores unas hojas de encuesta, dado que es muy importante la valoración, por parte de los usuarios, de la utilidad del procedimiento en los entornos operativos. En esta encuesta, se pedía, entre otras cosas, una valoración general de la nueva versión de la aplicación YRADAR, incluyendo el módulo de granizo, con cuatro posibles opciones a elegir, así como la posibilidad de añadir otros comentarios a la misma. Las posibles opciones de valoración eran:

- Ha añadido información fundamental para las tareas de vigilancia.
- Ha añadido información de importancia secundaria.
- No ha supuesto mejora significativa.
- Supone demasiada información que no es usada en las tareas operativas.

Los resultados de esta valoración se pueden resumir como sigue: el 50 % de las encuestas considera que se añade información fundamental para las tareas de vigilancia, mientras que el otro 50% considera que añade información de importancia secundaria. Por algunos comentarios añadidos en algunas de las encuestas, es importante tener en cuenta que con la aplicación YRADAR se pone a disposición del predictor demasiada información, que en ocasiones no va a ser usada de manera directa en las tareas operativas de vigilancia. Esto hace que veamos la necesidad de simplificar hasta donde sea posible esta información, y de generar productos más elaborados, más concretos y sencillos de usar. En este sentido, consideramos necesario reducir las cuatro categorías inicialmente establecidas en la diagnosis de granizo.

IV.3.2.- Modificaciones en la altura de los CAPPIS

A lo largo del año 2002 el Servicio de Teledetección del INM detectó un error en los manuales de la aplicación ERIS del Centro Regional Radar, asociado a la altura de los CAPPIS, comprobándose que la aplicación tomaba como referencia la altitud del radar en lugar de tomar como referencia el nivel del mar. Esto tiene como consecuencia que el nivel del CAPPIS-0 no esté a una altura de 500 m sobre el nivel del radar, y que la altitud de los restantes CAPPIS no sea constante para todos los radares. Para subsanar estos errores el Servicio de Teledetección corrigió la mencionada aplicación de manera que el CAPPIS-0 tenga una altitud de 500 m sobre el nivel del radar, y que la altitud de los restantes CAPPIS sea la misma para todos los radares.

A priori, hay que suponer que estas correcciones en el proceso de generación de CAPPIS van a tener cierta repercusión en los resultados obtenidos hasta ahora en el desarrollo y determinación de umbrales de detección de granizo. En principio se considera la posibilidad de llevar a cabo un reproceso para obtener los CAPPIS corregidos del mayor número posible de situaciones de granizo de los años 2001 y 2002 (ver tablas 4.1, 4.15.a y 4.15.b), para realizar un nuevo análisis del comportamiento de los criterios, y un nuevo ajuste de umbrales. En este sentido aparecen dos dificultades, por un lado, sólo es posible reproducir un número limitado de situaciones que tenían archivadas en el CMT de Cataluña y, por otro lado, la modificación de la aplicación no está operativa de manera simultánea en todos los radares del INM, y no es hasta finales de septiembre cuando lo está en todos ellos. A consecuencia de esto, y para mantener cierta homogeneidad en los datos a tratar, se opta por no incluir en la base de datos definitiva del 2002 la información relativa a diversas granizadas en la cobertura del radar de Valencia, ya que fueron archivadas con los CAPPIS ya corregidos.

Se toma también la determinación de llevar a cabo un análisis subjetivo de la repercusión que estas modificaciones tienen en el procedimiento desarrollado para aquellas situaciones que han podido ser reprocesadas, comparando los resultados con los obtenidos previamente a partir de los CAPPIS sin corregir. Presentamos a continuación dos ejemplos extraídos de este proceso de comparación.

a.- Comparación de la situación del 8 de julio de 2001

Este día tuvo lugar una granizada severa con granizo del tamaño de pelotas de golf en Morella (Castellón). En la figura 4.13 presentamos los productos básicos de la aplicación YRADAR_3D a las 17:00 UTC para los CAPPIS corregidos y sin corregir. En la figura 4.14 se pueden ver, para ambos casos, las ampliaciones correspondientes a la célula que afectó a Morella, a esa misma hora. En la figura 4.15 se aprecia la evolución de la PG y la PGS, y en la figura 4.16 la de la DVIL, en ambos casos a lo largo de todo el ciclo de vida de la célula identificada por el procedimiento.

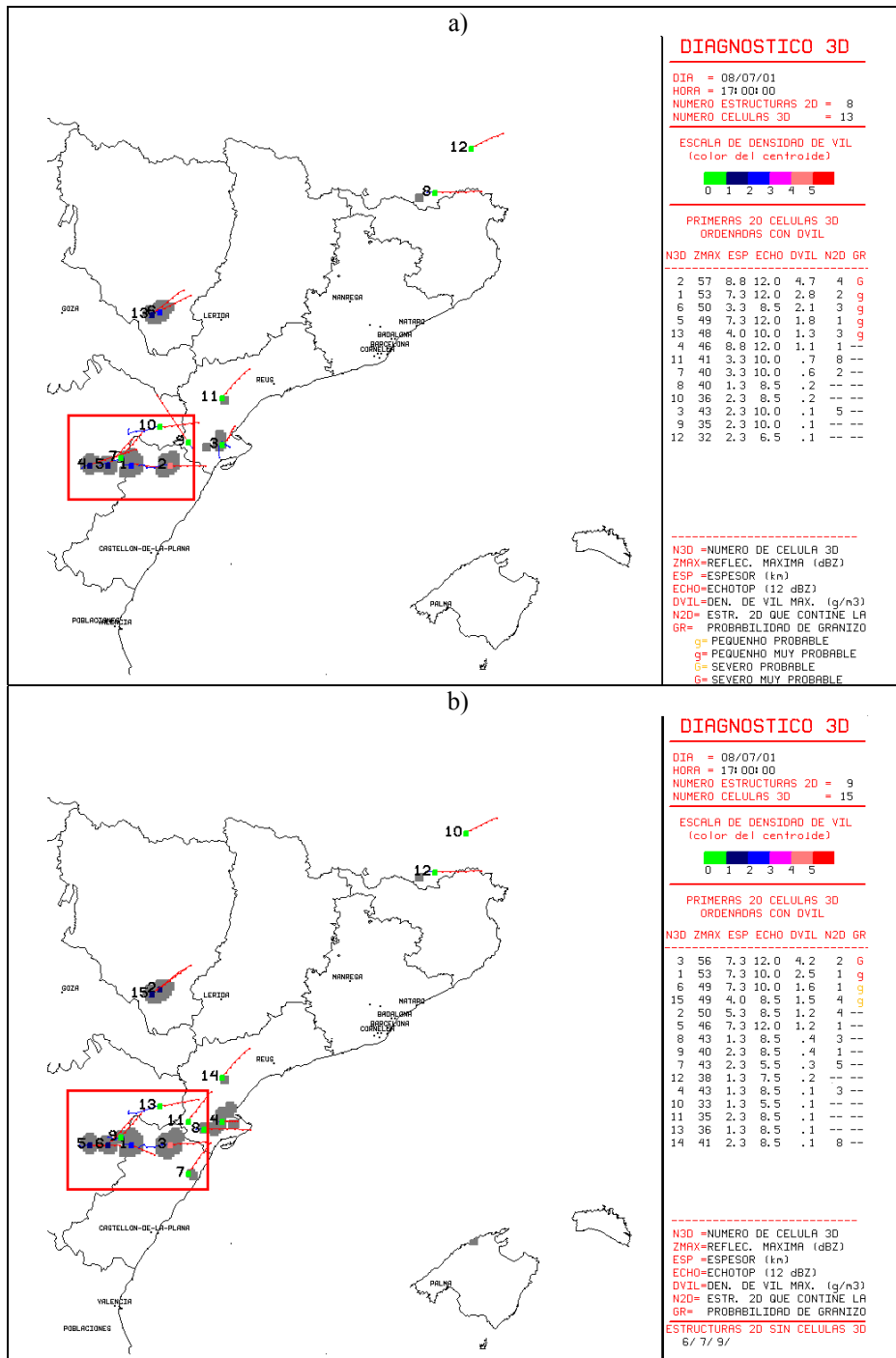


Figura 4.13 Producto básico de la aplicación YRADAR_3D del día 8 de julio de 2001 a las 17:00 UTC. En ambas imágenes la zona del recuadro rojo indica la posición de la célula que afectó a Morella, (a) célula n° 2, a partir de los CAPPIS corregidos, y (b) célula n° 3, a partir de los CAPPIS sin corregir.

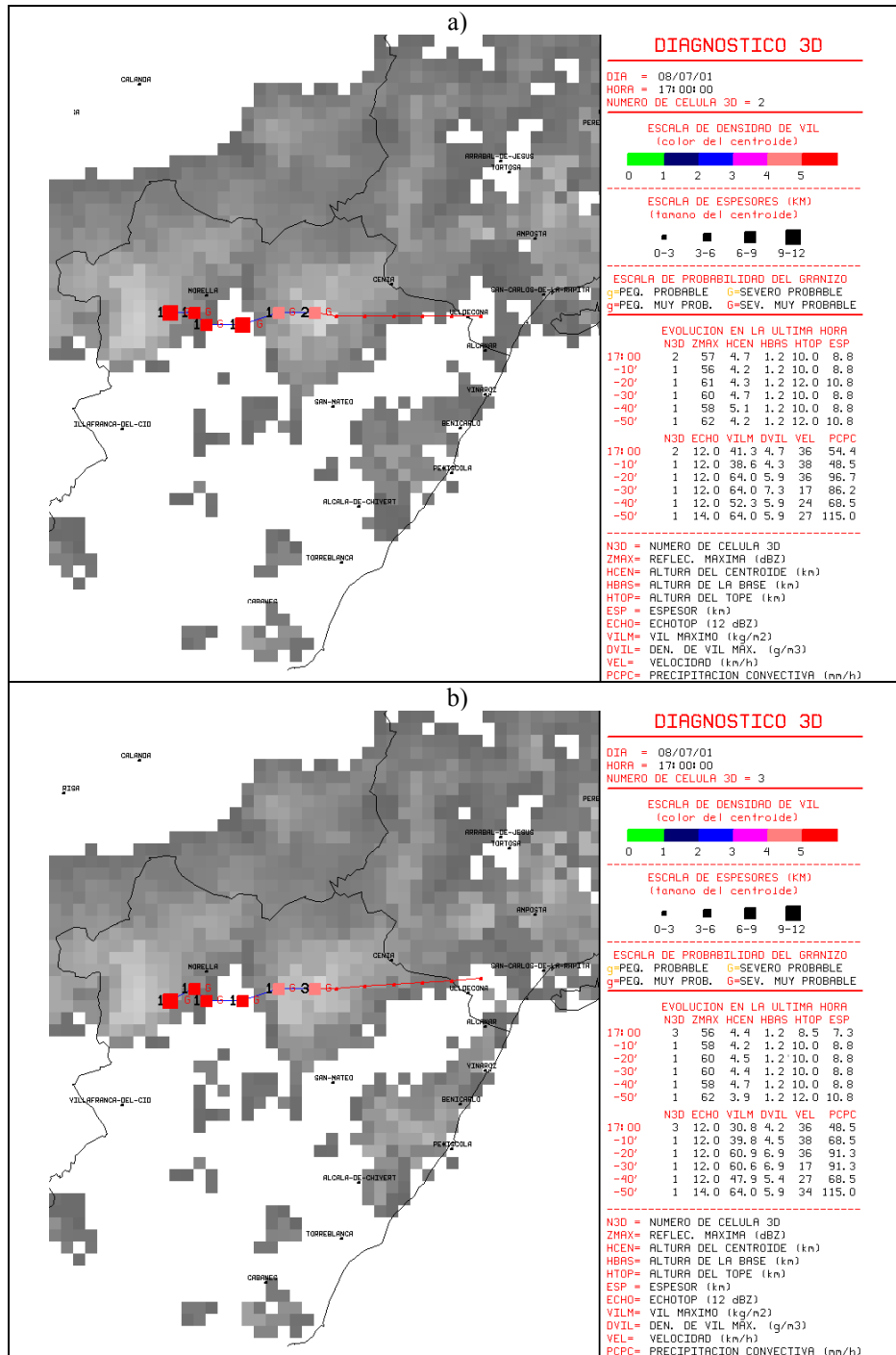


Figura 4.14 Ampliación de la célula que afectó a Morella el día 8 de julio de 2001 a las 17:00 UTC, (a) a partir de los CAPPs corregidos, y (b) a partir de los CAPPs sin corregir.

En la figura 4.13 se aprecia que las características de todas las células convectivas identificadas, y en especial las de la célula que afectó a Morella son muy similares en los análisis efectuados tanto con los CAPPs corregidos (célula n° 2) como con los no corregidos (célula n° 3). En la ampliación de la célula de Morella, figura 4.14, se aprecia que su evolución durante la hora anterior es también idéntica en ambos casos.

En las figuras 4.15 y 4.16 se puede ver la evolución de los parámetros calculados por medio de los criterios utilizados para la detección de granizo. En estas figuras se aprecia el gran parecido en la evolución de sus valores, tanto si se calculan a partir de los CAPPis corregidos, como si se hace a partir de los no corregidos.

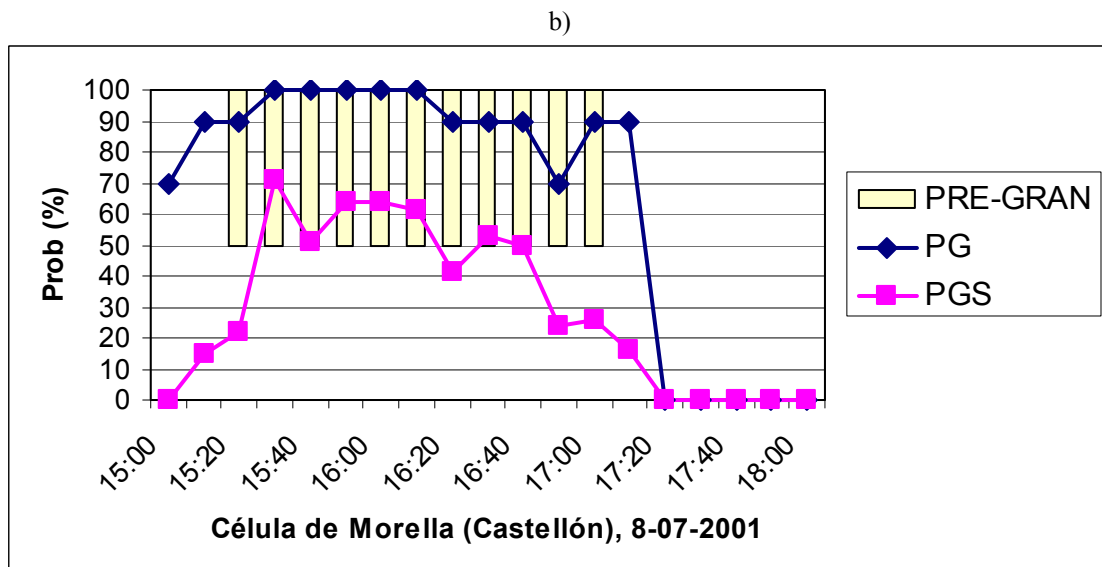
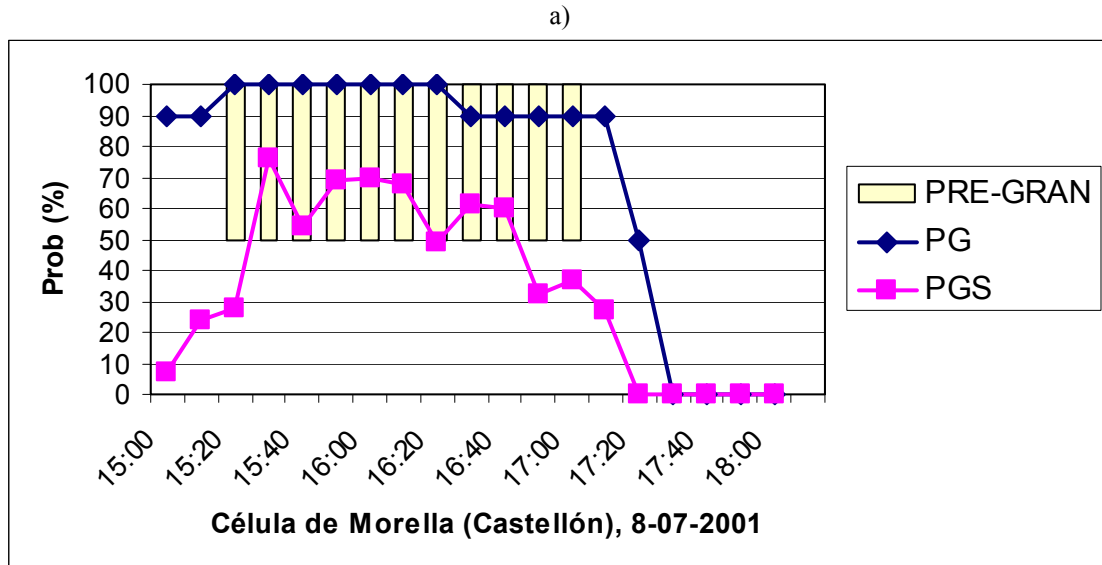


Figura 4.15 Evolución de la PGS y de la PG en la célula que afectó a Morella el día 8 de julio de 2001, (a) a partir de los CAPPis corregidos, y (b) a partir de los CAPPis sin corregir.

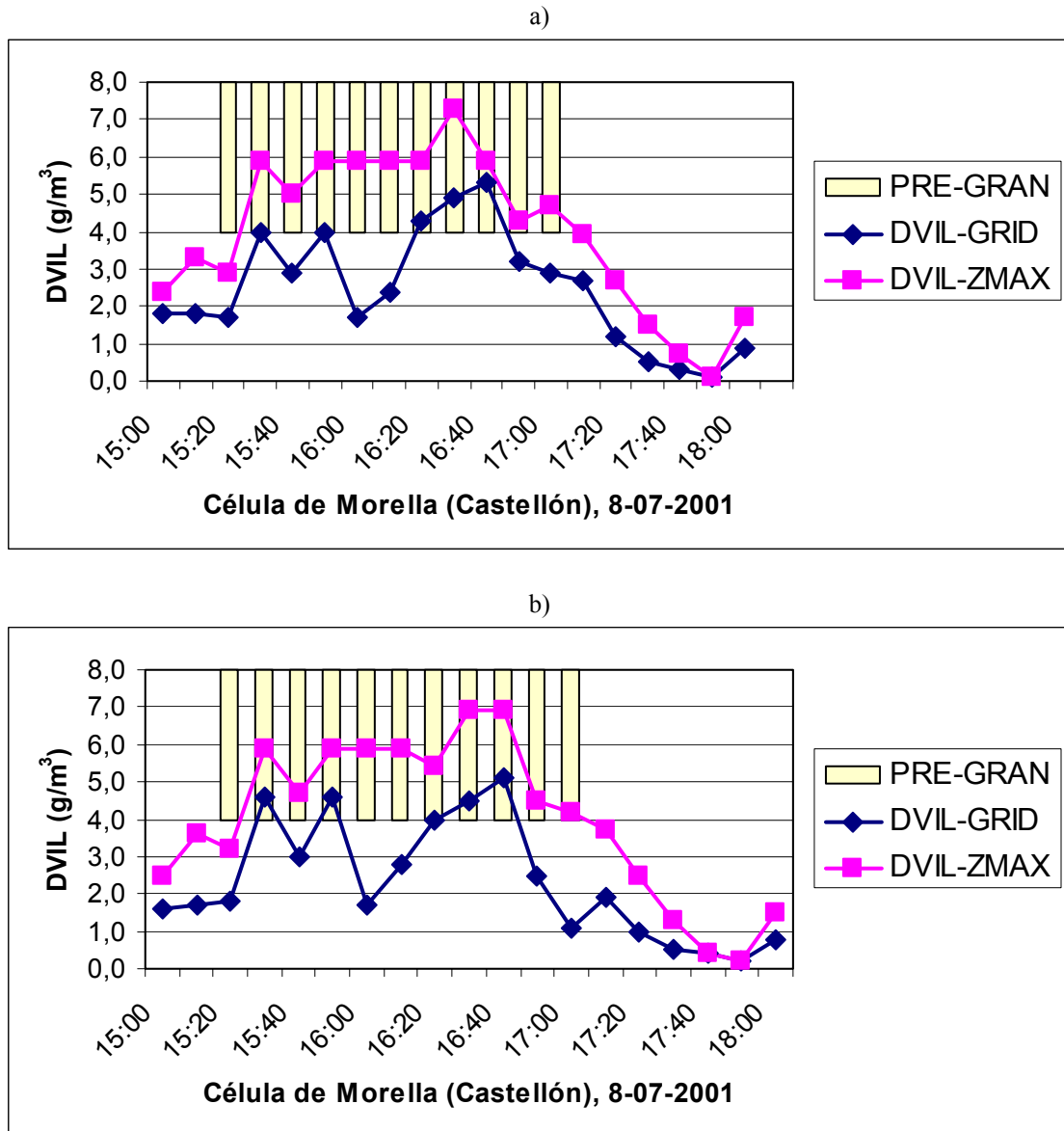


Figura 4.16 Evolución de la DVIL en la célula que afectó a Morella el día 8 de julio de 2001, (a) a partir de los CAPPIs corregidos, y (b) a partir de los CAPPIs sin corregir.

b.- Comparación de la situación del 5 de agosto de 2002

Este día también tuvo lugar una granizada severa, con granizo del tamaño de pelotas de tenis, en Camprodón (Girona). En la figura 4.17 presentamos los productos básicos de la aplicación YRADAR_3D a las 21:40 UTC obtenidas a partir de los CAPPIs corregidos (célula n° 5) y sin corregir (célula n° 4). En la figura 4.18 se pueden ver para la misma hora las ampliaciones correspondientes de la célula que afectó a Camprodón, situado a unos 18 Km al NW de Olot. En las figuras 4.19 y 4.20 se ve la evolución de la PG y la PGS, y de la DVIL respectivamente, a lo largo del ciclo de vida de la célula identificada por el procedimiento en ambos casos. Hay que tener en cuenta que para los CAPPIs sin corregir la célula parece tener menor duración, pero esto se debe únicamente a que no se pudo disponer en su momento de la información radar anterior a las 21:00 UTC.

