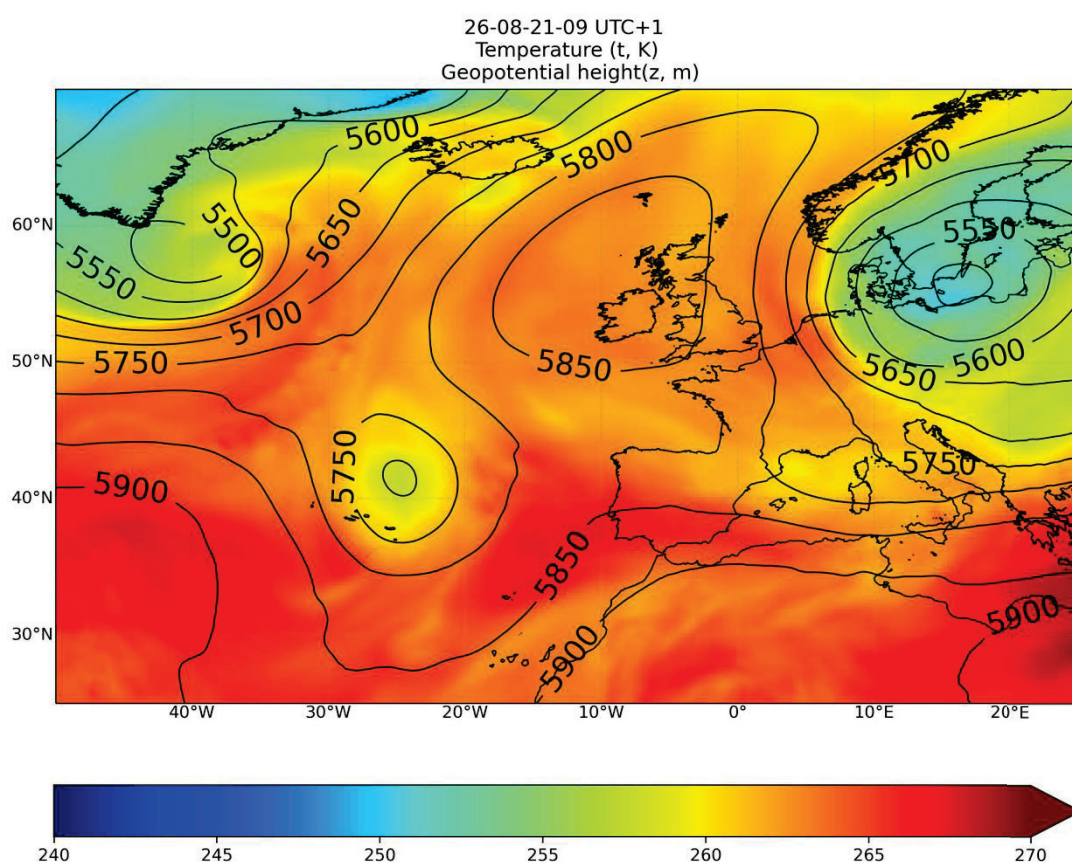


TRABALLO DE FIN DE GRAO



ANÁLISE DINÁMICA DUNHA DANA NA PENÍNSULA IBÉRICA



Fernando Montes Vicente
Grao en Ciencias Ambientais
Ourense, Febreiro 2024
1ª Convocatoria

Titora: Marta Vázquez Domínguez
Departamento de Física Aplicada

Marta Vázquez Domínguez como titora do Traballo de Fin de Grao
presentado polo alumno Fernando Montes Vicente expón:

que considera o traballo apto para a súa defensa.