Se puede comprobar en la figura 4.17 que la célula que afectó a Camprodón, así como el resto de células convectivas identificadas, son muy parecidas con los dos análisis efectuados. En las imágenes ampliadas de esta célula, figura 4.18, se aprecia del mismo modo que esta gran similitud se mantiene a lo largo de un intervalo de tiempo importante de su ciclo de vida, y no es un hecho puntual que ocurra en un instante de la evolución de la célula.

Esto mismo se puede apreciar al comparar la evolución de los parámetros calculados por medio de los criterios utilizados para la detección de granizo, figuras 4.19 y 4.20. En estas figuras se hace patente que este comportamiento tan similar de los valores de estos parámetros es constante durante el periodo de tiempo en que disponemos de ambos análisis; desafortunadamente los CAPPIs sin corregir no se pudieron archivar en su momento para todo el intervalo de tiempo necesario.

c.- Conclusiones de la comparación subjetiva

La comparación subjetiva, que se ha llevado a cabo con aquellas situaciones que se han podido reproducir, aporta como conclusión que, al menos para aquellos radares cuya cota no es excesivamente elevada, como los de Barcelona, Valencia ó Zaragoza, las modificaciones introducidas en la nueva generación de los CAPPIs no suponen cambios importantes en los procesos de identificación del procedimiento YRADAR, en los resultados de los criterios de identificación de granizo, ni tampoco en los resultados finales del módulo de detección de granizo desarrollado. Por este motivo se consideran adecuados los umbrales previamente establecidos, y, por ello, se procederá a verificarlos con los CAPPIs sin corregir que habían sido archivados, y con los datos de granizo recogidos durante la campaña del 2002.

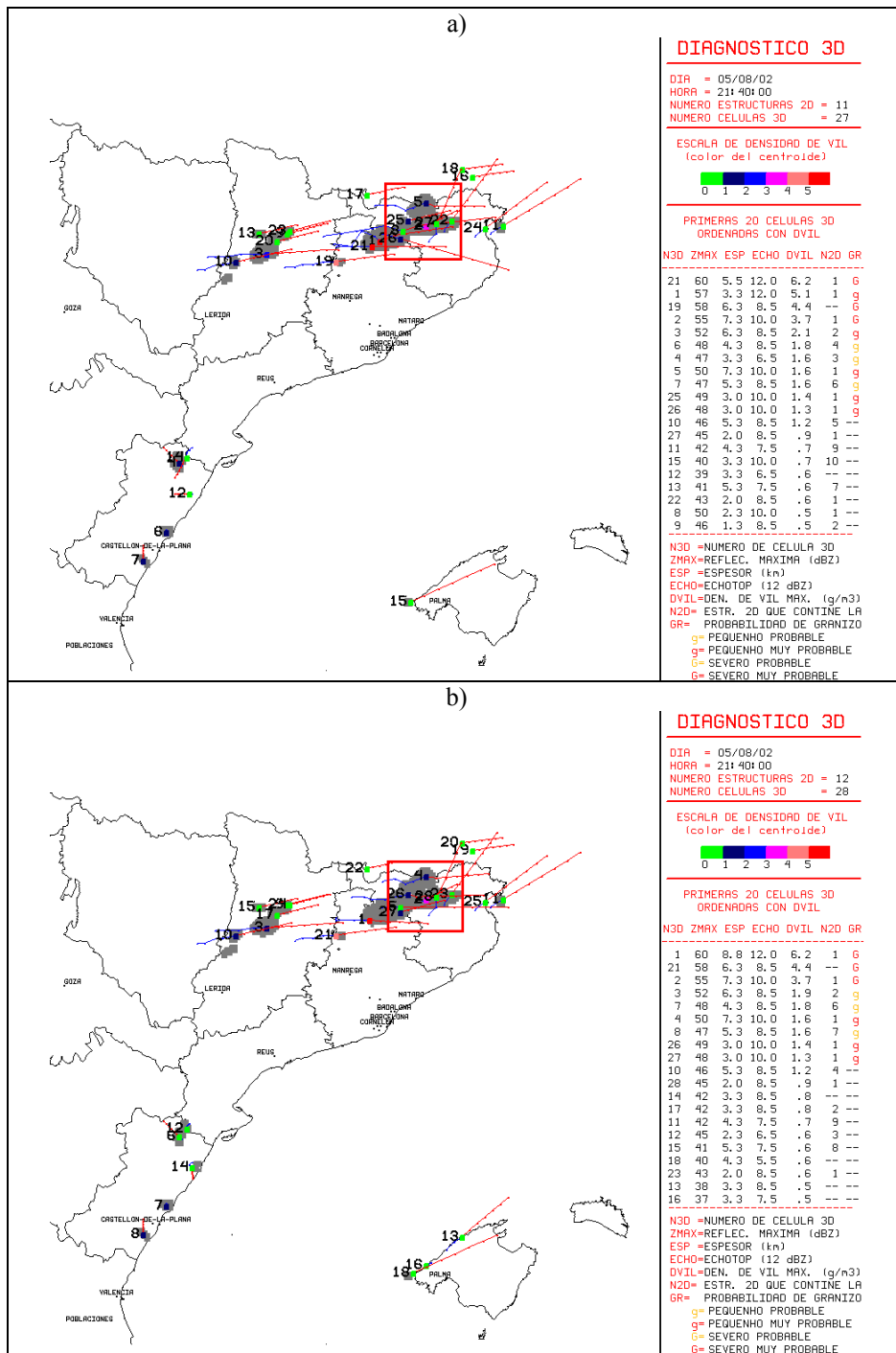


Figura 4.17 Producto básico de la aplicación YRADAR_3D del día 5 de agosto de 2002 a las 21:40 UTC. En ambas imágenes la zona del recuadro rojo indica la posición de la célula que afectó a Camprodón, (a) célula nº 5, a partir de los CAPPi corregidos, y (b) célula nº 4, a partir de los CAPPi sin corregir.

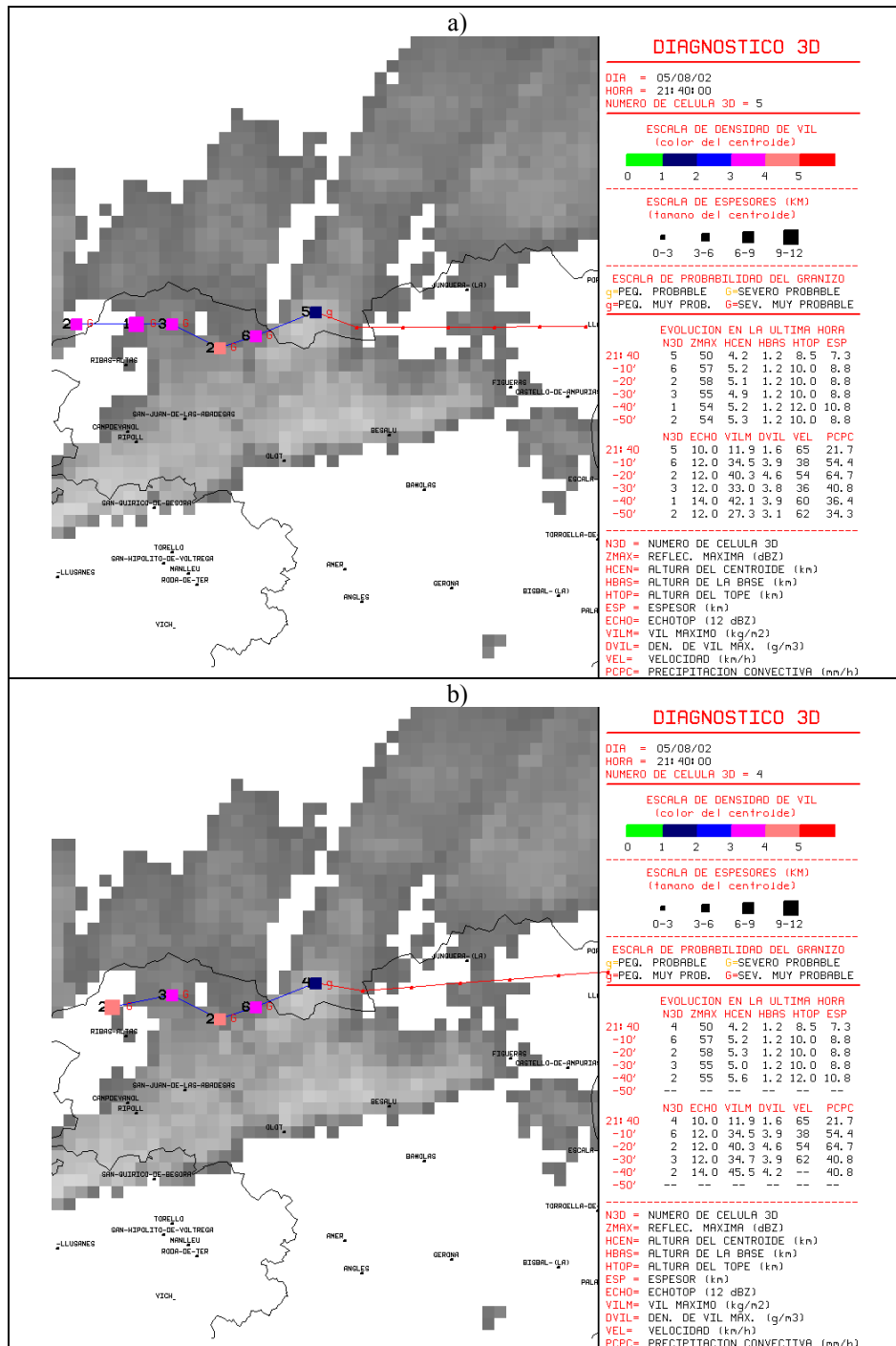


Figura 4.18 Ampliación de la célula que afectó a Camprodón el 5 de agosto de 2002 a las 21:40 UTC, (a) a partir de los CAPPi corregidos, y (b) a partir de los CAPPi sin corregir.

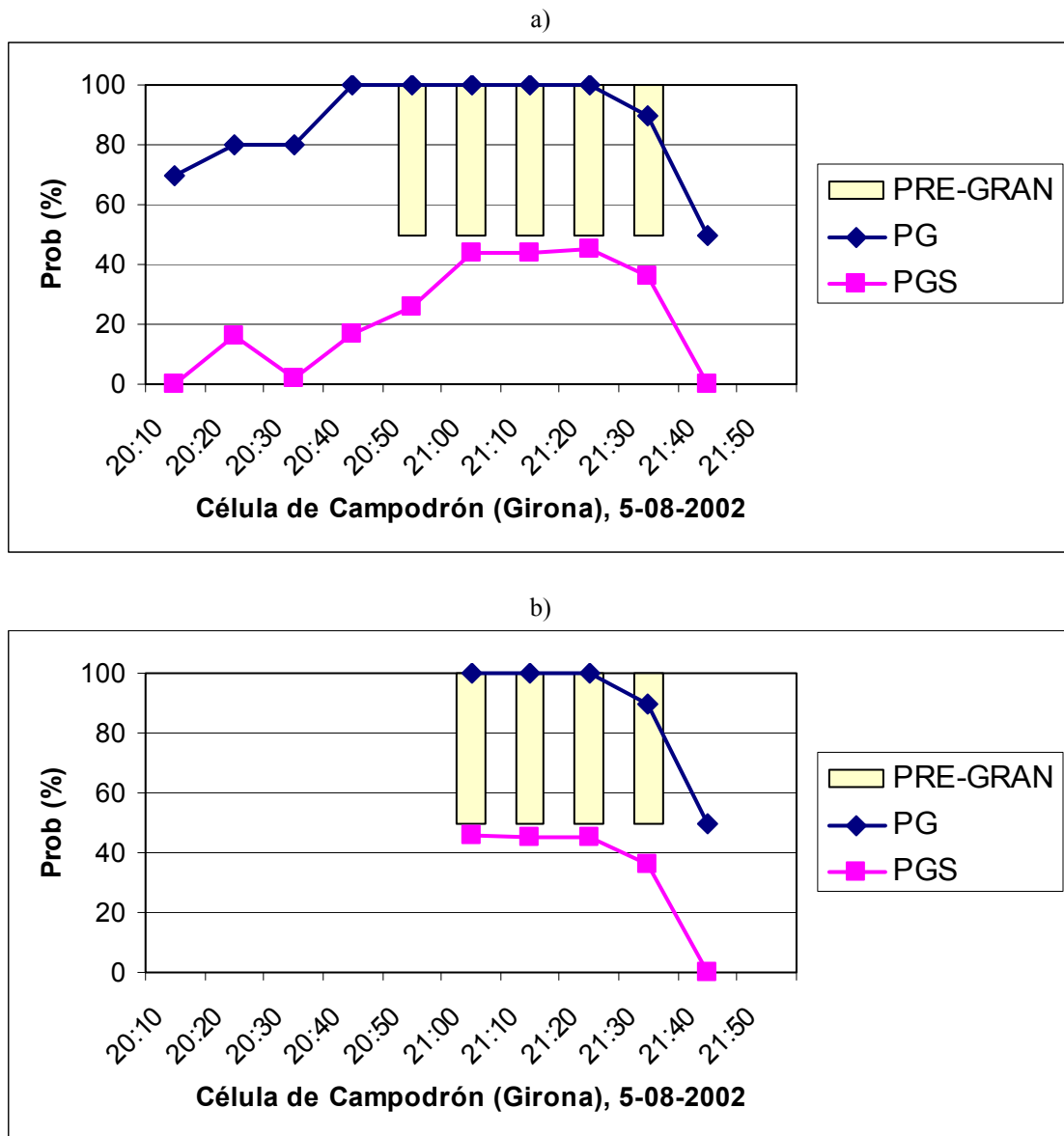


Figura 4.19 Evolución de la PGS y de la PG en la célula que afectó a Camprodón el 5 de agosto de 2002, (a) a partir de los CAPPs corregidos, y (b) a partir de los CAPPs sin corregir.

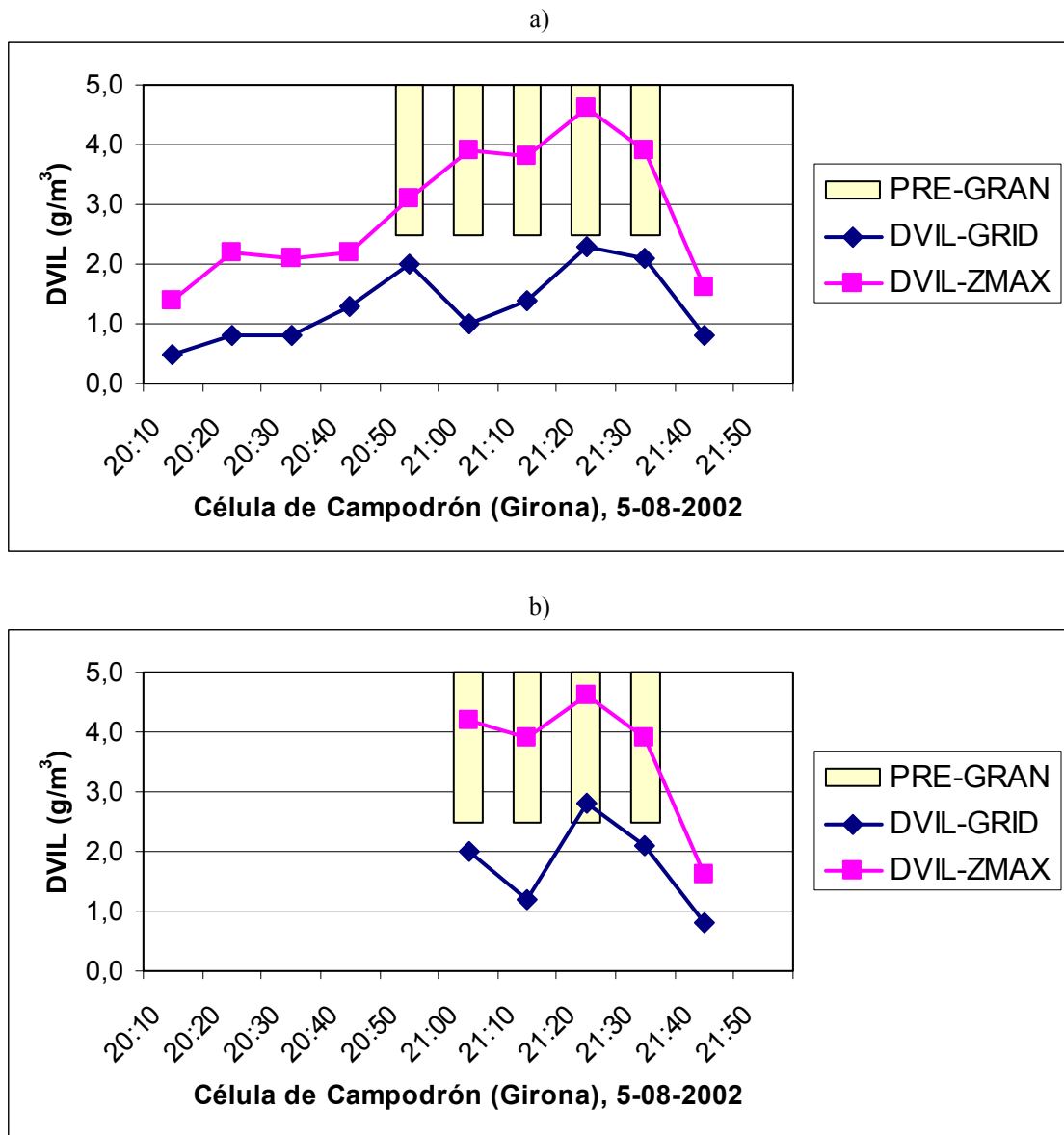


Figura 4.20 Evolución de la DVIL en la célula que afectó a Campodrón el 5 de agosto de 2002, (a) a partir de los CAPPIS corregidos, y (b) a partir de los CAPPIS sin corregir.

IV.3.3.- Verificación objetiva

Como ya se ha indicado, durante el año 2002 se ha continuado la labor de recogida de datos de granizo, obteniéndose finalmente información relativa a las granizadas que aparecen en las tablas 4.15.a y 4.15.b. Del mismo modo que en la tabla 4.1, se presenta, para cada granizada, la fecha y hora en que se produjo, las localidades a las que afectó, el tamaño del granizo observado, resaltando en negrita los casos que corresponden a granizo severo y, en la última columna, el radar con el que se ha analizado cada situación.

FECHA	HORA UTC	LUGAR	TAMAÑO	RADAR
09-abr-02	17:30 a 18:00	San Pau de Segúries (Girona)	Pequeño	Barcelona
	18:00 a 19:00	Fornells, Amer, Celler (Gir.)	Pequeño	Barcelona
02-may-02	20:40 a 22:30	Creixell (Tarragona)	Pequeño	Barcelona
11-may-02	7:00	Getafe (Madrid)	Pequeño	Madrid
27-may-02	13:00 a 14:00	Palafrugel, Tamariú (Girona)	Nuez	Barcelona
	13:30 a 14:30	Sta. Cristina d'Haro (Girona)	Pelota golf	Barcelona
04-jun-02	hacia 06:00	Zaragoza	Pequeño	Zaragoza
	entre 5 y 6	Zaragoza	Nuez	Zaragoza
	hacia 05:30	Calatayud (Zaragoza)	Nuez	Zaragoza
	entre 17 y 18	Castelló de Farfanya	Pequeño	Zaragoza
	hacia 17:30	Torres de Segre	Pequeño	Zaragoza
	hacia 14:00	Segovia	Pequeño	Valladolid
	hacia 13:30	Sto. Domingo de Silos (Bur.)	Pequeño	Valladolid
	hacia 14:00	S. Rafael (Segovia)	Pequeño	Valladolid
	hacia 15:00	Puebla de Lillo (León)	Pequeño	Valladolid
	hacia 16:00	Regumiel de la S. (Burgos)	Pequeño	Valladolid
	hacia 15:30	Monasterio de la S. (Burgos)	Pequeño	Valladolid
	entre 17 y 20	Llanillo y Palacios de B. (Bu.)	Pequeño	Valladolid
	hacia 18:00	La Vid de Ojeda (Palencia)	Pequeño	Valladolid
	hacia 17:30	Melgar de Fernamental (Bu.)	Pequeño	Valladolid
05-jun-02	hacia 18:30	Alar del Rey (Palencia)	Pequeño	Valladolid
	13:30 a 14:00	Zona del Maestrazgo (1)	Pequeño	Zaragoza
	hacia 13:00	Zona del Maestrazgo (2)	Pequeño	Zaragoza
26-jun-02	hacia 14:00	Castellón	Pequeño	Zaragoza
	Tarde	El Paular	Nuez	Madrid
	Tarde	Cerceda	Nuez	Madrid
	Tarde	Miraflores de la Sierra	Pequeño	Madrid
	Tarde	zona del Lozoya	Nuez	Madrid

Tabla 4.15.a Casos de granizo seleccionados durante la campaña del 2002 (abril-junio).