En Ourense a 21 de Febreiro de 2024

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	
1.1. Definición do concepto de DANA.....	8
1.2. Diferenciación co termo de “gota fría”.....	11
1.3. Situación atmosférica.....	12
1.4. Fases e evolución	
1.4.1. Desenvolvemento dunha vaguada en niveis altos....	15
1.4.2. Ruptura (“ <i>tear-off</i> ”).....	17
1.4.3. Illamento (“ <i>cut-off</i> ”).....	17
1.4.4. Fase final.....	18
2. CASO DE ESTUDO E OBXECTIVOS.	
2.1. Área de estudo.....	20
2.2. Meteoroloxía asociada.....	23
2.3. Danos persoais e materiais.....	24
2.4. Obxectivos.....	24
3. METODOLOXÍA.	
3.1. Datos de reanálise.....	25
3.2. Parámetros de identificación e análise	
3.2.1. Altura xeopotencial.....	26
3.2.2. Espesor equivalente.....	27
3.2.3. Vorticidade potencial.....	27
3.2.4. Precipitación total.....	28
3.2.5. Outros.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSIÓN.	
4.1. Localización, traxectoria e evolución.....	31
4.2. Características sinópticas.....	35
5. CONCLUSIÓNS.....	43
6. REFERENCIAS.....	44
Anexos.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Simplificación da formación dunha DANA onde as frechas indican a dirección do chorro, sendo o azul aire frío polar e o branco aire máis cálido. Fonte: AEMET.....8
- Figura 2.** Imaxe representativa de como un nivel de presión (500 hPa) cruza diferentes alturas e de como se amosa nun mapa de altura xeopotencial para o nivel de presión indicado. Fonte: Materia Meteoroloxía.....9
- Figura 3.** Representación vertical do afundimento e pregamento da tropopausa (liña negra continua). Os movementos descendentes ao oeste e ascendentes ao leste do núcleo (cos máximos de ventos sinalados) forman a vaguada. No núcleo prodúcese esa anomalía de PV acompañada doutras cálida e fría na dorsal e debaixo, respectivamente. Fonte: Pinheiro et al., 2021.....10
- Figura 4.** Diagrama da situación sinóptica típica dunha DANA, indicando as etapas do seu ciclo de vida en termos da súa estrutura meteorolóxica. O campo reflexado é o de xeopotencial en 200 hPa. Fonte: Nieto et al., 2008.....15
- Figura 5.** Ondulación da circulación en chorro en niveis altos, onde as R sinalan as dúas dorsais que rodean a vaguada. Fonte: Nieto et al., 2008.....15
- Figura 6.** Ondas de temperatura (liñas descontinuas) e de xeopotencial (liñas continuas) xunto co eixe vertical marcado coa liña negra, ademais das adveccións fría e cálida citadas. Fonte: adaptación da Institución Central de Meteoroloxía e Xeodinámica de Austria (ZAMG, polas súas siglas en alemán).....16
- Figura 7.** Incremento da compoñente meridional do vento no seu lado descendente que dá ao sistema forma de omega invertida. Fonte: Nieto et al., 2008.....17
- Figura 8.** Illamento completo da baixa con respecto á circulación xeral, coa posibilidade dunha rexión de altas presións na dorsal ao norte desta. Fonte: Nieto et al., 2008.....18

Figura 9. Reabsorción da DANA por parte da circulación xeral. Fonte: Nieto et al., 2008.....	18
Figura 10. Topografía en mb (hPa) onde se sinala a área de precipitacións no borde dianteiro da DANA (zona sombreada), a cal será na que sucedan os ciclóns en superficie. Fonte: Palmén, 1949.....	19
Figura 11. Número total de DANAs identificadas para o período de 1958 a 1998 (gráfica superior), cunha representación suavizada dos datos para unha mellor representación das principais áreas de ocorrencia (gráfica inferior), sinaladas arriba nun recadro negro. Fonte: Nieto et al., 2008.....	20
Figura 12. Distribución temporal de DANAs no sector europeo onde se amosa o número total de sistemas identificados en cada estación do ano, representada polas iniciais en castelán dos seus principais meses. Os datos son dun período de 40 anos, entre 1958 e 1998. Fonte: Muñiz, 2005.....	21
Figura 13. Distribución de DANAs identificadas pola antiga reanálise ERA-40 (1958-2002). A lenda mostra a porcentaxe por mil na que o punto formou parte dunha DANA. Fonte: Nieto et al., 2008.....	21
Figura 14. Mapa da rexión onde se analizará a evolución da DANA desde a súa separación da corrente en chorro en zonas polares ata a súa desaparición no sector europeo.....	22
Figura 15. Mapa da rexión onde se analizarán as precipitacións da DANA sobre a Península Ibérica na súa etapa final.....	22
Figura 16. Esquema ideal dunha DANA para os campos de xeopotencial (liñas azuis) e temperatura (liñas vermellas descontinuas) ambas no nivel de 500 hPa para a primeira fase, a de illamento e a etapa final (de arriba a abaixo, respectivamente). Fonte: Muñiz, 2005.....	29
Figura 17. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, do 24/08/2021 ás 21 horas.....	31
Figura 18. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, dos días 25/08/2021 e 26/08/2021 ás 12 e 9 horas, respectivamente.....	32
Figura 19. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, dos días 28/08/2021 e 31/08/2021 ás 0 e 15 horas, respectivamente.....	33