En el caso de esta campaña disponemos de un total de 21 situaciones de granizo severo, 39 situaciones que dieron granizo no severo, y además otras 39 tormentas que no dieron granizo, lo que supone que para llevar a cabo esta verificación contamos con un total de 99 células tormentosas. En esta campaña del 2002 se aprecia que la mayor parte de los datos de granizo corresponden a situaciones que han afectado a regiones dentro de la cobertura del radar de Zaragoza, (33 granizadas, el 55 %), el 23 % han estado en la cobertura del radar de Valladolid (14 granizadas), un 10 % respectivamente en la del radar de Barcelona y en la de Madrid (6 casos para cada uno de ellos). Una última granizada se ha situado en el área del radar del País Vasco (2 % de los casos). En cuanto

a las tormentas sin granizo de esta campaña, sólo hay que decir que todos los casos han sido analizados con el radar de Zaragoza.

FECHA	HORA UTC	LUGAR	TAMAÑO	RADAR
08-jul-02	12:30 a 14:20	Burgo de Osma-Soria	Pelota golf	Zaragoza
	13:00 a 14:30	Mª de Huerva (Zaragoza)	Nuez	Zaragoza
	13:10 a 13:50	Caspe (Zaragoza)	Nuez	Zaragoza
	15:40 a 17:20	Fuendejalón (Zaragoza)	Pelota golf	Zaragoza
	15:00 a 15:30	Tarazona	Nuez	Zaragoza
	15:50 a 17:10	Épila (Zaragoza)	Nuez	Zaragoza
	16:30 a 17:20	Huesca	Pequeño	Zaragoza
	17:20 a 18:30	S. De Alcubierre-Sariñena	Pequeño	Zaragoza
	17:20 a 18:30	Zaragoza	Nuez	Zaragoza
	17:40 a 19:20	Castejón de Monegros	Pequeño	Zaragoza
	hacia 19:50	Aitona (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia 20:30	Serós-Lleida	Pequeño	Zaragoza
	12-jul-02	16:50 a 17:30	horta de Lleida	Pelota golf
hacia 17:35		Fraga-Serós-Aitona	Pelota golf	Zaragoza
22-jul-02	hacia 13:30	Sta. Marta de Tera (Zamora)	Pequeño	Valladolid
	hacia 13:30	Santibañez de V. (Zamora)	Pequeño	Valladolid
	hacia 16:30	Vitoria	Pequeño	País Vasco
	hacia 19:00	Valoria la Buena (Valladolid)	Nuez	Valladolid
	hacia 19:00	Villavellid (Valladolid)	Pequeño	Valladolid
05-ago-02	hacia 17:30	Huesca	Nuez	Zaragoza
	noche	Camprodón (Girona)	Pelota tenis	Barcelona
03-sep-02	tarde	Fraga, (Huesca)	Pequeño	Zaragoza
	tarde	Tamarite, Alfarrás	Pequeño	Zaragoza
	hacia 20:30	Massalcoreig, Granja d'Escarp	Pequeño	Zaragoza
	noche	Balaguer (Lérida)	Pequeño	Zaragoza
08-sep-02	00:00 a 00:30	Vilanova de la Barca (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia 05:00	Alpicat (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia 16:00	Palau de Anglesola (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	hacia 17:30	Almacelles..Almenar (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
	entre 19 y 20	Balaguer (Lleida)	Pequeño	Zaragoza
20-sep-02	tarde-noche	Salou (Tarragona)	Pelota golf	Zaragoza
	hacia 17:30	Alcalá de Henares	Pelota golf	Madrid

Tabla 4.15.b Casos de granizo seleccionados durante la campaña del 2002 (julio-septiembre).

a.- Tablas de contingencia e índices de verificación

A través del análisis de todas las tormentas seleccionadas durante esta campaña, y de la aplicación a las mismas de los cuatro umbrales establecidos, se han podido confeccionar las tablas de contingencia correspondientes a cada uno de estos umbrales y, posteriormente, calcular los valores de los mismos índices que se han usado en el proceso de determinación de umbrales. Las tablas de contingencia obtenidas a partir de la verificación con los datos de la campaña del 2002 se pueden ver en la tabla 4.16, mientras que los valores de los índices de verificación calculados a partir de las mismas se presentan en la tabla 4.17.

a)				c)			
DVIL >= 2,0		y PGS >= 20		DVIL >= 2,0		o PG >= 30	
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	118	70	188	obs. SI	145	123	268
obs. NO	58	376	434	obs. NO	32	134	166
total	176	446	622	total	177	257	434
b)				d)			
DVIL >= 1,5		y PGS >= 10		DVIL >= 1,3			
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total
obs. SI	133	55	188	obs. SI	182	86	268
obs. NO	72	362	434	obs. NO	44	122	166
total	205	417	622	total	226	208	434

Tabla 4.16 Tablas de contingencia correspondientes a la verificación con los datos de la campaña del 2002 para los umbrales de (a) “granizo severo muy probable”, (b) “granizo severo probable”, (c) “granizo pequeño muy probable” y (d) “granizo pequeño probable”.

A la vista de las tablas 4.16 y 4.17 se pueden hacer los siguientes comentarios:

- La tabla de contingencia del umbral para detección de granizo severo muy probable tiene una distribución de frecuencias condicionales y marginales muy similar a la del 2001. Los valores de los índices de verificación son ligeramente peores que los obtenidos en el proceso de ajuste de los umbrales, lo cual es lógico por ser ésta una muestra independiente de la del 2001, únicamente aparece una ligera mejora en el valor del POD y del BIAS. En cualquier caso los valores de verificación obtenidos son significativamente buenos.
- La tabla de contingencia del umbral para detección de granizo severo probable también tiene una distribución de frecuencias condicionales y marginales semejante a la del 2001. Los índices de verificación obtenidos para esta categoría son también adecuados, aunque también son algo peores que los obtenidos en el caso de los datos del 2001, lo único destacable es que el valor del BIAS pasa a ser ligeramente superior a uno.
- La tabla de contingencia del umbral para detección de granizo pequeño muy probable difiere de la del 2001 en algunos aspectos, sobre todo aparece una distribución marginal opuesta para casos observados, que además influye en las distribuciones condicionales, en especial en las de la columna “pred. NO”. En cuanto a los índices se observan valores ligeramente peores que los obtenidos en el 2001, aunque en cualquier caso se puede considerar que son resultados favorables, hay que destacar que hay una cierta mejora del valor del FAR y del CSI.
- La diferencia que hay en la distribución marginal de casos observados de la tabla de contingencia del umbral para detección de granizo pequeño probable, con relación a la del 2001, influye en este caso en las cuatro distribuciones condicionales de la tabla. Lo más notable en cuanto a los valores de los índices de verificación es que aparece una importante mejora en el FAR y en el CSI. El valor de POD empeora ligeramente mientras que el BIAS pasa de un valor mayor que uno en el 2001 a un valor inferior a uno en esta verificación. Los demás índices dan valores ligeramente mejores, aunque muy similares a los del proceso de ajuste del 2001.

a)					
Umbral:	DVIL>=	2,0	y	PGS>=	20
	POD =	0,63		BIAS=	0,94
	FAR=	0,33		PC=	0,79
	CSI=	0,48		HK=	0,49
				HSS=	0,50
				OR=	10,93
				ORSS=	0,83

b)					
Umbral:	DVIL>=	1,5	y	PGS>=	10
	POD =	0,71		BIAS=	1,09
	FAR=	0,35		PC=	0,80
	CSI=	0,51		HK=	0,54
				HSS=	0,53
				OR=	12,16
				ORSS=	0,85

c)					
Umbral:	DVIL>=	2,0	o	PG >=	30
	POD =	0,54		BIAS=	0,66
	FAR=	0,18		PC=	0,64
	CSI=	0,48		HK=	0,35
				HSS=	0,32
				OR=	4,94
				ORSS=	0,66

d)					
Umbral:	DVIL>=	1,3			
	POD =	0,68		BIAS=	0,84
	FAR=	0,19		PC=	0,70
	CSI=	0,58		HK=	0,41
				HSS=	0,40
				OR=	5,87
				ORSS=	0,71

Tabla 4.17 Índices de verificación correspondientes a los umbrales de (a) “granizo severo muy probable”, (b) “granizo severo probable”, (c) “granizo pequeño muy probable” y (d) “granizo pequeño probable”, correspondientes a la verificación con los datos de la campaña de 2002.

b.- Independencia, significación e intervalos de confianza

El valor del ORSS nos va a servir, igual que en el punto IV.2.5, para hacer una primera valoración de la independencia/asociación de los datos obtenidos en las tablas de contingencia anteriores. En la tabla 4.17 aparecen los valores del ORSS para cada uno de los umbrales considerados. Los altos valores del mismo nos indican, como en la campaña del 2001, un alto grado de asociación entre los datos observados y los previstos por cada categoría del módulo de detección de granizo.

También vamos a evaluar el grado de independencia de estos datos por medio del test χ^2 de Pearson con un grado de libertad, y con un nivel de significación $\alpha = 0,01$. Partimos de los datos que se ven en las tablas de contingencia de la tabla 4.16, y establecemos la misma Hipótesis nula (H_0) que en el punto IV.2.5. En la tabla 4.18 aparece el valor de $\chi^2(0,01; 1)$, el valor del estadístico J y el valor de significación correspondiente, prob(J), obtenidos para cada caso.

CATEGORÍA DE GRANIZO	$\chi^2(0,01; 1)$	J	Prob(J)
SEVERO MUY PROBABLE	6,63	155,36	$1,17 \cdot 10^{-35}$
SEVERO PROBABLE	6,63	171,67	$3,20 \cdot 10^{-39}$
PEQUEÑO MUY PROBABLE	6,63	50,05	$1,50 \cdot 10^{-12}$
PEQUEÑO PROBABLE	6,63	68,76	$1,11 \cdot 10^{-16}$

Tabla 4.18 Valores obtenidos al efectuar el test de independencia χ^2 de Pearson con los datos de verificación de la campaña 2002.

Se rechaza la Hipótesis nula, H_0 , con el nivel de significación establecido, ya que en todos los casos el valor de J es muy superior al de $\chi^2(0,01; 1)$. La probabilidad de que exista asociación entre los datos de observación de granizo y los del módulo de detección es, por lo tanto, muy alta. Las probabilidades de que se cumpla la hipótesis nula son prácticamente nulas, tal y como se ve en la última columna de la tabla 4.18.

Vamos a calcular también, con los datos de la campaña 2002, los valores máximo y mínimo que tendrían el POD y el FAR, para valorar hasta qué punto los valores obtenidos están influidos por el proceso muestral con un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

Los intervalos de confianza obtenidos en nuestro caso aparecen en las tablas 4.19 y 4.20, para cada categoría de detección de granizo.

CATEGORÍA DE GRANIZO	POD	Máximo	Mínimo
SEVERO MUY PROBABLE	0,63	0,71	0,53
SEVERO PROBABLE	0,71	0,78	0,62
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,54	0,62	0,46
PEQUEÑO PROBABLE	0,68	0,75	0,60

Tabla 4.19 Intervalos de confianza de los valores de POD obtenidos con los datos de verificación de la campaña 2002.

CATEGORÍA DE GRANIZO	FAR	Máximo	Mínimo
SEVERO MUY PROBABLE	0,35	0,44	0,27
SEVERO PROBABLE	0,22	0,36	0,12
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,18	0,27	0,12
PEQUEÑO PROBABLE	0,19	0,27	0,14

Tabla 4.20 Intervalos de confianza de los valores de FAR obtenidos con los datos de verificación de la campaña 2002.

Estos resultados nos indican también que, para las cuatro categorías establecidas, los valores de POD y del FAR tienen valores significativamente válidos.

Los resultados del cálculo del error estándar del HK están en la tabla 4.21. Se puede afirmar que los valores del HK son significativamente mayores que cero, ya que los errores obtenidos son bastante pequeños.

CATEGORÍA DE GRANIZO	HK	error	HK-error
SEVERO MUY PROBABLE	0,49	0,04	0,45
SEVERO PROBABLE	0,54	0,04	0,50
PEQUEÑO MUY PROBABLE	0,35	0,04	0,31
PEQUEÑO PROBABLE	0,41	0,04	0,37

Tabla 4.21 Error estándar del HK y valor mínimo que podría tener con los datos de verificación de la campaña 2002.

El test de significación del OR lo llevamos a cabo considerando las mismas hipótesis de trabajo que con los datos del 2001. Con los datos de verificación de esta campaña se obtienen los valores que aparecen en la tabla 4.22.

CATEGORÍA DE GRANIZO	Ln(OR)	error	Lmín
SEVERO MUY PROBABLE	3,44	0,39	1,01
SEVERO PROBABLE	4,03	0,41	1,07
PEQUEÑO MUY PROBABLE	2,38	0,36	0,93
PEQUEÑO PROBABLE	1,85	0,34	0,88

Tabla 4.22 Test de significación del OR para los datos de verificación de la campaña 2002, con el valor de su error estándar y el valor mínimo admisible (Lmin) para un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

Estos resultados señalan que para ninguno de los umbrales considerados se cumple la Hipótesis nula, de manera que, con una confianza del 99 %, los datos previstos por el módulo de detección de granizo son altamente dependientes de las observaciones, y los valores de verificación obtenidos no se deben simplemente a un muestreo casual.

IV.4.- AJUSTE DE UMBRALES CON LAS CAMPAÑAS 2001 Y 2002

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se decide efectuar un nuevo ajuste de umbrales con la base de datos completa, constituida por todas las tormentas de la tabla 4.1 (tormentas con granizo de la campaña del 2001) y las de las tablas 4.15.a y 4.15.b (tormentas con granizo de la campaña del 2002), así como con todos los datos de tormentas sin granizo de ambas campañas. Así pues, contaremos con información relativa a un total de 144 tormentas, 29 de las cuales dieron lugar a granizo severo, 52 dieron granizo no severo, y las 63 restantes no dieron lugar a granizo.

IV.4.1.- Comportamiento de cada criterio

Se va a hacer primero un análisis del comportamiento de los tres criterios que estamos utilizando, en el conjunto de todas las tormentas de las dos campañas, separándolas en tormentas con granizo severo, tormentas con granizo no severo y tormentas sin granizo, para compararlo con el mismo análisis hecho a partir de los datos de la campaña del 2001 (apartado IV.2.2).

a.- Distribución de casos según la DVIL

En la figura 4.21 se representa para las tres categorías de tormentas la distribución de casos según los valores de DVIL. Se observan muy pocas diferencias entre esta gráfica y la de la figura 4.7, confirmándose, por lo tanto, las conclusiones que se extrajeron en su momento.

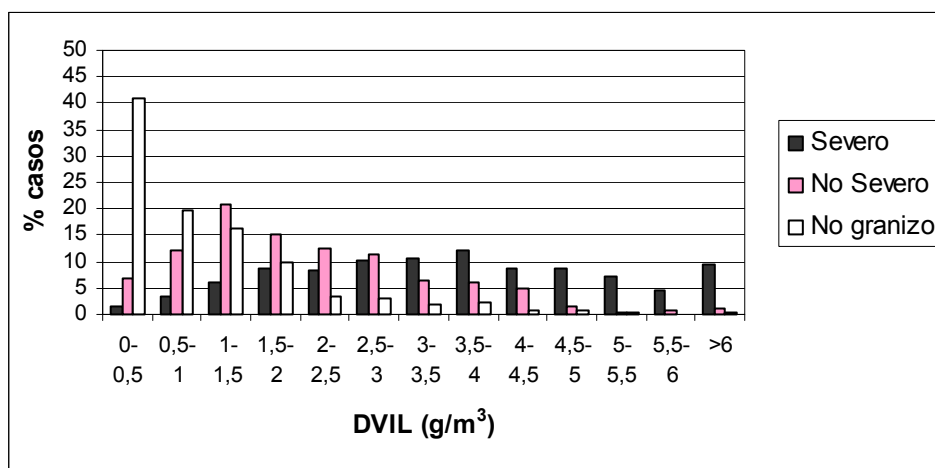


Figura 4.21 Distribución del número de casos de los dos campañas (2001 y 2002) en las tres categorías según rangos de valores de DVIL.

b.- Distribución de casos según la PG

La distribución del número de casos de las dos campañas según los valores de PG, para cada categoría de tormenta, está representada en la figura 4.22. La gráfica obtenida en este caso es muy similar a la de la figura 4.8, por lo que se pueden ratificar las principales características de aquella distribución.

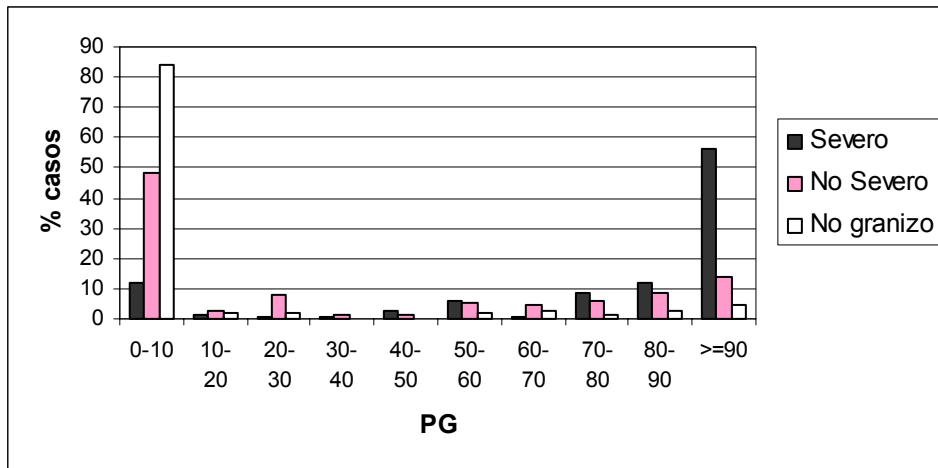


Figura 4.22 Distribución del número de casos de los dos campañas (2001 y 2002) en las tres categorías según rangos de valores de PG.

c.- Distribución de casos según la PGS

En la figura 4.23 se puede observar la distribución del número de casos de estas dos campañas según los valores de la PGS. Esta gráfica es casi idéntica a la que se obtuvo con la campaña del 2001 (figura 4.9), por lo que siguen siendo válidas las conclusiones que se indicaron en aquel momento.

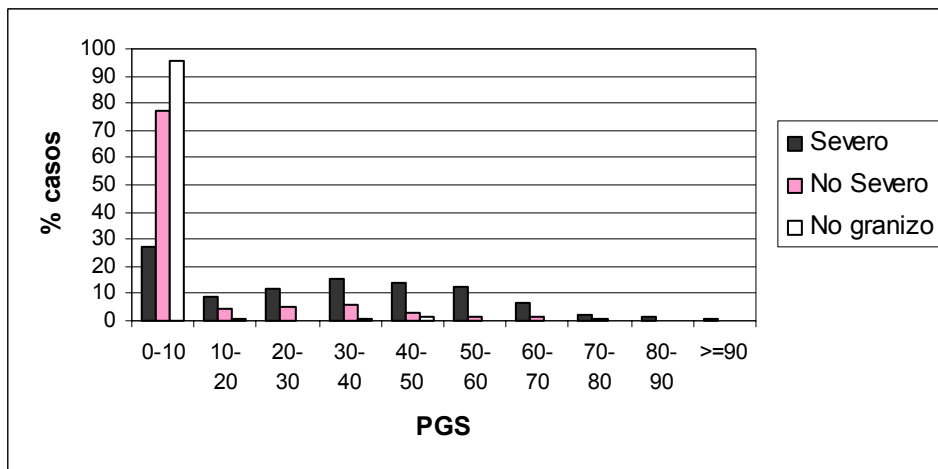


Figura 4.23 Distribución del número de casos de los dos campañas (2001 y 2002) en las tres categorías según rangos de valores de PGS.

IV.4.2.- Combinación de criterios

Vamos a llevar a cabo también un análisis del número de casos que existen al combinar los datos de los tres criterios utilizados, de la misma manera que se hizo con los datos de la campaña del 2001 en el punto IV.2.3. Así, podremos comprobar si los resultados al tratar con una base de datos más amplia son similares a los obtenidos inicialmente.

En las figuras 4.24.a, 4.24.b y 4.24.c hemos representado los diagramas correspondientes a la distribución del número de casos en las categorías de tormentas con granizo severo, tormentas con granizo no severo y tormentas sin granizo, respectivamente, según la relación de la DVIL con la PG. Los mismos diagramas correspondientes a la relación entre la DVIL y la PGS se pueden ver en las figuras 4.25.a, 4.25.b y 4.25.c. Finalmente, en las figuras 4.26.a, 4.26.b y 4.26.c aparecen los diagramas con la distribución del número de casos en base a la relación entre la PGS y la PG.

En todas estas gráficas se observan unas distribuciones de número de casos muy similares a las que obtuvimos con los casos de la campaña del 2001 (figuras 4.10a a 4.12c), por lo que podemos dar por válidas las conclusiones que se sacaron entonces.

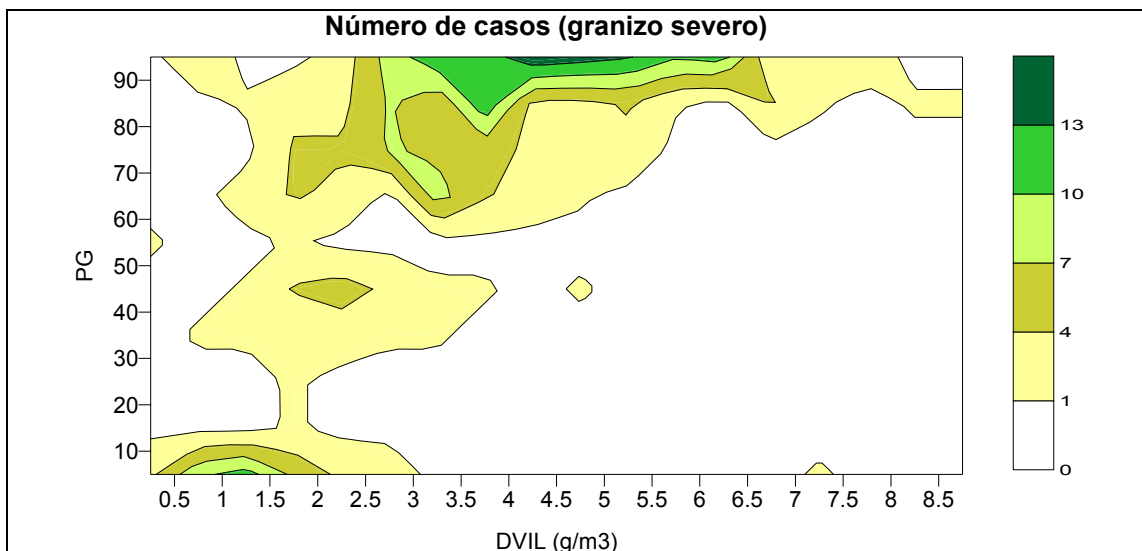


Figura 4.24.a Tormentas con granizo severo, casos del 2001 y 2002: relación entre PG y DVIL.

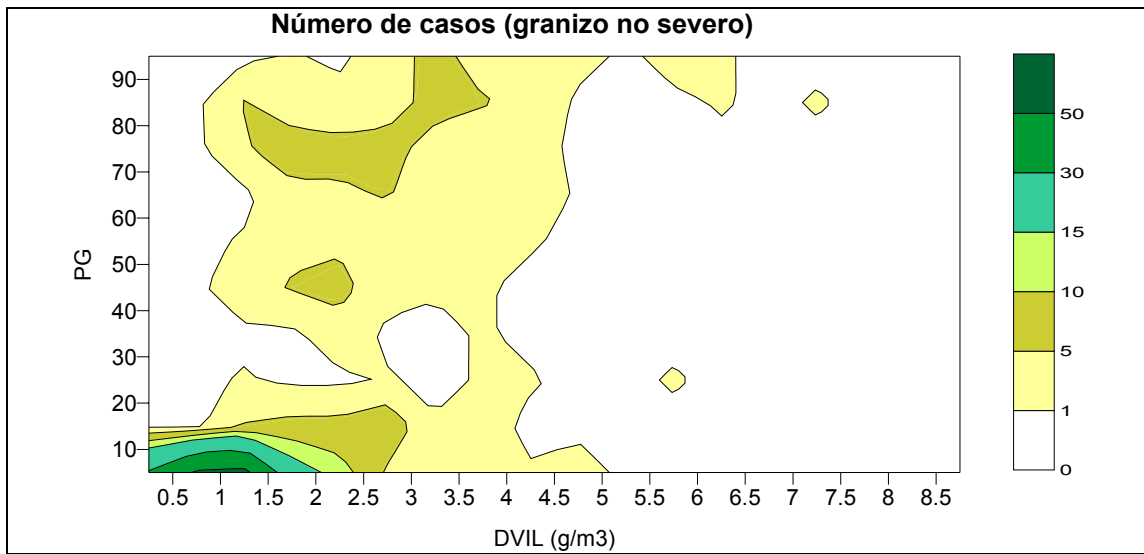


Figura 4.24.b Tormentas con granizo no severo, casos del 2001 y 2002: relación entre PG y DVIL.

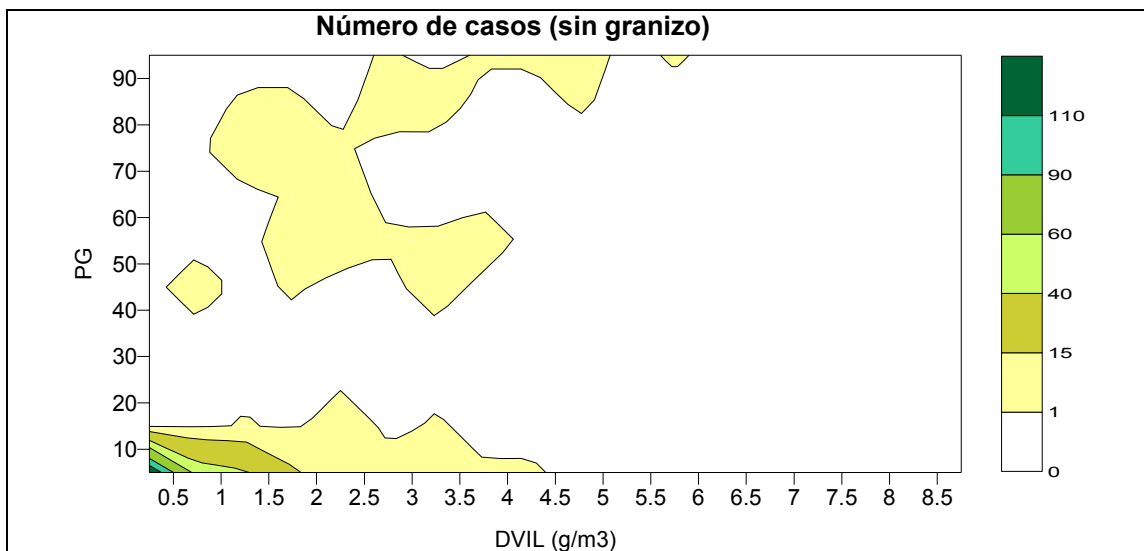


Figura 4.24.c Tormentas sin granizo, casos del 2001 y 2002: relación entre PG y DVIL.

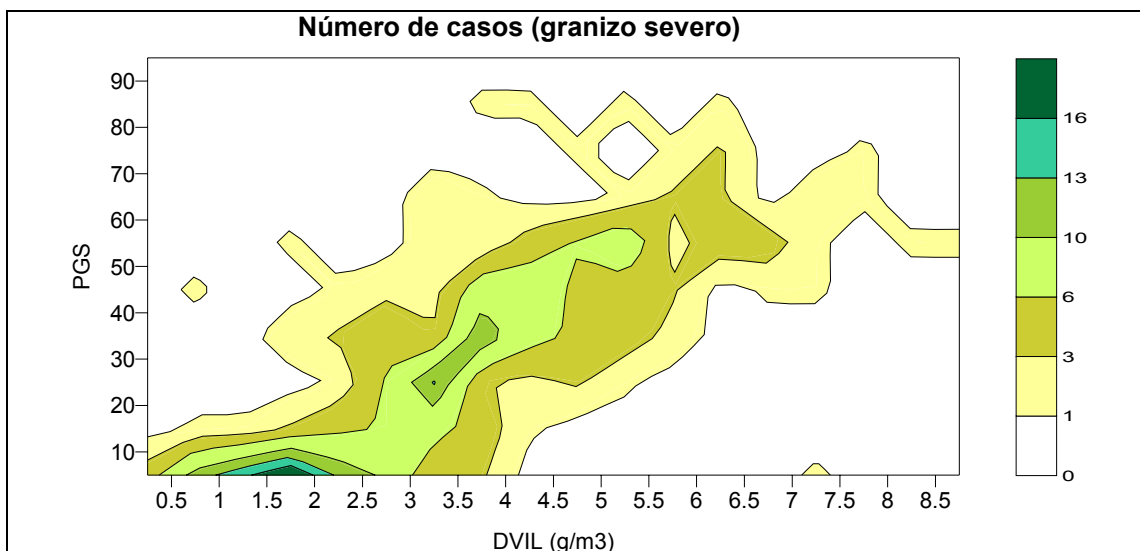


Figura 4.25.a Tormentas con granizo severo, casos del 2001 y 2002: relación entre PGS y DVIL.

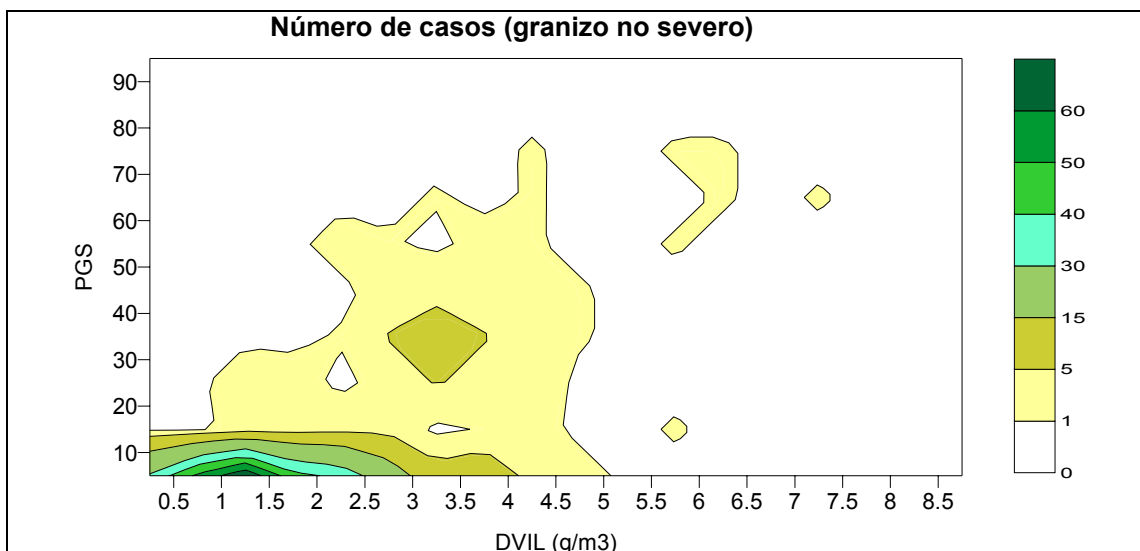


Figura 4.25.b Tormentas con granizo no severo, casos del 2001 y 2002: relación entre PGS y DVIL.

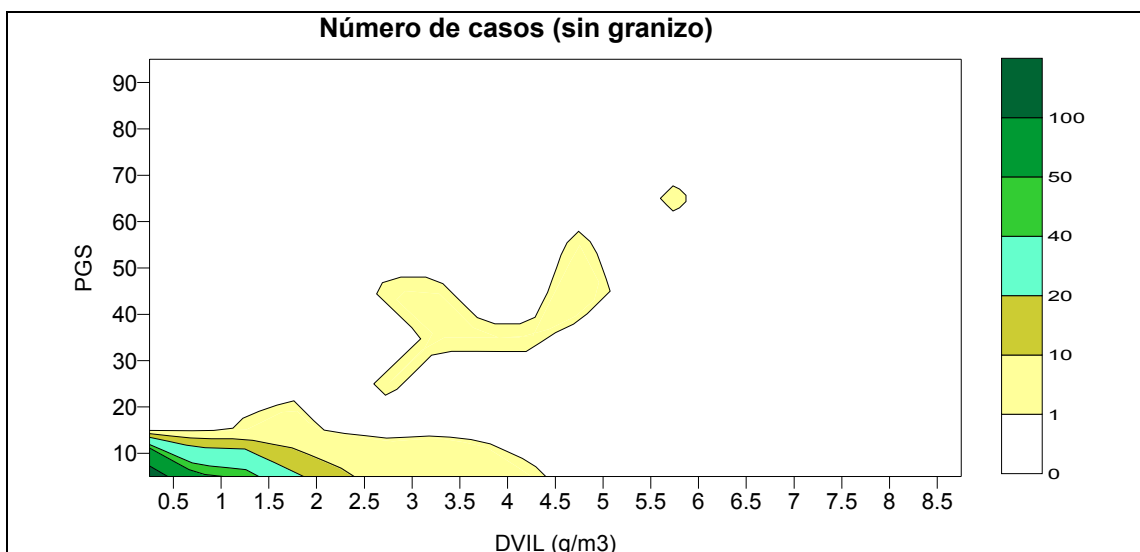


Figura 4.25.c Tormentas sin granizo, casos del 2001 y 2002: relación entre PGS y DVIL.

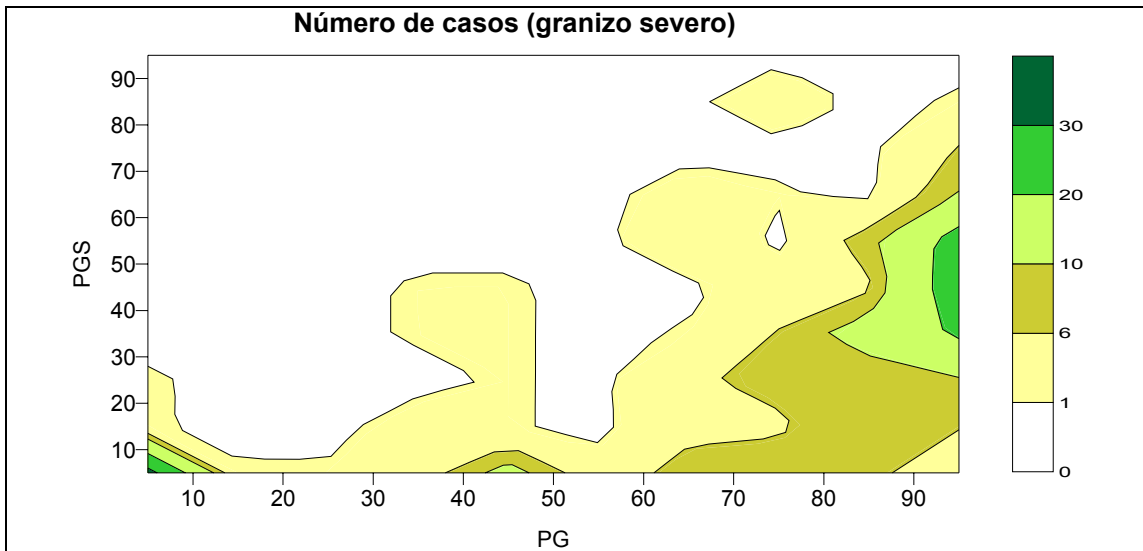


Figura 4.26.a Tormentas con granizo severo, casos del 2001 y 2002: relación entre PGS y PG.

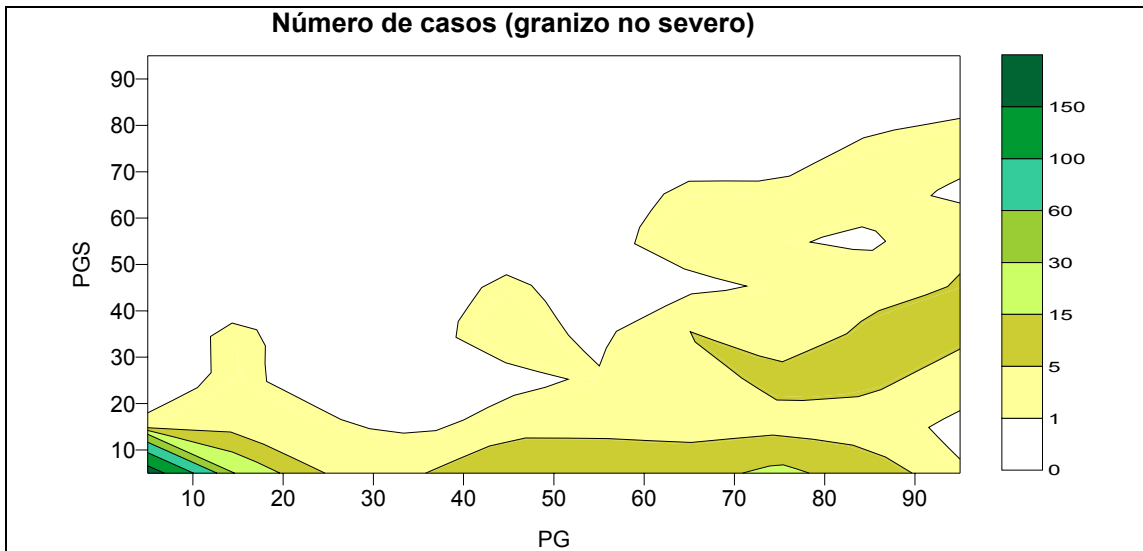


Figura 4.26.b Tormentas con granizo no severo, casos del 2001 y 2002: relación entre PGS y PG.

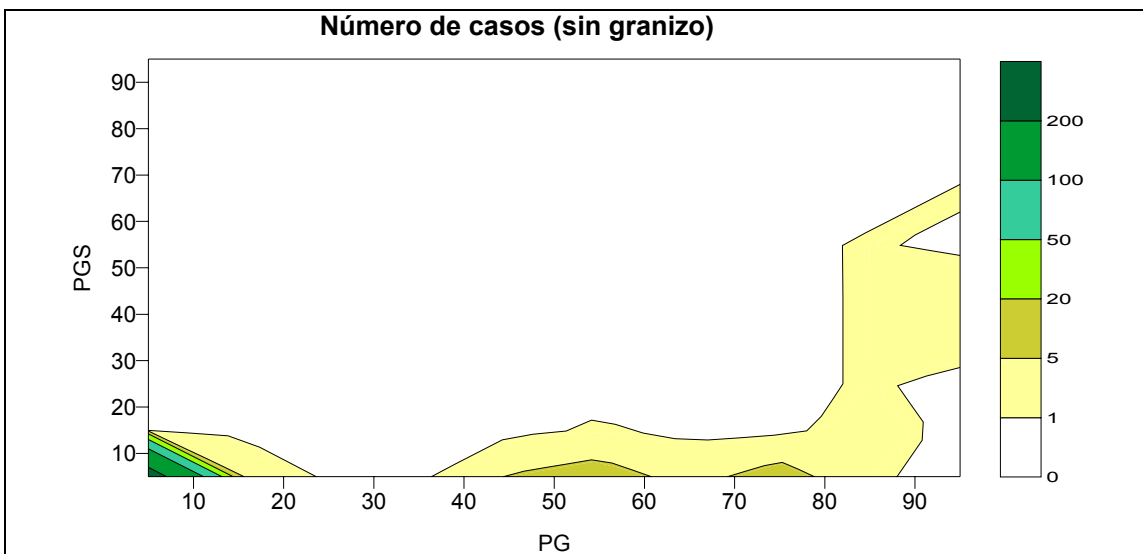


Figura 4.26.c Tormentas sin granizo, casos del 2001 y 2002: relación entre PGS y PG.

IV.4.3.- Nueva determinación de umbrales

Los resultados de la verificación llevada a cabo con los datos del 2002, y los obtenidos en los apartados IV.4.1 y IV.4.2, nos llevaron a tomar la determinación de hacer el nuevo ajuste de umbrales usando idénticas combinaciones de los mismos criterios, pero con los datos de las dos campañas. Por otro lado, la evaluación por parte de los usuarios nos hizo pensar en obtener unos nuevos umbrales que soslayasen de alguna manera la incertidumbre que puede crear la existencia de dos grados de restricción probabilística para cada categoría de granizo. Este planteamiento inicial se justificaba únicamente por el carácter experimental que tenía en principio el módulo, pero está claro que no tiene utilidad de cara a la operatividad diaria, ya que no aporta información relevante para poder discriminar entre tormentas que puedan estar o no estar dando lugar a granizo. En este sentido se va a tratar de reducir las cuatro categorías establecidas inicialmente a solamente dos, que serán, “granizo severo probable” y “granizo de cualquier tamaño probable”.

A partir de estas consideraciones, se trató de seleccionar un único umbral para detectar la presencia de granizo severo, y otro umbral para la presencia de granizo de cualquier tamaño, a diferencia de la categoría usada anteriormente que se había establecido únicamente para “granizo no severo”. La diferencia en la definición de esta nueva categoría de granizo estriba en que se va a ajustar el correspondiente umbral utilizando la base de datos completa, mientras que en el ajuste de umbrales del 2001 para la categoría de “granizo no severo” se usaron sólo los datos de tormentas con granizo no severo y de tormentas sin granizo. Se ha considerado oportuno pasar a llamar a esta categoría “granizo de cualquier tamaño” dado que en este nuevo ajuste se usaron también los datos de las tormentas con granizo severo.

Por lo demás se ha utilizado una misma sistemática de trabajo, basada en tablas de contingencia 2x2, y en el cálculo de los mismos índices y parámetros estadísticos que se usaron en el punto IV.2.4. Del mismo modo que en la determinación de los anteriores umbrales, se calcularon finalmente los intervalos de confianza para los índices obtenidos, y se valoró su grado de significación y el grado de independencia de los datos.

a.- Nuevo umbral para detección de granizo severo

Para determinar el nuevo umbral de detección de granizo severo se generaron tablas de contingencia que tenían como frecuencias marginales 272 casos en la fila correspondiente a “Observado Sí” (datos relativos a la presencia de granizo severo), y 640 casos en la fila de “Observado No” (datos asociados a tormentas que dieron lugar a granizo no severo y tormentas que no produjeron granizo). Las frecuencias marginales relativas a las columnas “Predicción Sí” y “Predicción No” se obtuvieron como en el ajuste del 2001, es decir, a partir de los resultados de reproducir cada situación con diferentes combinaciones de criterios.

En la tabla 4.23 se presentan las tablas de contingencia relativas a algunos de los mejores resultados obtenidos con diferentes combinaciones de umbrales para la categoría de “granizo severo probable”. En la tabla 4.24 tenemos los valores de los índices calculados para cada una de las anteriores tablas de contingencia.