- Figura 20.** Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, dos días 1/09/2021 e 2/09/2021 ás 12 e 6 horas, respectivamente.....34
- Figura 21.** Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 500 hPa do 2/09/2021 ás 21 horas e do 3/09/2021 ás 0, 3 e 18 horas. A orde cronolóxica neste caso é seguindo as filas.....35
- Figura 22.** Mapas de espesor equivalente (liñas) e altura xeopotencial (cores, en metros), de 200-300 hPa (esquerda) e 500-850 hPa (dereita) durante os días 24 e 28 de agosto, e 1 e 2 de setembro, antes asociados ás etapas do ciclo de vida da DANA36
- Figura 23.** Mapas de altura xeopotencial e PV en 200 (coluna da esquerda) e 300 hPa (columna da dereita) durante os días 24, 26 e 28 de agosto, e o 2 de setembro. Días xa identificados con etapas do ciclo de vida da DANA.....37
- Figura 24.** Evolución dos campos de altura xeopotencial (liñas negras continuas) e temperatura (cores) no nivel de 500 hPa ao longo do ciclo de vida da DANA, durante os días 24 e 25 de agosto (primeira fila), 26 e 28 agosto (segunda fila) e 31 de agosto, e 2 de setembro (tercera fila), días antes asociados ás etapas do ciclo de vida da DANA. A unidade da temperatura é o Kelvin.....38
- Figura 25.** Mapa de ventos (ms-1) e altura xeopotencial no nivel de 300 hPa, durante os días 24 e 25 de agosto (primeira fila), 26 e 28 agosto (segunda fila) e 31 de agosto, e 2 de setembro (tercera fila). O vento vén determinado polo módulo en cor e a dirección sinalada cunha frecha negra, cuxo tamaño tamén vai asociado ao módulo. A altura xeopotencial amosa sinalada por liñas negras continuas.....39
- Figura 26.** Evolución dos mapas de altura xeopotencial en 500 hPa (liñas negras continuas) e MSLP (gradiente de cor) durante as horas descritas. As unidades dos valores da presión son Pa.....40
- Figura 27.** Campo de precipitacións totais durante os episodios de chuvias de maior intensidade do paso da DANA pola Península Ibérica, medido en mm. Altura xeopotencial en 300 hPa representada en liñas.....41

LISTA DE ACRÓNIMOS

AEMET	Axencia Estatal de Meteoroloxía
C3S	Servizo de Cambio Climático Copernicus
CDS	Climate Data Source
DANA	Depresión illada en niveis altos
ECMWF	Centro Europeo de Predición a Medio Prazo
IFS	Sistema Integrado de Predición
INM	Instituto Nacional de Meteoroloxía
METEOCAM	Plan Específico ante o Risco por Fenómenos Meteorolóxicos Adversos
MSLP	Presión media ao nivel do mar
PV	Vorticidade potencial
PVU	Unidade de vorticidade potencial
STE	Intercambio estratosfera-troposfera
TFP	Parámetro frontal térmico
WRF	Weather Research and Forecasting
ZAEPG	Zonas afectadas gravemente por emerxencias de protección civil
ZAMG	Central de Meteoroloxía e Xeodinámica de Austria

1. Introducción.

1.1. Definición do concepto de DANA.

De entre os fenómenos sinópticos que afectan á Península Ibérica, as depresións illadas en niveis altos (DANA, polas súas siglas en castelán) son un dos máis salientables. Segundo a definición que fai dela a AEMET (Martín León, 2003) unha DANA é “unha depresión pechada en altura que se illou e separou completamente da circulación asociada ao chorro e que se move independentemente de tal fluxo chegando, ás veces, a ser estacionaria ou, incluso, retrógrada”. Estas estruturas meteorolóxicas considéranse vórtices illados na media e alta troposfera desenvolto a partir de vaguadas profundas na circulación xeral do oeste (Palmén, 1949; Palmén e Newton, 1969; Winkler et al., 2001), polo que se moverá xeralmente do oeste a leste. Será polo tanto retrógrada cando o faga de xeito contrario. O feito de ser unha baixa illada desa circulación é o que caracteriza estas estruturas como DANAs.

Un fenómeno atmosférico que é chave na formación de DANAs é a corrente en chorro e, no caso da rexión peninsular, a relacionada co chorro polar. As correntes en chorro ou “jet streams” son intensas correntes canalizadas que circunvalan a Terra. O chorro polar sitúase a uns 9000 metros de altura e leva asociados máximos de ventos tan intensos que superan amplamente os 180 km/h (Martín León, 2003).

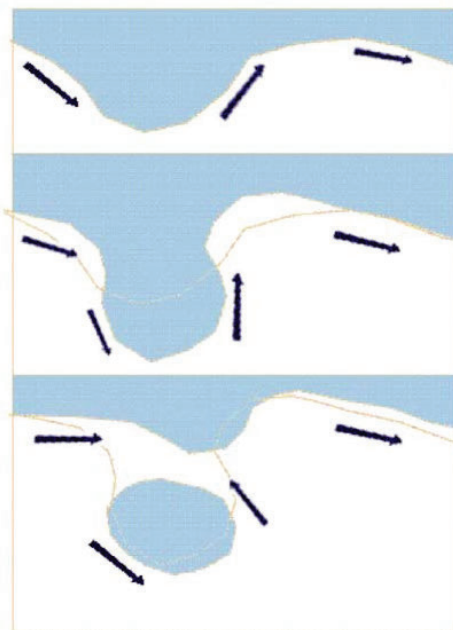


Figura 1. Simplificación da formación dunha DANA onde as frechas indican a dirección do chorro, sendo o azul aire frío polar e o branco aire máis cálido.

Fonte: AEMET.

No hemisferio norte e no lado esquerdo do chorro polar, ou o lado que “mira” ao polo norte, o aire é relativamente frío, mentres que no seu lado máis meridional o aire é máis cálido que o do lado polar. Cando o chorro, orixinalmente rectilíneo, se intensifica, ondúlase e toma unha compoñente norte-sur moi marcada. Nestes casos pódese xerar un proceso de illamento e estrangulamento de parte desta circulación intensa (Martín León, 2003). Isto ocorre cando a combinación da depresión fría na media e alta troposfera coa masa de aire frío nas latitudes altas se illa completamente por mor da masa de aire cálido de latitudes menores como resultado dos movementos meridionais -en dirección ao ecuador- da canle de niveis altos polar, segundo Palmén e Newton (1969), quen proporcionou unha primeira caracterización dinámica das DANAs. Unha definición simplificada disto é a idea de aire polar flotando sobre latitudes inferiores ás que normalmente pertence este aire frío, como se representa na *Figura 1*.

Tendo en conta esta definición, en canto á súa identificación en superficies isobáricas (aquelas que representan unha presión constante), recoñécense como contornos de xeopotencial pechados arredor dunha baixa central (Nieto et al., 2008). As liñas de xeopotencial dunha superficie isobárica indicarán a altura á que podemos atopar unha presión determinada, como se observa na *Figura 2*. Polo tanto, a baixa central representa unha vaguada na superficie isobárica, o que indica un núcleo frío.