<table border="1"> <tr> <td colspan="2">PGS >=</td> <td colspan="2">15</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>184</td> <td>88</td> <td>272</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>86</td> <td>554</td> <td>640</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>270</td> <td>642</td> <td>912</td> </tr> </table>				PGS >=		15			pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	184	88	272	obs. NO	86	554	640	total	270	642	912	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">DVIL >=</td> <td colspan="2">1,5</td> <td colspan="2">y PGS >=</td> <td colspan="2">10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>195</td> <td>77</td> <td>272</td> <td>obs. SI</td> <td>195</td> <td>77</td> <td>272</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>89</td> <td>551</td> <td>640</td> <td>obs. NO</td> <td>89</td> <td>551</td> <td>640</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>284</td> <td>628</td> <td>912</td> <td>total</td> <td>284</td> <td>628</td> <td>912</td> </tr> </table>				DVIL >=		1,5		y PGS >=		10			pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	195	77	272	obs. SI	195	77	272	obs. NO	89	551	640	obs. NO	89	551	640	total	284	628	912	total	284	628	912																				
PGS >=		15																																																																																					
	pred. SI	pred. NO	total																																																																																				
obs. SI	184	88	272																																																																																				
obs. NO	86	554	640																																																																																				
total	270	642	912																																																																																				
DVIL >=		1,5		y PGS >=		10																																																																																	
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total																																																																																
obs. SI	195	77	272	obs. SI	195	77	272																																																																																
obs. NO	89	551	640	obs. NO	89	551	640																																																																																
total	284	628	912	total	284	628	912																																																																																
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">PGS >=</td> <td colspan="2">10</td> <td colspan="2">y PG >=</td> <td colspan="2">50</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>190</td> <td>82</td> <td>272</td> <td>obs. SI</td> <td>190</td> <td>82</td> <td>272</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>86</td> <td>554</td> <td>640</td> <td>obs. NO</td> <td>86</td> <td>554</td> <td>640</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>276</td> <td>636</td> <td>912</td> <td>total</td> <td>276</td> <td>636</td> <td>912</td> </tr> </table>				PGS >=		10		y PG >=		50			pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	190	82	272	obs. SI	190	82	272	obs. NO	86	554	640	obs. NO	86	554	640	total	276	636	912	total	276	636	912	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">DVIL >=</td> <td colspan="2">3,5</td> <td colspan="2">o PGS >=</td> <td colspan="2">20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>187</td> <td>85</td> <td>272</td> <td>obs. SI</td> <td>187</td> <td>85</td> <td>272</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>98</td> <td>542</td> <td>640</td> <td>obs. NO</td> <td>98</td> <td>542</td> <td>640</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>285</td> <td>627</td> <td>912</td> <td>total</td> <td>285</td> <td>627</td> <td>912</td> </tr> </table>				DVIL >=		3,5		o PGS >=		20			pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	187	85	272	obs. SI	187	85	272	obs. NO	98	542	640	obs. NO	98	542	640	total	285	627	912	total	285	627	912
PGS >=		10		y PG >=		50																																																																																	
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total																																																																																
obs. SI	190	82	272	obs. SI	190	82	272																																																																																
obs. NO	86	554	640	obs. NO	86	554	640																																																																																
total	276	636	912	total	276	636	912																																																																																
DVIL >=		3,5		o PGS >=		20																																																																																	
	pred. SI	pred. NO	total		pred. SI	pred. NO	total																																																																																
obs. SI	187	85	272	obs. SI	187	85	272																																																																																
obs. NO	98	542	640	obs. NO	98	542	640																																																																																
total	285	627	912	total	285	627	912																																																																																

Tabla 4.23 Algunas tablas de contingencia obtenidas para la selección del nuevo umbral para detección de “granizo severo probable”.

<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Umbral:</td> <td colspan="2">PGS >=</td> <td colspan="2">15</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,68</td> <td></td> <td>BIAS =</td> <td>0,99</td> <td></td> <td>HSS =</td> <td>0,54</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR =</td> <td>0,32</td> <td></td> <td>PC =</td> <td>0,81</td> <td></td> <td>OR =</td> <td>13,47</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI =</td> <td>0,51</td> <td></td> <td>HK =</td> <td>0,54</td> <td></td> <td>ORSS =</td> <td>0,86</td> <td></td> </tr> </table>										Umbral:		PGS >=		15							POD =	0,68		BIAS =	0,99		HSS =	0,54			FAR =	0,32		PC =	0,81		OR =	13,47			CSI =	0,51		HK =	0,54		ORSS =	0,86	
Umbral:		PGS >=		15																																													
	POD =	0,68		BIAS =	0,99		HSS =	0,54																																									
	FAR =	0,32		PC =	0,81		OR =	13,47																																									
	CSI =	0,51		HK =	0,54		ORSS =	0,86																																									
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Umbral:</td> <td colspan="2">PGS >=</td> <td colspan="2">10</td> <td colspan="2">y PG >=</td> <td colspan="2">50</td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,70</td> <td></td> <td>BIAS =</td> <td>1,01</td> <td></td> <td>HSS =</td> <td>0,56</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR =</td> <td>0,31</td> <td></td> <td>PC =</td> <td>0,82</td> <td></td> <td>OR =</td> <td>14,93</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI =</td> <td>0,53</td> <td></td> <td>HK =</td> <td>0,56</td> <td></td> <td>ORSS =</td> <td>0,87</td> <td></td> </tr> </table>										Umbral:		PGS >=		10		y PG >=		50			POD =	0,70		BIAS =	1,01		HSS =	0,56			FAR =	0,31		PC =	0,82		OR =	14,93			CSI =	0,53		HK =	0,56		ORSS =	0,87	
Umbral:		PGS >=		10		y PG >=		50																																									
	POD =	0,70		BIAS =	1,01		HSS =	0,56																																									
	FAR =	0,31		PC =	0,82		OR =	14,93																																									
	CSI =	0,53		HK =	0,56		ORSS =	0,87																																									
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Umbral:</td> <td colspan="2">DVIL >=</td> <td colspan="2">1,5</td> <td colspan="2">y PGS >=</td> <td colspan="2">10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,72</td> <td></td> <td>BIAS =</td> <td>1,04</td> <td></td> <td>HSS =</td> <td>0,57</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR =</td> <td>0,31</td> <td></td> <td>PC =</td> <td>0,82</td> <td></td> <td>OR =</td> <td>15,68</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI =</td> <td>0,54</td> <td></td> <td>HK =</td> <td>0,58</td> <td></td> <td>ORSS =</td> <td>0,88</td> <td></td> </tr> </table>										Umbral:		DVIL >=		1,5		y PGS >=		10			POD =	0,72		BIAS =	1,04		HSS =	0,57			FAR =	0,31		PC =	0,82		OR =	15,68			CSI =	0,54		HK =	0,58		ORSS =	0,88	
Umbral:		DVIL >=		1,5		y PGS >=		10																																									
	POD =	0,72		BIAS =	1,04		HSS =	0,57																																									
	FAR =	0,31		PC =	0,82		OR =	15,68																																									
	CSI =	0,54		HK =	0,58		ORSS =	0,88																																									
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Umbral:</td> <td colspan="2">DVIL >=</td> <td colspan="2">3,5</td> <td colspan="2">o PGS >=</td> <td colspan="2">20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,69</td> <td></td> <td>BIAS =</td> <td>1,05</td> <td></td> <td>HSS =</td> <td>0,53</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR =</td> <td>0,34</td> <td></td> <td>PC =</td> <td>0,80</td> <td></td> <td>OR =</td> <td>12,17</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI =</td> <td>0,51</td> <td></td> <td>HK =</td> <td>0,53</td> <td></td> <td>ORSS =</td> <td>0,85</td> <td></td> </tr> </table>										Umbral:		DVIL >=		3,5		o PGS >=		20			POD =	0,69		BIAS =	1,05		HSS =	0,53			FAR =	0,34		PC =	0,80		OR =	12,17			CSI =	0,51		HK =	0,53		ORSS =	0,85	
Umbral:		DVIL >=		3,5		o PGS >=		20																																									
	POD =	0,69		BIAS =	1,05		HSS =	0,53																																									
	FAR =	0,34		PC =	0,80		OR =	12,17																																									
	CSI =	0,51		HK =	0,53		ORSS =	0,85																																									

Tabla 4.24 Valores de los índices de verificación calculados con las tablas de contingencia para el ajuste del nuevo umbral para detección de “granizo severo probable”.

A partir de estos resultados se seleccionó la combinación de criterios: “**DVIL ≥ 1,5 Y PGS ≥ 10**”, (resaltada en amarillo en la tabla 4.24). En esta tabla se puede comprobar que con este criterio se obtienen los valores más altos de POD, CSI, PC y OR. Da el valor más bajo de FAR (0.31), mientras que ORSS y BIAS están muy próximos a 1.

También se obtienen los mejores valores del HSS, indicando una mejora del 57% sobre la decisión aleatoria y del HK, revelando una buena capacidad para separar los casos con y sin granizo severo.

b.- Nuevo umbral para detección de granizo de cualquier tamaño

Para el ajuste de este nuevo umbral se han generado tablas de contingencia que tienen como frecuencias marginales 622 datos en la fila correspondiente a “Observado Sí” (datos correspondientes a la presencia de granizo severo y no severo), y 290 datos en la fila de “Observado No” (datos asociados a tormentas que no dieron lugar a granizo). Las frecuencias marginales relativas a las columnas “Predicción Sí” y “Predicción No” se obtuvieron del mismo modo que en apartados anteriores.

En la tabla 4.25 se pueden ver algunas de las tablas de contingencia que dieron mejores resultados, a partir de diferentes combinaciones de criterios. En la tabla 4.26 se pueden ver los índices de verificación calculados, que son los que usaremos para hacer la selección del nuevo umbral para esta categoría de granizo.

Teniendo en cuenta los valores que aparecen en estas tablas se seleccionó la combinación de criterios: “**DVIL \geq 1,3 o PG \geq 20**”, que está resaltada en amarillo en la tabla 4.26. En esta tabla se puede comprobar que mediante este umbral se obtienen los valores más altos de POD, CSI, PC y HSS. Aunque el valor de FAR no sea el mejor de todos, resulta ser francamente bajo (0,15). Por otro lado es el que tiene un BIAS más próximo a 1. Los valores que se obtienen para los índices HK, OR y ORSS son muy similares a los de los otros criterios considerados, y suficientemente favorables.

En base a los puntos anteriores, se decidió poner operativo durante la campaña del 2003 un nuevo módulo de detección de granizo en el que se pasa de las cuatro categorías del módulo anterior a las dos que hemos definido en este punto:

- GRANIZO SEVERO PROBABLE: cuando la DVIL \geq 1,5 y la PGS \geq 10.
- GRANIZO DE CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE: cuando la DVIL \geq 1,3 o la PG \geq 20.

Del mismo modo que durante la campaña anterior, este módulo trata de asignar a cada célula 3D identificada por el procedimiento YRADAR las categorías de granizo de más a menos desfavorable. Se comprueba en primer lugar si cumple los requisitos para estar en la categoría de “granizo severo probable”, si cumple estas condiciones queda asignada a ella, si no es así, se comprueba si cumple las condiciones para la categoría de “granizo de cualquier tamaño probable”. Cada célula identificada queda así asignada a una de estas dos clases, o bien se deja como una célula sin probabilidad de granizo.

<table border="1"> <tr> <td colspan="2">DVIL>=</td> <td colspan="2">1,3</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>491</td> <td>131</td> <td>622</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>86</td> <td>204</td> <td>290</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>577</td> <td>335</td> <td>912</td> </tr> </table>				DVIL>=		1,3			pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	491	131	622	obs. NO	86	204	290	total	577	335	912	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">DVIL>=</td> <td colspan="2">1,5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>453</td> <td>169</td> <td>622</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>67</td> <td>223</td> <td>290</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>520</td> <td>392</td> <td>912</td> </tr> </table>				DVIL>=		1,5			pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	453	169	622	obs. NO	67	223	290	total	520	392	912
DVIL>=		1,3																																													
	pred. SI	pred. NO	total																																												
obs. SI	491	131	622																																												
obs. NO	86	204	290																																												
total	577	335	912																																												
DVIL>=		1,5																																													
	pred. SI	pred. NO	total																																												
obs. SI	453	169	622																																												
obs. NO	67	223	290																																												
total	520	392	912																																												
<table border="1"> <tr> <td>DVIL>=</td> <td>1,3</td> <td>o PG >=</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>501</td> <td>121</td> <td>622</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>91</td> <td>199</td> <td>290</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>592</td> <td>320</td> <td>912</td> </tr> </table>				DVIL>=	1,3	o PG >=	20		pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	501	121	622	obs. NO	91	199	290	total	592	320	912	<table border="1"> <tr> <td>DVIL>=</td> <td>1,5</td> <td>o PG >=</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>pred. SI</td> <td>pred. NO</td> <td>total</td> </tr> <tr> <td>obs. SI</td> <td>474</td> <td>148</td> <td>622</td> </tr> <tr> <td>obs. NO</td> <td>73</td> <td>217</td> <td>290</td> </tr> <tr> <td>total</td> <td>547</td> <td>365</td> <td>912</td> </tr> </table>				DVIL>=	1,5	o PG >=	20		pred. SI	pred. NO	total	obs. SI	474	148	622	obs. NO	73	217	290	total	547	365	912
DVIL>=	1,3	o PG >=	20																																												
	pred. SI	pred. NO	total																																												
obs. SI	501	121	622																																												
obs. NO	91	199	290																																												
total	592	320	912																																												
DVIL>=	1,5	o PG >=	20																																												
	pred. SI	pred. NO	total																																												
obs. SI	474	148	622																																												
obs. NO	73	217	290																																												
total	547	365	912																																												

Tabla 4.25 Algunas tablas de contingencia obtenidas para la selección del nuevo umbral para detección de “granizo de cualquier tamaño probable”.

<table border="1"> <tr> <td>Umbral:</td> <td>DVIL>=</td> <td>1,3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,79</td> <td>BIAS=</td> <td>0,93</td> <td>HSS= 0,47</td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR=</td> <td>0,15</td> <td>PC=</td> <td>0,76</td> <td>OR= 8,89</td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI=</td> <td>0,69</td> <td>HK=</td> <td>0,49</td> <td>ORSS= 0,80</td> </tr> </table>						Umbral:	DVIL>=	1,3					POD =	0,79	BIAS=	0,93	HSS= 0,47		FAR=	0,15	PC=	0,76	OR= 8,89		CSI=	0,69	HK=	0,49	ORSS= 0,80																		
Umbral:	DVIL>=	1,3																																													
	POD =	0,79	BIAS=	0,93	HSS= 0,47																																										
	FAR=	0,15	PC=	0,76	OR= 8,89																																										
	CSI=	0,69	HK=	0,49	ORSS= 0,80																																										
<table border="1"> <tr> <td>Umbral:</td> <td>DVIL>=</td> <td>1,3</td> <td>o</td> <td>PG>=</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,81</td> <td></td> <td>BIAS=</td> <td>0,95</td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR=</td> <td>0,15</td> <td></td> <td>PC=</td> <td>0,77</td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI=</td> <td>0,70</td> <td></td> <td>HK=</td> <td>0,49</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>HSS= 0,48</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>OR= 9,05</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>ORSS= 0,80</td> </tr> </table>						Umbral:	DVIL>=	1,3	o	PG>=	20		POD =	0,81		BIAS=	0,95		FAR=	0,15		PC=	0,77		CSI=	0,70		HK=	0,49						HSS= 0,48						OR= 9,05						ORSS= 0,80
Umbral:	DVIL>=	1,3	o	PG>=	20																																										
	POD =	0,81		BIAS=	0,95																																										
	FAR=	0,15		PC=	0,77																																										
	CSI=	0,70		HK=	0,49																																										
					HSS= 0,48																																										
					OR= 9,05																																										
					ORSS= 0,80																																										
<table border="1"> <tr> <td>Umbral:</td> <td>DVIL>=</td> <td>1,5</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,73</td> <td>BIAS=</td> <td>0,84</td> <td>HSS= 0,45</td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR=</td> <td>0,13</td> <td>PC=</td> <td>0,74</td> <td>OR= 8,92</td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI=</td> <td>0,66</td> <td>HK=</td> <td>0,50</td> <td>ORSS= 0,80</td> </tr> </table>						Umbral:	DVIL>=	1,5					POD =	0,73	BIAS=	0,84	HSS= 0,45		FAR=	0,13	PC=	0,74	OR= 8,92		CSI=	0,66	HK=	0,50	ORSS= 0,80																		
Umbral:	DVIL>=	1,5																																													
	POD =	0,73	BIAS=	0,84	HSS= 0,45																																										
	FAR=	0,13	PC=	0,74	OR= 8,92																																										
	CSI=	0,66	HK=	0,50	ORSS= 0,80																																										
<table border="1"> <tr> <td>Umbral:</td> <td>DVIL>=</td> <td>1,5</td> <td>o</td> <td>PG >=</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td></td> <td>POD =</td> <td>0,76</td> <td></td> <td>BIAS=</td> <td>0,88</td> </tr> <tr> <td></td> <td>FAR=</td> <td>0,13</td> <td></td> <td>PC=</td> <td>0,76</td> </tr> <tr> <td></td> <td>CSI=</td> <td>0,68</td> <td></td> <td>HK=</td> <td>0,51</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>HSS= 0,48</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>OR= 9,52</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>ORSS= 0,81</td> </tr> </table>						Umbral:	DVIL>=	1,5	o	PG >=	20		POD =	0,76		BIAS=	0,88		FAR=	0,13		PC=	0,76		CSI=	0,68		HK=	0,51						HSS= 0,48						OR= 9,52						ORSS= 0,81
Umbral:	DVIL>=	1,5	o	PG >=	20																																										
	POD =	0,76		BIAS=	0,88																																										
	FAR=	0,13		PC=	0,76																																										
	CSI=	0,68		HK=	0,51																																										
					HSS= 0,48																																										
					OR= 9,52																																										
					ORSS= 0,81																																										

Tabla 4.26 Valores de los índices de verificación calculados con las tablas de contingencia para el ajuste del nuevo umbral para detección de “granizo de cualquier tamaño probable”.

IV.4.4.- Independencia, significación e intervalos de confianza

A continuación se valorará, del mismo modo que se hizo en el punto IV.2.5, en qué medida las índices de verificación que hemos obtenido a partir de las tablas de contingencia correspondientes al ajuste de los dos nuevos umbrales indican un buen comportamiento de los mismos, y si sus resultados se pueden considerar suficientemente fiables.

En la tabla 4.27 se pueden ver los valores del ORSS, que sirven para tener una primera idea de la independencia/asociación de los datos obtenidos en las tablas de contingencia de los nuevos umbrales.

CATEGORÍA DE GRANIZO	ORSS
SEVERO PROBABLE	0,88
CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE	0,80

Tabla 4.27 Valores del ORSS para los nuevos umbrales seleccionados.

A partir de las tablas de contingencia correspondientes a los dos nuevos umbrales seleccionados (tablas 4.24 y 4.26) también se ha evaluado el grado de independencia por medio del test χ^2 de Pearson en las mismas condiciones que en puntos anterior, es decir, estableciendo la misma Hipótesis nula y para un mismo nivel de significación ($\alpha = 0,01$). Los resultados obtenidos están en la tabla 4.28.

CATEGORÍA DE GRANIZO	$\chi^2(0,01; 1)$	J	Prob(J)
SEVERO PROBABLE	6,63	294,54	$5,09 \cdot 10^{-66}$
CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE	6,63	207,77	$4,21 \cdot 10^{-47}$

Tabla 4.28 Valores obtenidos al efectuar el test de independencia χ^2 de Pearson para los nuevos umbrales seleccionados.

Para los valores de POD y FAR del nuevo proceso de ajuste se han calculado también los intervalos de confianza con el mismo nivel de significación, habiéndose obtenido los valores de las tablas 4.29 y 4.30.

CATEGORÍA DE GRANIZO	POD	Máximo	Mínimo
SEVERO PROBABLE	0,72	0,78	0,64
CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE	0,81	0,84	0,76

Tabla 4.29 Intervalos de confianza de los valores de POD obtenidos para los nuevos umbrales seleccionados.

CATEGORÍA DE GRANIZO	FAR	Máximo	Mínimo
SEVERO PROBABLE	0,31	0,39	0,25
CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE	0,15	0,20	0,12

Tabla 4.30 Intervalos de confianza de los valores de FAR obtenidos para los nuevos umbrales seleccionados.

En la tabla 4.31 están los resultados del cálculo del error estándar del HK, efectuados a partir de los datos usados en el nuevo ajuste.

CATEGORÍA DE GRANIZO	HK	error	HK-error
SEVERO PROBABLE	0,58	0,03	0,55
CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE	0,49	0,03	0,46

Tabla 4.31 Error estándar del HK y valor mínimo que podría tener para los nuevos umbrales seleccionados.

Los resultados del test de significación del OR a partir de los datos obtenidos en el proceso de ajuste de los dos nuevos umbrales, se pueden ver en la tabla 4.32.

CATEGORÍA DE GRANIZO	Ln(OR)	error	Lmín
SEVERO PROBABLE	2,75	0,18	0,45
CUALQUIER TAMAÑO PROBABLE	2,20	0,16	0,42

Tabla 4.32 Test de significación del OR para los nuevos umbrales, con el valor de su error estándar y el valor mínimo admisible (Lmin) para un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

Las conclusiones que se pueden extraer de todos estos test van en la misma línea que las que se sacaron en los capítulos IV.2.5 y IV.3.3, y se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Existe un alto grado de asociación entre los datos observados y previstos por el módulo de detección de granizo, dado el alto valor del ORSS y el resultado del test χ^2 de Pearson. Según este test, se puede afirmar también que las probabilidades de que sean independientes los datos observados de granizo y los datos obtenidos por medio del módulo de detección son prácticamente nulas.
- Los intervalos de confianza obtenidos para la POD y la FAR confirman que ambos índices de verificación son significativamente favorables.
- A partir del error estándar calculado, se tiene que los valores del HK son significativamente mayores que cero, indicando siempre que el módulo desarrollado tiene una buena capacidad para separar casos con y sin granizo.
- Finalmente, y como resumen de este proceso, se puede afirmar que los datos previstos por el módulo de detección de granizo son altamente dependientes de las observaciones, y que los buenos valores de verificación obtenidos no se deben simplemente a un muestreo casual.