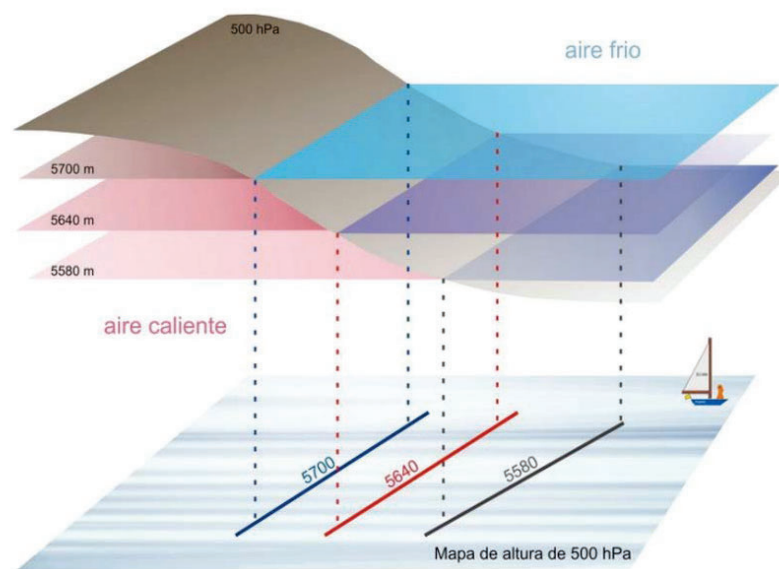


Figura 2. Imaxe representativa de como un nivel de presión (500 hPa) cruza diferentes alturas e de como se amosa nun mapa de altura xeopotencial para o nivel de presión indicado. Fonte: Materia Meteoroloxía.

En canto á súa dinámica, segundo Hoskins et al. (1985) e Price e Vaughan (1993), debido á baixa tropopausa atopada dentro da área de

DANAs, estas amósanse como rexións pechadas de alta vorticidade potencial (PV) en superficies isoentrópicas, (superficies de temperatura potencial constante) as cales abarcan a alta troposfera e a baixa estratosfera. O aire no interior da DANA (Borchi e Marengo, 2002) é máis frío que a rexión que o rodea, debido a que se forma en latitudes máis altas, polo que a formación dunha DANA en latitudes medias pode verse coma un desprazamento dunha rexión de alta PV desde o seu confinamento en zonas polares (Muñiz, 2005).

Segundo o explicado anteriormente, o centro da circulación ciclónica pechada asociado á DANA posúe aire de orixe estratosférico (Baray et al., 2003) de menor temperatura ca o entorno e fórmase no lado de cizallamento barotrópico anticiclónico do núcleo do chorro (Thorncroft et al., 1993), é dicir, cara o ecuador. Unha DANA será calquera perturbación que cumpra a definición anterior, polo tanto, unha borrasca illada é unha DANA sempre e cando se cumpran o resto de condicións. Se por exemplo, se forma ao lado esquerdo tendo en conta a dirección do chorro (oeste-leste), xa non se catalogaría como tal (Martín León, 2003).

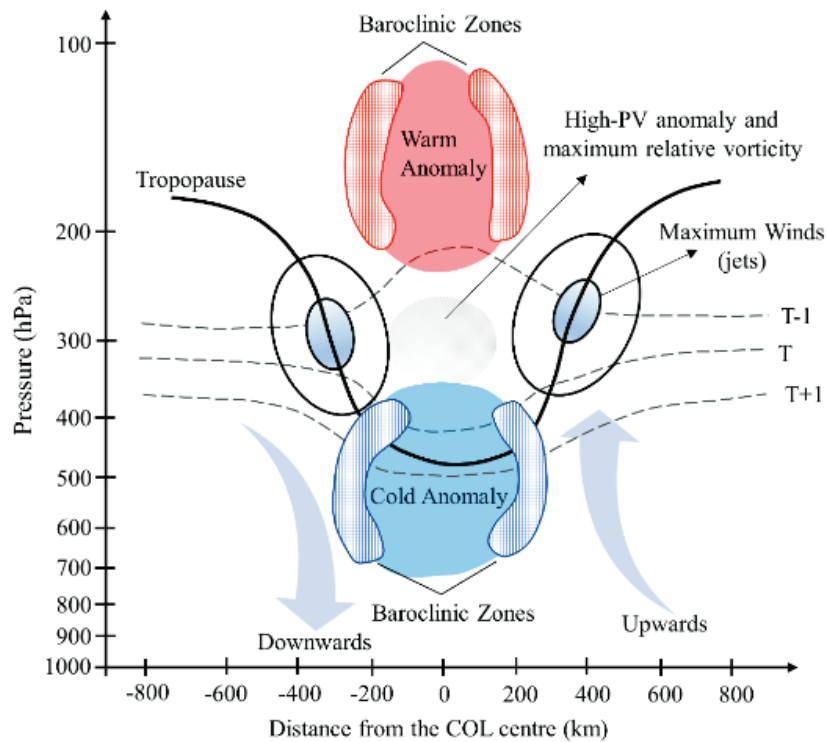


Figura 3. Representación vertical do afundimento e pregamento da tropopausa (liña negra continua). Os movementos descendentes ao oeste e ascendentes ao leste do núcleo (cos máximos de ventos sinalados) forman a vaguada. No núcleo prodúcese esa anomalía de PV acompañada doutras cálida e fría na dorsal e debaixo, respectivamente. Fonte: Pinheiro et al., 2021

O pregamento da tropopausa é un dos principais mecanismos asociados ás DANAs: pode provocar a transferencia de aire estratosférico á troposfera,

causando así que as DANAs xoguen un papel crucial no intercambio estratosfera-troposfera (Bamber et al., 1984; Price and Vaughan, 1993; Ancellet et al., 1994; Vaughan and Price, 1989; Holton et al., 1995), tanto en latitudes medias de ambos hemisferios (Oltmans et al., 1992; Barsby e Diab, 1995; Gimeno et al., 1998) como na rexión subtropical en xeral (Cuevas et al., 2000; Kentarchos et al., 2000; Baray et al. 2003).

Como se comentou antes, as DANAs caracterízanse polo afundimento da tropopausa (Price e Vaughan, 1993) na súa parte central, o que orixina zonas con valores altos de PV no seu interior, onde as liñas isoentrópicas cruzan a tropopausa, como se observa na *Figura 3*. Unha tropopausa anomalamente baixa axuda a que se produza intercambio entre a alta troposfera e a baixa estratosfera (STE). Ademais do afundimento da tropopausa, outro mecanismo a través do cal pode suceder este intercambio é a erosión da tropopausa, xa sexa convectiva, condensacional ou radiativa, ou por mestura turbulenta asociada á corrente en chorro. (Hoskins et al., 1985; Shapiro et al., 1987; Wirth, 1995 e Wirth, 1999).

A tropopausa dentro da DANA é tipicamente 2-3 km máis baixa ca a atmosfera circundante, formando unha rexión de aire estratosférico illado horizontalmente do reservorio estratosférico polar en superficies isoentrópicas (Gouget et al., 2000). A súa intensidade é maior na alta troposfera e decrece cando se descende na vertical e según se vai desenvolvendo. Nas fases finais da DANA, poderíase observar circulación ciclónica na troposfera inferior, aínda que se o desenvolvemento da DANA carece da profundidade precisa é posible atopar inclusive circulación anticiclónica en superficie (Kuo, 1949).

1.2. Diferenciación co termo “gota fría”.

En outubro de 1982 houbo que lamentar 38 falecementos no Levante español polas consecuencias dun forte evento de chuvias torrenciais. Especialistas do Instituto Nacional de Meteoroloxía (INM) cualificaron como “gota fría” o evento, citando outros episodios co mesmo nome no mesmo mes de anos anteriores. Isto desencadeou na sociedade e prensa española unha asociación entre este termo e desastre meteorolóxico (Jansà, 2004).