V.- Ejemplos

V.1.- Santander, 24 de junio de 2003

V.2.- Alcañiz (Teruel), 23 de julio de 2003

V.1.- SANTANDER, 24 DE JUNIO DE 2003

Durante la mañana del día 24 de junio de 2003, se formó sobre el S de la provincia de Santander una estructura convectiva de gran desarrollo que se desplazó rápidamente hacia el N hasta llegar a Santander capital. En esta ciudad y en poblaciones cercanas como Bezana, El Astillero, Camargo, Maliaño y Solares, se recogieron del orden de 27 a 34 litros por m² en apenas 15 minutos. Además tuvo lugar una intensa granizada severa con tamaños que oscilaron entre 3 y 5 cm de diámetro.

En la figura 5.1 se pueden ver los productos básicos del modulo de análisis 3D de la aplicación YRADAR en dos momentos de la evolución de la célula que afectó a Santander, a las 09:00 y a las 09:30 UTC. En las tablas laterales de estas imágenes se pueden apreciar los altos valores de diversos parámetros analizados (reflectividad máxima, espesor, ecotop, y densidad de VIL), además del resultado del nuevo módulo de granizo, que en la imagen de la 09:00 indica probabilidad de granizo de cualquier tamaño (letra g de color rojo), pero que a las 09:30 ya es de granizo severo (letra G de color rojo).

En la figura 5.2, se presentan dos ampliaciones de la estructura a las 09:30, momento en que comienza a afectar a la capital de la provincia. La parte superior de la figura es una ampliación de la estructura convectiva, identificada por el procedimiento 2D que contiene a la célula 3D n° 1, en la que se aprecia el considerable tamaño de dicha estructura y se dan diferentes propiedades a partir del análisis convectivo, entre otras su reflectividad máxima (55 dBZ), su elevado ecotop (14 km) y su densidad de VIL (3,3 gm⁻³). La imagen de la parte inferior es la ampliación de la correspondiente célula 3D, que se presenta sobre una imagen de reflectividad en escala de grises, en la que se aprecia la zona de reflectividades más intensas (colores más claros) dispuesta según una dirección E-W. En la tabla lateral de la figura se presenta la evolución de los valores de una serie de parámetros durante la hora anterior del ciclo de vida de la célula 3D. En la ampliación de la estructura 2D se observa la diagnosis de granizo en ese momento, indicando que existe probabilidad de granizo severo, mientras que en la ampliación de la célula 3D se ve que la diagnosis de granizo daba esta misma probabilidad en las dos últimas exploraciones radar, además de probabilidad de granizo de cualquier tamaño en las dos exploraciones iniciales en que se identificó la célula convectiva.

En principio parece útil, desde un punto de vista operativo, la diagnosis de probabilidad de granizo presentada de esta manera. Permite centrar la atención del predictor en determinadas estructuras, no sólo en base a una diagnosis puntual de una imagen radar, sino que además pone de relieve aquellas estructuras persistentes que durante varias imágenes seguidas se mantienen con unos altos valores de distintos parámetros radar (reflectividad máxima, ecotop, densidad de VIL, ...) y con una diagnosis de granizo favorable a la presencia del mismo.

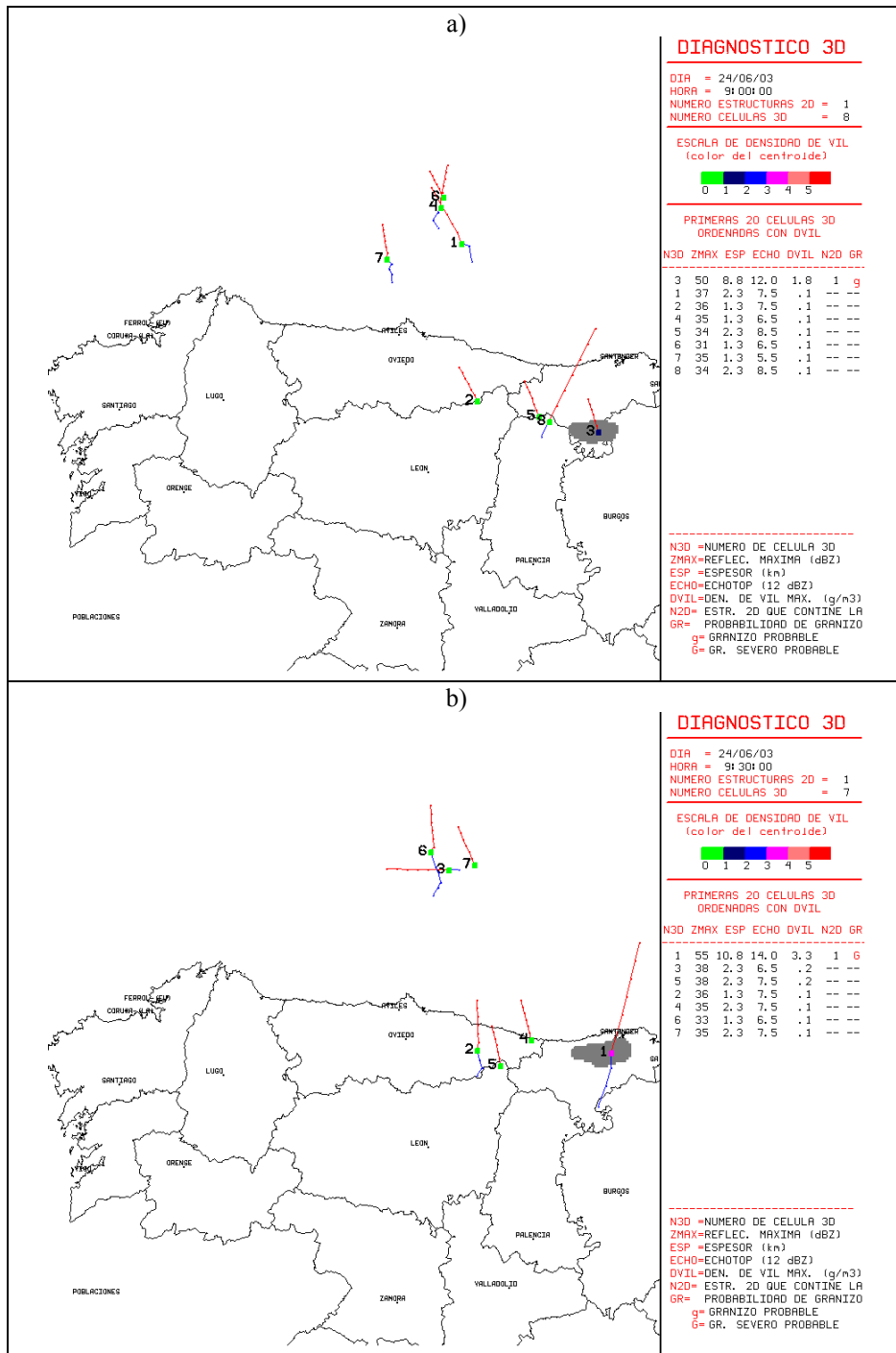


Figura 5.1 Diagnóstico 3D de la aplicación YRADAR, mostrando la estructura convectiva que afectó a Santander, (a) célula n° 3, a las 09:00 y (b) célula n° 1, a las 09:30 UTC.

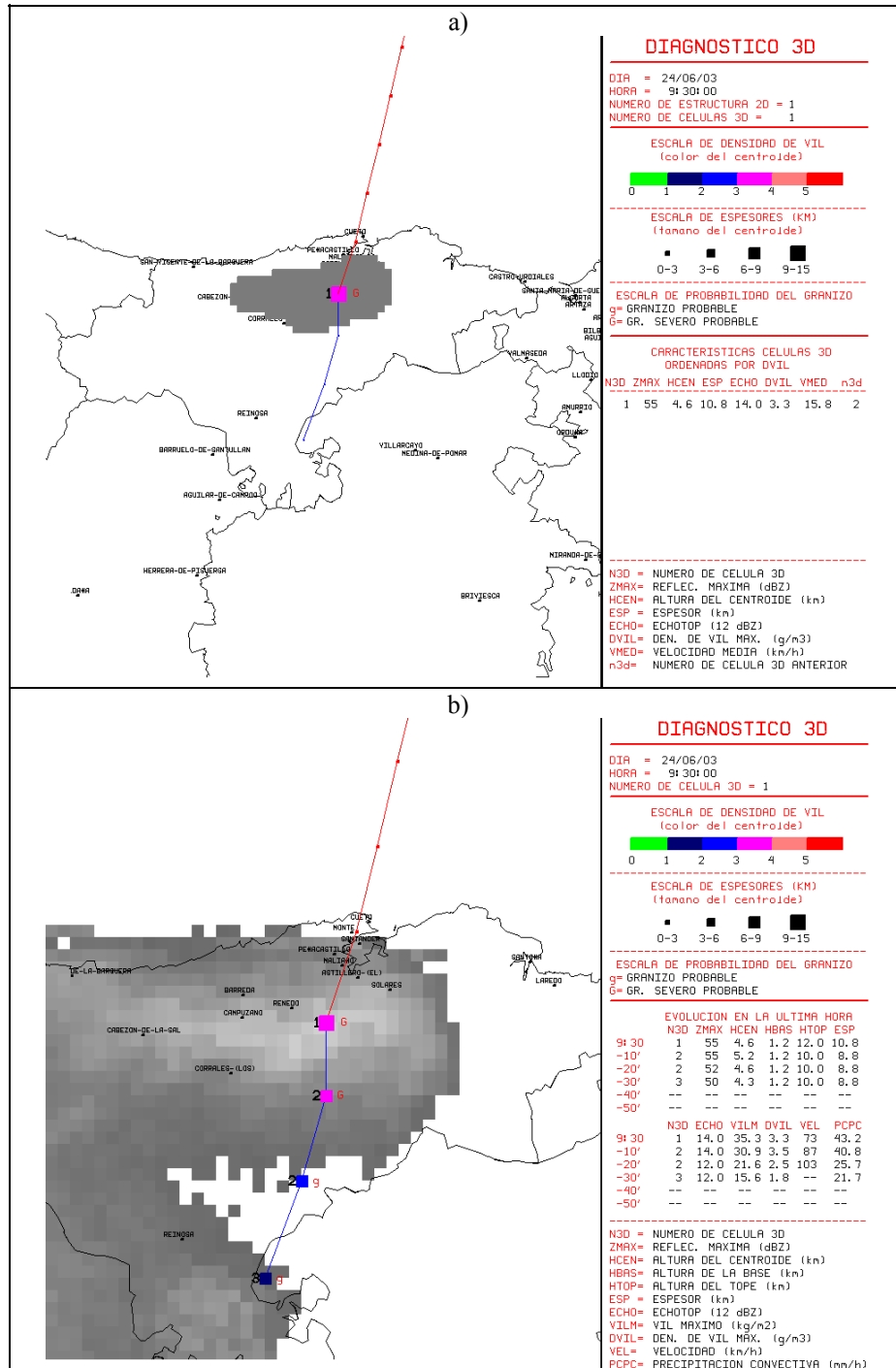


Figura 5.2 Ampliaciones correspondientes a las 09:30 UTC (a) de la estructura 2D identificada, y (b) de la célula 3D correspondiente, con su evolución durante los instantes previos.

En la figura 5.3 presentamos la secuencia de imágenes de los productos del análisis 2D de la aplicación YRADAR durante los momentos posteriores al paso de la estructura convectiva por Santander. Después de afectar a la bahía de dicha ciudad, esta estructura se adentró en el mar, y tal y como se ve en las imágenes que presentamos se conforma siguiendo un arqueamiento cada vez mayor, para constituir lo que da la impresión de ser un “bow echo” o estructura en arco (Martín et al., 2001; Johns & Doswell, 1992). En cualquier caso, lo que sí se puede afirmar es que el desarrollo de las estructuras en arco

es un indicativo de que existe cierto grado de organización en la convección, lo cual requiere ambientes con cierto grado de inestabilidad y de cizalladura vertical del viento. Todo esto, por otro lado, está perfectamente de acuerdo con las características observadas en la estructura, su persistencia, sus altos valores de reflectividad, sus elevados ecotops, sus intensos valores de VIL, de DVIL, etc.

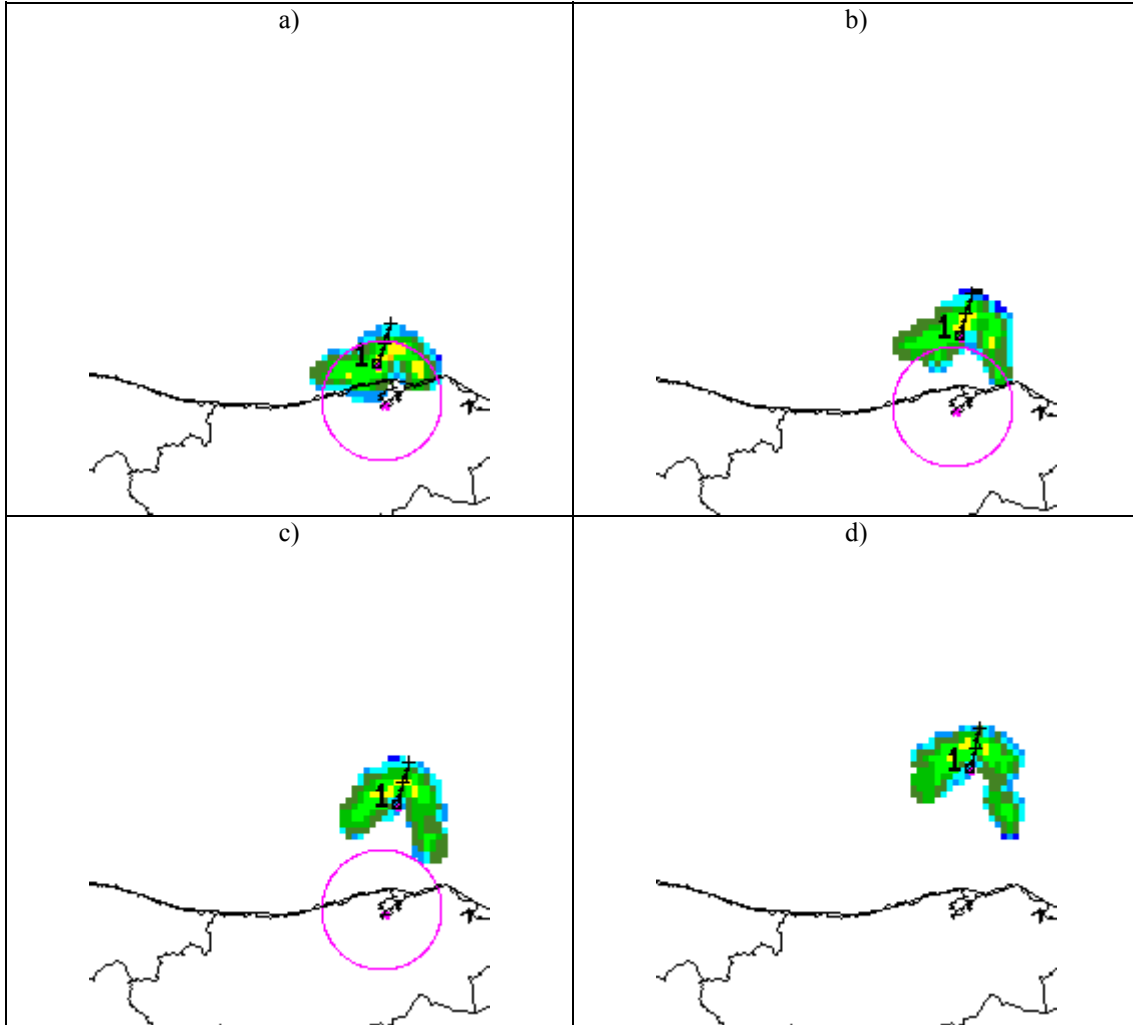


Figura 5.3 Imágenes de los productos gráficos del módulo 2D de la aplicación YRADAR mostrando la evolución de la estructura convectiva que afectó a Santander en las exploraciones correspondientes a las (a) 09:40, (b) 09:50, (c) 10:00 y (d) 10:10 UTC.

V.2.- ALCAÑIZ (TERUEL), 23 DE JULIO DE 2003

El día 23 de julio de 2003 a primeras horas de la tarde se desarrolló en el NE de la provincia de Teruel una estructura convectiva persistente y de grandes dimensiones que ocasionó en la comarca importantes daños. Alrededor de las 15:00 UTC esta estructura generó un tornado de intensidad F2 en la escala de Fujita, como se puede apreciar en el documento elaborado por Quirantes (2004). En nuestro caso el efecto que más nos interesa es la intensa granizada que entre las 14:30 y las 17:30 UTC afectó a diversas localidades del NE de Teruel y SE de Zaragoza, entre otras a Albalate del Arzobispo, Híjar, Samper de Calanda, Valmuel, Puigmoreno y Alcañiz. El granizo llegó a alcanzar tamaños, según la documentación disponible, de hasta 9 cm de diámetro, causando importantes pérdidas en la cosecha de melocotón de la zona y grandes destrozos en el área urbana de Alcañiz y en el polígono industrial de Las Horcas. Teniendo en cuenta los efectos de esta estructura convectiva, las diversas evidencias indirectas del análisis radar, y sobre todo la presencia de un tornado, se podía considerar que esta estructura era una supercélula, tal y como queda confirmado posteriormente al detectarse un mesociclón persistente en el análisis del viento radial Doppler, Conejo & Elizaga (2004).

En la figura 5.4 se pueden ver los productos básicos del módulo de análisis 2D de la aplicación YRADAR en dos instantes a lo largo del periodo de tiempo durante el que esta célula estuvo afectando al NE de la provincia de Teruel. En estas dos imágenes se aprecia fundamentalmente su intensa reflectividad y el gran tamaño de la estructura, destacando la forma de gancho que toma su flanco S en la imagen de las 15:00 UTC, lo cual puede ser considerado como una evidencia indirecta de la existencia de un mesociclón.

En la figura 5.5 se presentan las imágenes básicas de las 14:20 y de las 15:00 UTC del módulo 3D de la aplicación YRADAR. En estas imágenes se aprecia, además de los aspectos señalados en el párrafo anterior, los altos valores de reflectividad máxima, el gran espesor de la célula, su elevado ecotop y la intensa densidad de VIL. En estas condiciones el módulo de granizo ya indica la probabilidad de granizo severo antes de las 14:20 UTC.

En la figura 5.6 se muestran las ampliaciones de la estructura 2D a las 14:20 y a las 15:00 UTC, en las que apreciamos, además de los intensos valores de reflectividad, densidad de VIL, etc. que esta estructura 2D incluye 2 o más células 3D con distintas características cada una. En las dos imágenes se aprecia que la célula que nos interesa, identificada primero como n° 2 y luego como n° 1, está señalada desde los primeros momentos con alta probabilidad de granizo severo. Resulta también interesante observar que en la ampliación de las 15:00 UTC, se aprecia al S del centroide principal (célula n° 1) y sobre una zona con baja reflectividad, que podría corresponder a la Región de Eco Débil Acotada, un núcleo de reflectividades intensas (célula n° 27) suspendido en altura (reflectividad máxima de 52 dBZ, altura de centroide 10,4 km y espesor de la célula de 3,5 km). Esto puede constituir sin duda otra evidencia indirecta del carácter supercelular de esta estructura, que además de la estructura en gancho que se aprecia en los ecos de niveles bajos, presenta una Zona Abalconada en niveles altos, reflejo de las intensas corrientes ascendentes que existen.

Finalmente podemos ver la figura 5.7, en la que presentamos la ampliación de las células 3D correspondientes a las 14:20 y a las 15:00 UTC. Además de apreciarse la posición del centroide respecto a la estructura de reflectividades en el PPI (colores grises), se ve, tanto en la imagen como en la tabla adjunta en cada caso, la evolución de diversas características de la célula. En especial interesa destacar que ya desde los estados iniciales de su ciclo de vida y a lo largo de todo el periodo de tiempo que aparece en las imágenes, el módulo de detección de granizo ponía de manifiesto la probabilidad de granizo severo en la mencionada célula.

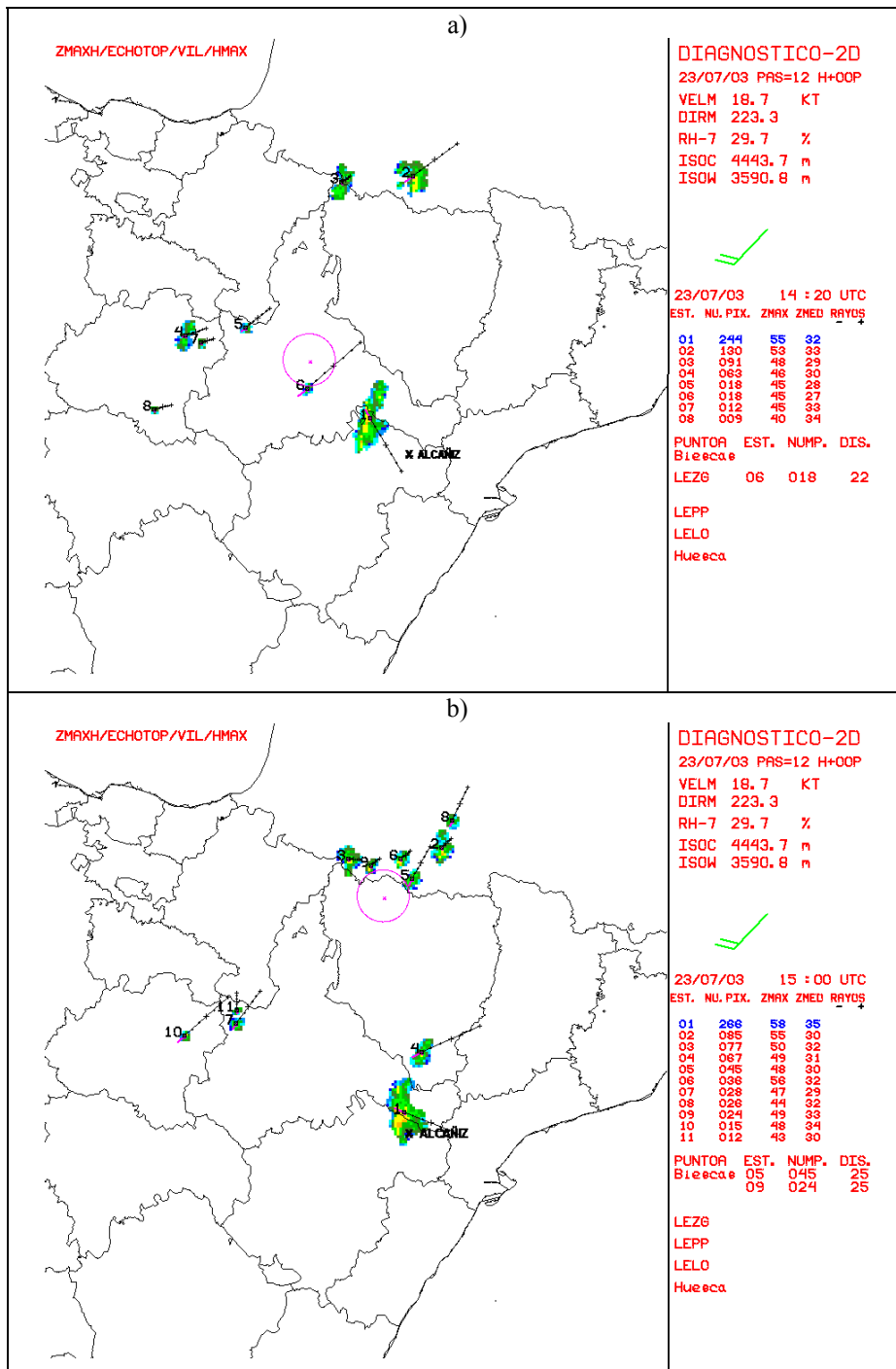


Figura 5.4 Diagnóstico 2D de la aplicación YRADAR, mostrando la evolución de la estructura convectiva (estructura n° 1), que afectó al NE de la provincia de Teruel (a) a las 14:20 y (b) a las 15:00 UTC.

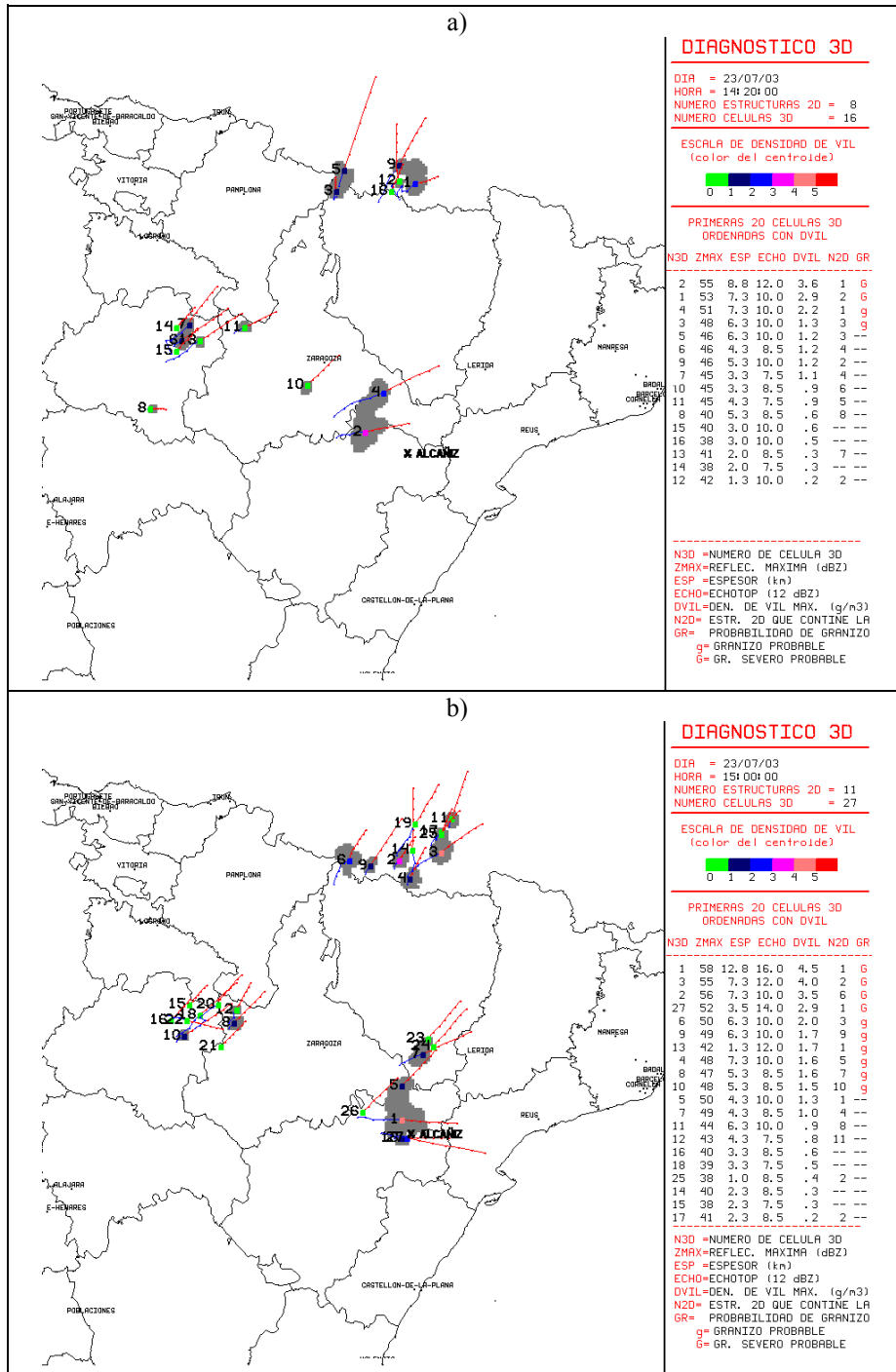


Figura 5.5 Imágenes básicas del módulo 3D de la aplicación YRADAR con la célula que afectó a Alcañiz (a) a las 14:20 y (b) a las 15:00 UTC.

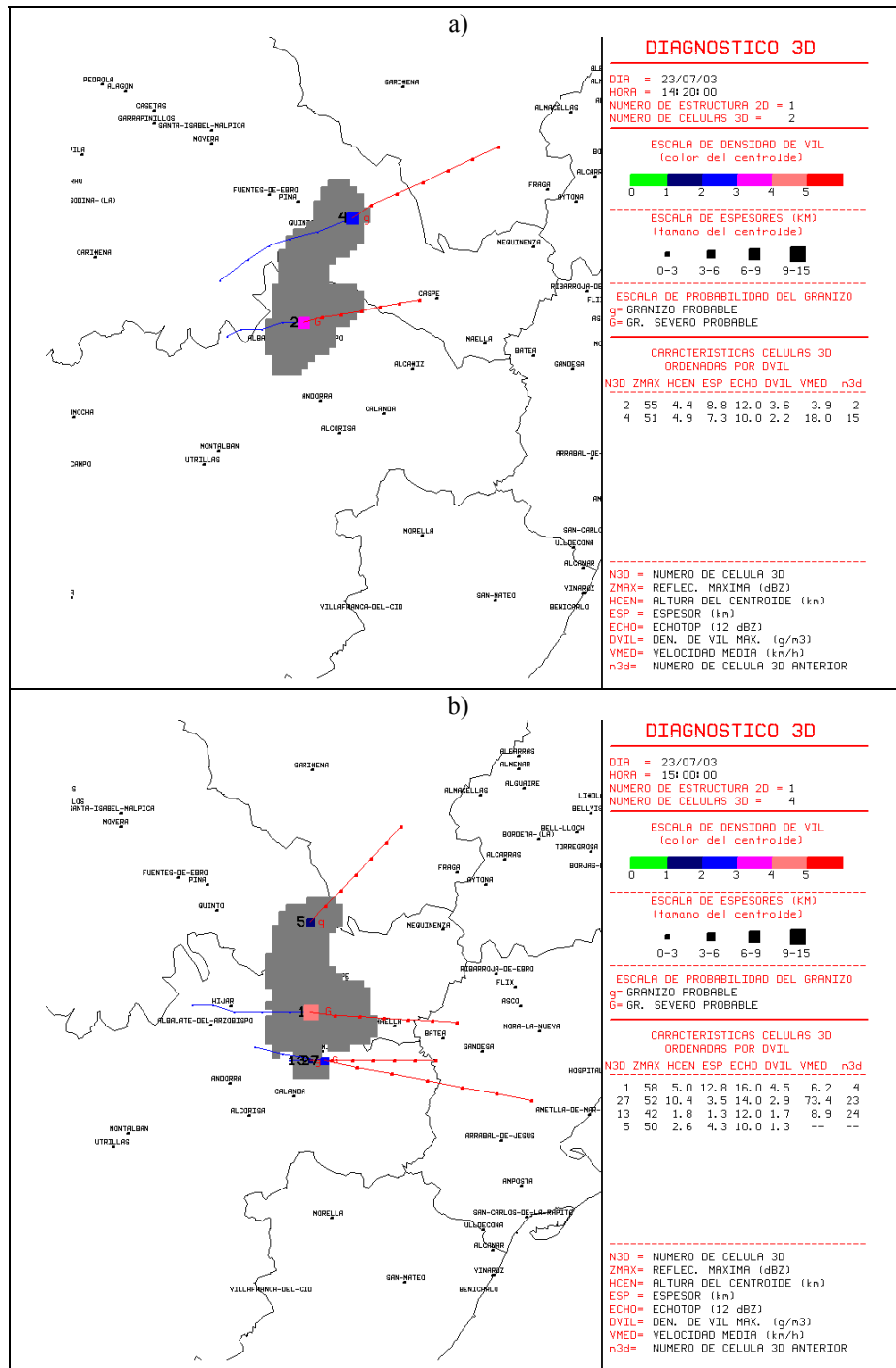


Figura 5.6 Ampliación de las estructuras 2D identificadas en las proximidades de Alcañiz (a) a las 14:20 y (b) a las 15:00 UTC.

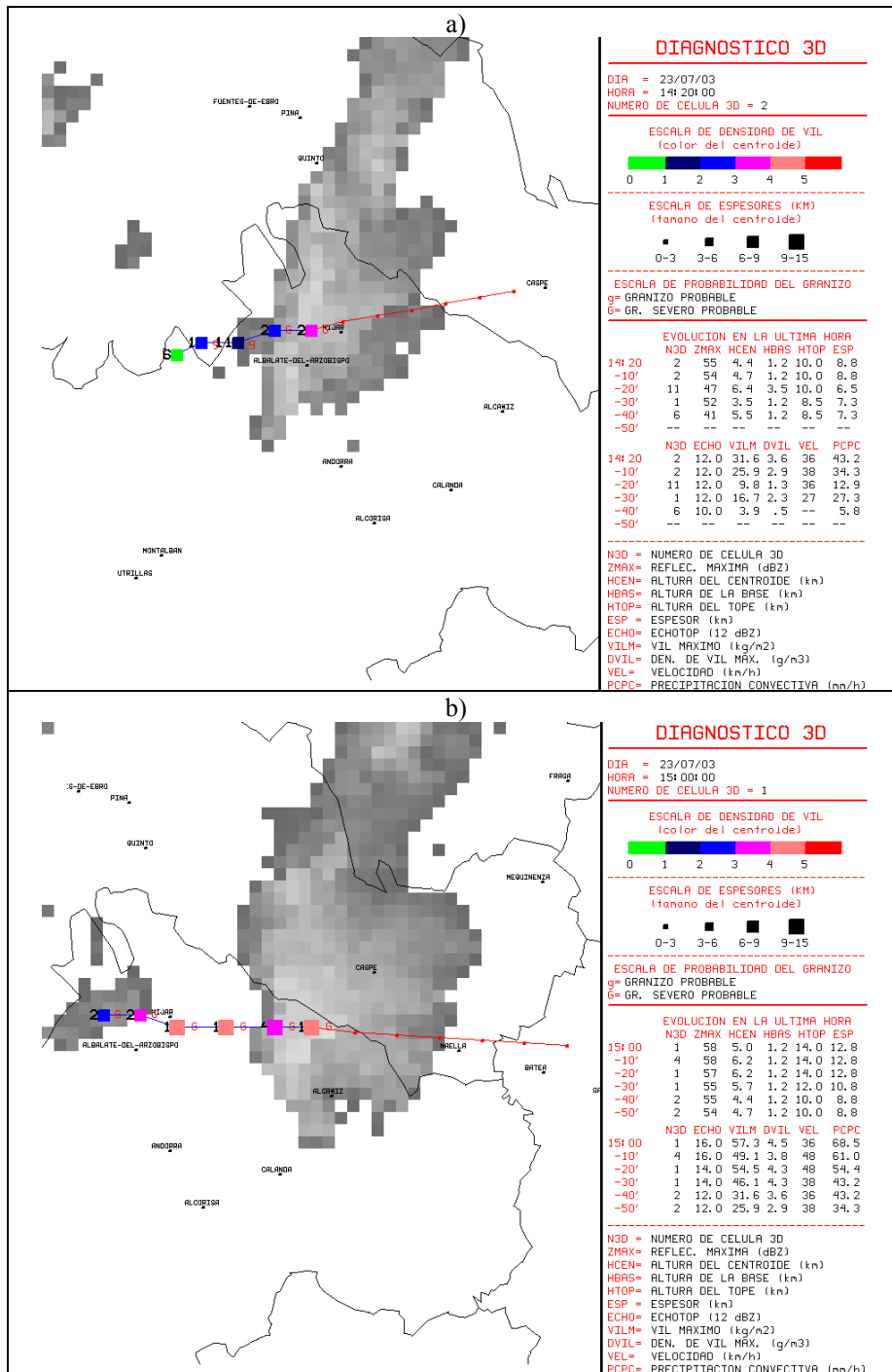


Figura 5.7 Ampliación de la célula 3D que afectó a Alcañiz y a otras localidades próximas (a) a las 14:20 y (b) a las 15:00 UTC.

VI.- Conclusiones

Desde el año 2001 se ha trabajado en el STAP en el desarrollo de un módulo de detección de granizo basado en datos radar. Este módulo está integrado en la aplicación YRADAR, de análisis de estructuras y células convectivas, y su finalidad es facilitar a los predictores operativos la toma de decisiones en aquellas situaciones en que se enfrentan a fenómenos adversos de origen convectivo.

El módulo desarrollado está basado en tres criterios usados con cierto éxito, sobre todo en los EEUU, y que se seleccionaron tras un estudio preliminar que puso de manifiesto que tenían cierta destreza para detectar la presencia de granizo severo en nuestro entorno geográfico. Los criterios seleccionados como más efectivos fueron el criterio de Waldvogel, la Densidad de VIL (DVIL) y el Algoritmo de Detección de Granizo (HDA).

Simultáneamente al mencionado estudio preliminar se inició una campaña de recogida de datos de observación de granizo para disponer de información lo más exhaustiva y precisa posible sobre granizadas (lugar, hora y tamaño del granizo) con la finalidad de poder usarla para el ajuste y calibración del módulo a desarrollar. Esta información proviene de diferentes fuentes y se ha tratado de contrastar en la medida de lo posible a través de los CMTs correspondientes para desechar aquellos datos erróneos o poco fiables. Estas campañas de recogida de datos se han mantenido durante los periodos de primavera y verano de los años 2001, 2002 y 2003, y se espera que se prolonguen durante los próximos años para llevar a cabo estudios de verificación adicionales.

Un factor fundamental para el desarrollo de este trabajo ha sido la mencionada recopilación de datos de granizo observado. Esto se ha tratado de llevar a cabo de la manera más escrupulosa posible, desechando toda aquella información sobre la cual existiese alguna duda en cuanto a su veracidad o exactitud. A pesar de esto, somos conscientes de que en los datos utilizados existen errores que, por otra parte, son inevitables al trabajar con fenómenos como el granizo, que tienen un comportamiento tan particular en cuanto a su casuística y a su localización espacial y temporal. Estos errores, sin ninguna duda, han repercutido en los valores obtenidos para los índices de verificación calculados, pero deben ser asumidos como un hecho inevitable cuya repercusión final en estos valores no los modificaría más allá de los intervalos de confianza calculados en cada caso. Otra posible fuente de error, y que por lo tanto ha podido influir en los resultados de verificación que se han obtenido, ha sido la selección del un intervalo temporal en torno a las granizadas, que hemos llamado CT50. En cualquier caso, cuando se decidió adoptar el CT50, se contaba con ello, ya que esto se hizo con la idea de tratar de anticipar de alguna manera la presencia del granizo en superficie, tal y como se explicó en su momento.

Hay que señalar que en la base de datos utilizada para los ajustes de umbrales y para los estudios de verificación la mayoría de los casos de granizo disponibles corresponden a tormentas del cuadrante NE de la península Ibérica y de la Meseta Norte. Por este motivo las calibraciones y verificaciones se han hecho mayoritariamente con datos de los radares de Zaragoza, Barcelona y Valladolid, lo cual puede producir ciertos sesgos y unos resultados menos fiables al utilizar los umbrales así establecidos para los demás radares regionales. No cabe duda que la situación ideal sería aquella en la que se

pudiese llevar a cabo un ajuste de umbrales independiente para cada uno de los radares de que disponemos, pero esto tiene una dificultad añadida que es la de disponer de información fiable y en cantidad suficiente dentro de cada cobertura radar como para poder realizar este ajuste de manera adecuada.

Con los datos de granizo de la campaña del año 2001 se pudo desarrollar una versión experimental del módulo ajustando unos umbrales empíricos para detectar cuatro categorías de granizo: severo probable y muy probable, y pequeño probable y muy probable. El ajuste de estos umbrales se llevó a cabo por medio de una combinación de la DVIL y del HDA para la detección del granizo severo, y por medio de la DVIL y del criterio de Waldvogel para el granizo pequeño.

Finalizada la campaña de primavera-verano del 2002 se procedió a un nuevo ajuste del módulo, para establecer así la versión operativa del mismo. La decisión de esta revisión del módulo de granizo se toma a partir de los resultados de la verificación objetiva del módulo experimental con los datos del 2002, y en base a la evaluación subjetiva por parte de los predictores operativos. En la versión operativa del módulo de granizo se han establecido tan solo dos categorías, una para granizo severo probable, y otra para granizo de cualquier tamaño probable, que han estado operativas desde la primavera-verano del 2003. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante el proceso de ajuste de estos nuevos umbrales, se puede afirmar que el comportamiento del módulo desarrollado es bastante fiable, obteniéndose unos buenos valores de los índices de verificación, así como unos resultados muy positivos en los test de independencia y de significación. Resulta por tanto adecuado el uso combinado de unos umbrales basados en la DVIL y en el HDA para la detección de granizo severo, y basados en la DVIL y en el criterio de Waldvogel para la detección de granizo de cualquier tamaño.

Queda pendiente el llevar a cabo una verificación con los datos de granizo obtenidos durante la campaña del 2003, así como posiblemente otra adicional con los datos que se puedan recoger durante el año 2004, que además estará enmarcada en el proyecto MONEGRO, en el que participa el INM junto con la Universidad de León y la Universidad de Barcelona. Este hecho, además, supone que se va a disponer de información adicional de granizadas a partir de la red de granizómetros de Valjalón, ubicada en las comarcas del Valle del Jalón (SW de la provincia de Zaragoza). A partir de los resultados obtenidos, se podría optar por una revisión de los umbrales actualmente operativos, o por modificar el enfoque del problema para tratar de usar otro tipo de metodologías, como pueden ser las redes neuronales (Marzban & Witt, 2001), que permitirían utilizar muchas más variables radar y de campos de modelos numéricos, y que por otro lado se han usado de manera experimental en otros entornos con cierto éxito para el problema del granizo.

VII.- Anexos

VII.1.- Tablas de contingencia e índices de verificación

VII.2.- Revisión de algunos test estadísticos

VII.2.1.- Test de independencia del ORSS

VII.2.2.- Test χ^2 de independencia

VII.2.3.- Intervalos de confianza para proporciones

VII.2.4.- Error estándar para el HK

VII.2.5.- Test de significación del OR

VII.1.- TABLAS DE CONTINGENCIA E ÍNDICES DE VERIFICACIÓN

El procedimiento más usual para verificar predicciones de tipo dicotómico consiste en la elaboración de tablas de contingencia, como se puede ver en Ghelli & Lalaurette (2000) o en Cherubini et al. (2001). Una predicción dicotómica es aquella que únicamente dice si determinado fenómeno va a suceder, o si no va a suceder. En nuestro caso las vamos a utilizar no para evaluar un procedimiento de predicción sino para verificar un método de detección de determinado fenómeno (granizo). En cualquier caso la aplicación de estas tablas, el significado de las mismas, y el de los índices que se pueden calcular es el mismo en ambos casos. En Wilks (1995) se puede ver un desarrollo más amplio de la utilización de las tablas de contingencia.

En la tabla 7.1 se puede ver una de estas tablas en la que se muestran claramente las frecuencias de predicciones “sí-no” y observaciones “sí-no”, que constituyen las distribuciones marginales, así como las cuatro combinaciones de las mismas que constituyen la distribución condicional, y que vamos a denominar:

- ✓ Éxito: se predice un evento, y éste ocurre.
- ✓ Fallo: se predice que no ocurra un evento, pero éste ocurre.
- ✓ Falsa alarma: se predice un evento, pero éste no ocurre.
- ✓ Negación correcta: se predice que no ocurra un evento, y éste no ocurre.

		PREDICCIONES		TOTAL
		SI	NO	
OBSERVADO	SI	a (éxito)	c (fallo)	a+c (observado sí)
	NO	b (falsa alarma)	d (neg. correcta)	b+d (observado no)
TOTAL		a+b (previsto sí)	c+d (previsto no)	a+b+c+d=n (Total)

Tabla 7.1 Esquema de una tabla de contingencia 2x2 para predicciones de tipo dicotómico.

Las tablas de contingencia pueden ser útiles, por un lado, para ajustar determinados umbrales que den unos resultados más favorables en un procedimiento de predicción a partir de una muestra de datos, así como posteriormente verificar dichos umbrales con una muestra independiente. El resultado ideal en estos casos sería conseguir unos umbrales con los que se obtuviese una tabla de contingencia con valores sólo en las casillas de “éxito” y “negación correcta”, y ceros respectivamente en “fallo” y “falsa alarma”. También pueden ser útiles para ver qué tipo de errores se cometen con los distintos métodos de predicción que se estén verificando.

A partir de los distintos valores que aparecen en la tabla de contingencia se pueden calcular una gran variedad de índices y parámetros estadísticos que permiten describir y valorar diferentes aspectos de la distribución obtenida, como queda reflejado en Ebert et al. (2004), o en Wilks (1995) entre otros. Describimos a continuación los que vamos a utilizar, resaltando aquellos aspectos de cada uno de ellos que van a resultar más útiles de cara a este trabajo:

- **Bias:** mide la relación entre la frecuencia de eventos previstos y la frecuencia de eventos observados. Teniendo en cuenta la nomenclatura de la tabla 7.1, se calcula por la fórmula:

$$BIAS = \frac{a + b}{a + c}$$

Su valor puede ir de 0 a infinito. Su valor óptimo es 1. En la práctica este índice no suele ser la unidad debido a la existencia de errores sistemáticos en los métodos de predicción o en los sistemas de observación. Así, este índice mide si el sistema usado tiende a infrapredicir ($BIAS < 1$) o a sobrepredicir ($BIAS > 1$) el fenómeno. En contra de este índice hay que señalar que no mide en absoluto si las predicciones se corresponden con las observaciones, únicamente compara las frecuencias marginales de fenómenos previstos y observados.

- **Proporción Correcta (PC):** mide la proporción de todas las predicciones que fueron correctas. Se calcula por la fórmula:

$$PC = \frac{a + d}{n}$$

Su valor puede ir de 0 a 1. Su valor óptimo es 1. Es muy simple e intuitivo, pero su valor está fuertemente influido por la existencia o no de BIAS, de manera que el ajuste del mismo hacia la categoría más observada tiende a aumentar su valor. Este índice, por lo tanto, no es suficientemente equitativo dado que su valor se puede mejorar fácilmente, simplemente prediciendo con más frecuencia las categorías más observadas.

- **Probabilidad de detección (POD):** en la bibliografía anglosajona se le denomina *Probability of Detection*. Este índice mide la proporción de eventos observados que han sido previsto correctamente. Se calcula por la fórmula:

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

Su valor puede ir de 0 a 1. Su valor óptimo es 1. Tiene a favor que se trata de un índice muy sensible a los aciertos, y resulta así adecuado para valorar las predicciones de fenómenos raros. Por el contrario, no tiene en cuenta las falsas alarmas y su valor se puede ver modificado incluyendo más datos en la columna “Predicción sí”.

- **Tasa de falsas alarmas (FAR):** aparece en la bibliografía como *False Alarm Rate*, y mide el número relativo de veces que el evento no ha ocurrido cuando se predijo que sí ocurriría. Se calcula por la fórmula:

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

Su valor puede ir de 0 a 1. Su valor óptimo es 0. Tiene a favor que se trata de un índice muy sensible a las falsas alarmas. Por el contrario, ignora totalmente los aciertos, de manera que su valor se puede mejorar artificialmente incluyendo más datos en la fila “Observado sí”.

- **Índice crítico de aciertos (CSI):** también se le denomina *Critical Success Index*, *Threat Score* o *Gilbert Skill Score*, mide la proporción de eventos observados y/o previstos cuya predicción ha sido acertada. Se calcula por la fórmula:

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}$$

Su valor puede ir de 0 a 1. Su valor óptimo es 1. Se trata de un índice sensible a los aciertos, que además penaliza tanto los errores como las falsas alarmas. No tiene en cuenta el valor “negación correcta”, lo cual puede ser una ventaja para gran número

de situaciones, especialmente en el caso de fenómenos raros, en las que resulta difícil o imposible conocer este valor con exactitud. Por otro lado este índice evita el problema señalado para el PC cuando se modifican las distribuciones para ajustar el valor del BIAS. Como aspectos negativos, no hace distinción del tipo de error que se comete en la predicción, y su valor depende de la climatología del fenómeno que se analiza, de manera que puede ser conveniente usarlo en combinación con la frecuencia de ocurrencia del mismo.

- **Discriminante de Hanssen y Kuipers (HK):** también denominado *Peirce Skill Score*, *Kuiper's Performance Index* o *True Skill Statistic*, mide la capacidad de las predicciones para separar casos afirmativos de casos negativos. Se calcula por la fórmula:

$$HK = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)}$$

Su valor puede ir de -1 a 1. Su valor óptimo es 1. Cuando es mayor que cero indica cierta destreza en el método de predicción. Como aspectos positivos de este índice hay que señalar que utiliza todos los elementos que aparecen en la tabla de contingencia, y que no se ve afectado por la climatología del fenómeno analizado. Tal y como señalan Gandin & Murphy (1992) y Stephenson (2000) el valor de este índice no se puede mejorar cuando se tiende a predecir determinados eventos para mejorar el BIAS, e incluso demuestran que es el único índice equitativo para valorar predicciones dicotómicas. Como aspecto negativo, únicamente cabe señalar que en el caso de eventos raros, este índice se puede ver excesivamente influido por los aciertos (a, d), ya que cuando el recuento en una celda de la tabla es muy grande (p. ej., d), el valor de la otra celda de su misma fila resulta prácticamente despreciable (p. ej., b).

- **Índice de pericia de Heidke (HSS):** en la bibliografía anglosajona se le denomina *Heidke Skill Score*. Mide la proporción de predicciones correctas si se eliminan los aciertos que se obtendrían simplemente por una decisión aleatoria. Se calcula por la fórmula:

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)}$$

Su valor puede ir de -1 a 1. Su valor óptimo es 1. Se trata de un índice que mide la mejora que se obtiene sobre una predicción basada en una decisión aleatoria. Este índice equivale a comparar la PC con la que se obtendría a partir de unas predicciones aleatorias que diesen una distribución de frecuencias previstas y observadas independientes, de esta manera el HSS resulta un índice más equitativo que el PC. Como aspecto negativo hay que decir que de manera general esta decisión aleatoria posiblemente no sea la mejor predicción de referencia para hacer una comparación.

- **Proporción de sucesos raros (OR):** Aparece como *Odds Ratio* en la literatura de habla inglesa. Este índice mide la proporción de predicciones acertadas con relación a las predicciones no acertadas. Se calcula por la fórmula:

$$OR = \frac{ad}{bc}$$

Su valor puede ir de 0 a infinito. Su valor óptimo es infinito. El OR depende tan sólo de las probabilidades condicionales que aparecen en la tabla de contingencia, y no de las frecuencias marginales, por lo cual este índice es independiente de los valores del BIAS entre observaciones y predicciones. Por este motivo da mejores resultados para fenómenos raros, y tiene la ventaja de que es muy poco sensible a posibles

ajustes o modificaciones que tiendan a corregir el BIAS. Puede ser usado también para estudiar la asociación o independencia de la distribución de frecuencias en la tabla de contingencia, ya que su valor se hace 1 cuando las predicciones y observaciones son independientes, aunque para esto último se suele usar el logaritmo natural del OR, que se aproxima a una distribución gaussiana para valores de a, b, c y d suficientemente grandes.

- **Índice de pericia de la proporción de sucesos raros (ORSS):** se le conoce también como *Odds Ratio Skill Store*, o como *Yule's Q*, y se trata en realidad de un estadístico usado como medida de independencia entre los datos de las tablas de contingencia. Se calcula por la fórmula:

$$ORSS = \frac{OR - 1}{OR + 1}$$

Su valor puede ir de -1 a 1. Su valor óptimo es 1. Este índice también es independiente de las distribuciones marginales, y, como señala Stephenson (2000), es menos sensible que el HK a ajustes para corregir el BIAS, lo que supone una ventaja dado que resulta casi invariante a pequeños cambios del BIAS que pueden aparecer debido a modificaciones en el proceso de predicción o a sesgos en las bases de datos climatológicas. Todo esto hace que sea un poderoso y robusto discriminante entre asociación e independencia de los casos estudiados en tablas de contingencia. Es importante tener en cuenta que valores altos de este índice no significan necesariamente altos valores de verificación de las predicciones, para lo cual resulta necesario llevar a cabo algún test de significación de los valores que se obtienen.

A continuación se puede ver una tabla resumen (tabla 7.2) con los valores mínimos, máximo y óptimo de cada uno de los índices de verificación que hemos enumerado a lo largo de este anexo:

ÍNDICE DE VERIFICACIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO	ÓPTIMO
BIAS	0	∞	1
PC	0	1	1
POD	0	1	1
FAR	0	1	0
CSI	0	1	1
HK	-1	1	1
HSS	-1	1	1
OR	0	∞	∞
ORSS	-1	1	1

Tabla 7.2 Resumen de los diferentes índices de verificación utilizados.

VII.2.- REVISIÓN DE ALGUNOS TEST ESTADÍSTICOS

Con las tablas de contingencia y con algunos de los índices calculados en los capítulos IV.2.4, IV.3.3 y IV.4.3 se han efectuado una serie de test estadísticos de independencia, de cálculo de intervalos de confianza y de significación que nos permiten, según Stephenson (2000), valorar la calidad de los datos utilizados, los márgenes de error de los índices obtenidos, y el grado de significación que tienen los resultados obtenidos con relación a la base de datos utilizada. En los puntos siguientes pasamos a describir someramente los test utilizados.

VII.2.1.- Test de independencia del ORSS

Una primera valoración de la independencia/asociación de los datos obtenidos en determinada tabla de contingencia viene dada por el valor del ORSS. El valor de este parámetro se hace 0 cuando los datos observados y los datos previstos son totalmente independientes, y se hace tanto más próximo a 1 cuanto mayor es la asociación entre ellos.

VII.2.2.- Test χ^2 de independencia

Para llevar a cabo los ajustes de umbrales y las verificaciones en este trabajo hemos utilizado tablas de contingencia 2x2. Tal y como señalan Rees (1987) y Stephenson (2000), se puede evaluar el grado de independencia de los datos de una tabla de contingencia por medio del siguiente estadístico, que llamaremos J, y que bajo la hipótesis de independencia sigue una distribución χ^2 de Pearson con (filas-1)*(columnas-1) grados de libertad, en nuestro caso al ser tablas 2x2, la distribución tendrá un grado de libertad.

$$J = \sum_{i,j=1}^2 \frac{(n_{ij} - f_{ij} - 0,5)^2}{f_{ij}}$$

donde n_{ij} son las frecuencias observadas en la tabla (es decir las cantidades a, b, c, d, en referencia a la tabla 7.1), f_{ij} son las frecuencias esperables bajo la hipótesis de independencia, que se calculan por medio de:

$$f_{ij} = \frac{n_i n_j}{n}$$

donde cada n_i , n_j son los totales en cada fila o columna de la tabla, y n es el total de datos de la tabla ($n = a+b+c+d$). Para un nivel de significación dado, α , la hipótesis de independencia será aceptada si el valor de J es menor que el valor de $\chi^2(\alpha; 1)$.

VII.2.3.- Intervalos de confianza para proporciones

Según Agresti & Coull (1998), los intervalos de confianza para proporciones como la POD y la FAR se puede calcular por medio de:

$$\frac{P + \frac{z_{\alpha/2}^2}{2n} \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{P(1-P) + \frac{z_{\alpha/2}^2}{4n}}{n}}}{1 + \frac{z_{\alpha/2}^2}{n}}$$

donde P es el valor estimado para la POD o la FAR, n es el número total de casos usados en la estimación y $z_{\alpha/2}$ es el cuantil de la distribución normal para determinado nivel de significación (α).

VII.2.4.- Error estándar para el HK

El error estándar en el cálculo del HK (Stephenson, 2000) viene dado simplemente por:

$$\sqrt{\frac{ac}{(n_H)^3} + \frac{bd}{(n_F)^3}}$$

donde n_H es el número total de casos “obsevados sí”, es decir la suma de los valores a+c, según se tienen en la tabla 7.1, y n_F es el número total de casos “observados no”, es decir la suma de los valores b+d.

VII.2.5.- Test de significación del OR

El test de significación del OR se efectúa de manera sencilla a partir del valor de su logaritmo natural, que como hemos indicado en el punto VII.1 tiende a seguir una distribución gausiana, en la que además, según Agresti (1996) el error estándar viene dado por:

$$error = \frac{1}{\sqrt{N_L}}$$

donde N_L es lo que se denomina número efectivo de grados de libertad que se obtiene a partir de la relación:

$$\frac{1}{N_L} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c} + \frac{1}{d}$$

Se cumplirá que el Ln(OR) es cero en el caso de una total independencia de los datos de la tabla de contingencia. Este test se lleva a cabo sobre una hipótesis nula H_0 de independencia de los datos considerando un valor $z_{\alpha/2}$, que es el cuantil de la distribución normal para un nivel de significación α . La hipótesis nula H_0 será aceptada en el caso de que el valor obtenido para Ln(OR) sea inferior al producto del cuantil $z_{\alpha/2}$ por el error estándar calculado.

Agradecimientos

Como se ha comentado, un problema fundamental a la hora de enfrentarse a este fenómeno ha sido la enorme dificultad e incertidumbre para disponer de datos de retorno precisos y fiables, por lo que ha resultado muy complicado llevar a cabo estos estudios, los análisis, el desarrollo del módulo y las verificaciones correspondientes. Hay que mencionar en este sentido la inestimable ayuda con la que he podido contar para conseguir, corregir, confirmar o completar datos de granizadas, o bien para recuperar volúmenes cartesianos de algunos de los centros radar regionales. Resulta, por lo tanto, obligado mostrar mi agradecimiento a Ramón Pascual y Santiago Valios (del CMT de Cataluña), a Evelio Álvarez, Joaquín García, Javier Alastrue y Antonio Conesa (del CMT de Aragón, La Rioja y Navarra), a Jesús Riesco y Miguel Pascual (del CMT de Valencia), a Nieves Garrido (del CMT de Castilla y León), a Pilar Sanz (del CMT de Cantabria y Asturias), a Marcelino Núñez (del CMT de Extremadura), a Ignacio Palacio (del CMT de Madrid y Castilla La Mancha). Durante el último año también he podido contar con información proporcionada por el equipo de José Luis Sánchez (Laboratorio de Física de la Atmósfera, Universidad de León). No quiero dejar de mencionar aquí de manera expresa la valiosa ayuda que ha supuesto poder contar con la cuidada y completa información disponible en los Resúmenes de Incidencias que elabora la ADV (*Agrupació de Defensa Vegetal de les Terres de Ponent*) sobre los episodios tormentosos que afectan a las comarcas del SW de la provincia de Lérida. También quiero agradecer a Anna Ghelli (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) sus consejos y recomendaciones para abordar el problema de las verificaciones.

Bibliografía

ADV, 2001: 1976-2001: 25 anys de lluita contra la pedra a les comarques de Lleida. Agrupació de Defensa Vegetal de les Terres de Ponent. Lleida.

Agresti, A., 1996: An Introduction to Categorical Data Analysis. John Wiley and Sons.

Agresti, A. and B. A. Coull, 1998: Approximation is better than “exact” for interval estimation of binomial proportions. Amer. Stat., 52, 1-7.

Amburn, S. A. and P. L. Wolf, 1997: VIL Density as a Hail Indicator. Wea. and Forecasting, 12, 473-478.

Browning, K. A., 1977: The structure and mechanism of hailstorms. In: G. B. Foote and C. A. Knight, (eds.): Hail: A review of hail science and hail suppression. Meteorological Monographs, Vol. 16 , No 38, (A.M.S.).

Cherubini, T., A. Ghelli and F. Lalaurette, 2001: Verification of precipitation forecasts over the Alpine region using a high density observing network. ECMWF Tech. Mem. 340.

Conejo, S. y F. Elizaga, 2004: Identificación automática de mesociclones y estructuras significativas de viento a partir de datos de radar Doppler. Nota Técnica del STAP N° 43. Madrid, INM.

Ebert, B. and Verification Group, 2004: Forecast Verification – Issues, Methods and FAQ. Weather Forecasting Group (Boureau of Meteorology Research Centre): http://www.bom.gov.au/bmrc/wefor/staff/eee/verif/verif_web_page.shtml.

Federer, B. and coauthors, 1986: Main Results of Grossversuch IV. J. Climate Appl. Meteor., 25, 917-957.

Gandin, L. S. and A. H. Murphy, 1992: Equitable skill scores for categorical forecasts. Mon. Wea. Rev., 120, 2709-2712.

Ghelli, A. and F. Lalaurette, 2000: Verifying precipitation forecasts using upscaled observations. ECMWF Newsletter, 87, 9-17.

Greene, D. R. and R. A. Clark, 1972: Vertically Integrated Liquid Water-A New Analysis Tool. Mon. Wea. Rev., 100, 548-552.

Johns, R. H. and C. A. Doswell, 1992: Severe Local Storms Forecasting. Wea. and Forecasting, 7, 588–612.

Kitzmiller, D. H., W. E. McGovern and R. E. Saffle, 1995: The WSR-88D Severe Weather Potencial Algorithm. Wea. and Forecasting, 10, 141–159.

Knight, C. A. and C. K. Knight, 2001: Hailstorms. In: C. A. Doswell III, (ed.): Severe Convective Storms. Meteorological Monographs, Vol. 28 , No 50, (A.M.S.).

Knight, C. A. and C. K. Knight, 2003: Hail and Hailstorms. In: J. R. Holton, J. A. Curry and J. A. Pyle, (eds.): Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Academic Press.

Lenning, E., H. E. Fuelberg, and A. I. Watson, 1998: An evaluation of WSR-88D Severe Hail Algorithms along the Northeastern Gulf Coast. *Wea. and Forecasting*, 13, 1029–1044.

Lewis III, J.A, 1997: Forecasting Large Hail using the WSR-88D. NWSFO Little Rock, AR.

Martín, F., F. Elizaga, O. Carretero e I. San Ambrosio, 2001: Diagnóstico y Predicción de la Convección Profunda. Nota Técnica del STAP N° 35. Madrid, INM.

Martín, F. y O. Carretero, 2001: Análisis de estructuras y células convectivas mediante datos de radar regional: aplicación YRADAR ver. 2.0. Mayo 2001, STAP-INM.

Martín, F., I. San Ambrosio, y O. Carretero, 2002: Supercélula severa en el área mediterránea. Nota Técnica del STAP N° 37. Madrid, INM.

Marzban, C. and A. Witt, 2001: A Bayesian Neural Network for Severe-Hail Size Prediction. *Wea. and Forecasting*, 16, 600–610.

Pascual, R., 2002: Granizo en el Llano de Lleida. Modelos Conceptuales Regionales. Biblioteca de Módulos TEMPO: <http://cmtbar.inm.es/gpv/granizo/index.htm>.

Quirantes, J. A., 2004: Reportaje sobre los efectos del tornado asociado a la supercélula de Alcañiz (Teruel) del 23 de julio de 2003. Revista del Aficionado a la Meteorología n° 17-enero del 2004. <http://www.meteored.com/ram/numero17/tornadoalcaniz.asp>.

Rees, D. G., 1987: Foundations on Statistics. Chapman and Hall Ltd.

San Ambrosio, I., (2001): Primera valoración de algoritmos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de granizo. V Simposio de Predicción del INM. 20-23 de Noviembre 2001. INM.

San Ambrosio, I., F. Martín y F. Elizaga, 2002: A radar-based operational tool for identification of hailstorms: preliminary results. Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms. Mallorca (Spain).

Sánchez, J. L., Fraile, R., de la Madrid, J. L., de la Fuente, M. T., Rodríguez, P. and Castro, A., 1996: Crop Damage: The hail size factor. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1535–1541.

Stephenson, D. B., 2000: Use of the “Odds Ratio” for Diagnosing Forecast Skill. *Wea. and Forecasting*, 15, 221-232.

Waldvogel, A., B. Federer and W. Schmid, 1978: The kinetic energy of hailfalls. Part I: Hailstone spectra. *J. Appl. Meteor.*, 17, 515-520.

Waldvogel, A., B. Federer and W. Schmid, 1978: The kinetic energy of hailfalls. Part II: Radar and hailpads. *J. Appl. Meteor.*, 17, 1680-1693.

Waldvogel, A., B. Federer and P. Grimm, 1979: Criteria for the Detection of Hail Cells. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1521-1525.

Wilken, G. R., 1994: Estimating the “VIL of the Day”. Southern Region Technical Attachment SR/SSD 94-50.

Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.

Witt, A., M. D. Eilts, G. J. Stumpf, J.T. Johnson, E. D. Mitchell and K. W. Thomas, 1998: An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Wea. and Forecasting*, 13, 286-303.