A orixe da gota fría atópase en 1886 na escola alemá, que introduciu a idea de “*kaltlufttropfen*”, cuxa tradución aproximada é “gota de aire frío” e que se define coma unha marcada depresión en altura sen reflexo na superficie a cal posúe na súa parte central o aire máis frío (Llasat, 1991). Esta definición céntrase nos aspectos dinámicos (depresión en altura) e sobre todo nos seus aspectos térmicos (aire moi frío en altura). É aquí onde radica

a diferenza co termo predominante actualmente, xa que o concepto de DANA inclúe na súa definición tamén a xénese do sistema, é dicir, ao feito de illarse unha baixa da circulación xeral dos oestes. A diferenza fundamental entre gota fría e DANA é que na primeira, prima o feito de ser unha depresión sostida por un núcleo de temperatura moi fría, a DANA leva implícitos aspectos asociados a circulacións intensas e pechadas, que á súa vez conforman un mínimo depresionario dinámico e térmico (Martín León, 2003).

Aínda que xa se apuntaba que se illaba da corrente en chorro, aínda se lle nomeaba como “gota fría”, o que prorrogou o uso erróneo ou incompleto do termo para referirse a este fenómeno, en lugar do que xa en inglés se denominaba “*cut-off low*” ou COL, cuxa tradución sería depresión ou baixa illada, o que se achega ao nome actual. Destacaríase ademais o nivel onde ocorre para diferencialas das que suceden na Península Ibérica en capas máis baixas de orixe térmica. Foi máis avanzada a década dos 80 cando o Servicio de Técnicas de Análise de Predición do INM lle comezou a dar uso e visibilidade (Martín León, 2003).

De todos os xeitos, a pesar das súas diferenzas cabe destacar que moitas gotas frías son, de feito, DANAs. Pero sexan unha ou outra, tamén é preciso sinalar que ningunha das dúas vai ligada a un desastre meteorolóxico por definición, xa que non todas teñen a profundidade suficiente como para deixar pegada en superficie.

1.3. Situación atmosférica.

A necesidade dunha maior investigación arredor das DANAs no sector europeo, máis en concreto na área mediterránea, vén motivada tanto polo elevado índice de ocorrencia esperado, especialmente, nos meses calorosos, coma polo papel crucial das DANAs en conducir a situacións meteorolóxicas relacionadas ás veces con tempo adverso sobre toda a zona (Porcú et al., 2003; Tripoli et al., 2005). Sendo un fenómeno de escala sub-sinóptica a sinóptica, espérase que unha DANA conduza o patrón meteorolóxico sobre unha área ampla (Porcú et al., 2007).

A corrente en chorro corresponde a un límite entre dúas masas de aire moi diferentes. A que queda atrapada no interior da DANA mantén as súas características polares, como por exemplo a súa menor temperatura fronte ao aire que a rodea. Esta condición, xunto coa tropopausa particularmente baixa xa citada, pode conducir a un clima inestable e a precipitacións en latitudes medias, especialmente no verán e sobre os océanos, xa que o aire frío nunha latitude tan baixa provoca convección profunda (Kentarchos e Davies,

1998a), é dicir, elevación espontánea do aire cálido en superficie formando nubes de desenvolvemento vertical e tormentas. Unha DANA pode ser o suficientemente profunda como para ir asociada a unha cicloxénese en superficie (Gan and Rao, 1996; Mikiyfunatsu et al., 2004), sempre e cando non exista superficie fría baixo ela. De ser así inhibiríase a convección, reducindo a probabilidade de fortes eventos chuviosos. A nubosidade será alta e fibrosa diante e máis profunda detrás, mais ambas se irán desprazando ao centro dos eixes da DANA durante a súa evolución (Delgado et al. 2007). En caso de producirse o proceso convectivo, a banda de nubes frontal do borde dianteiro será suficientemente espesa e capaz de provocar precipitacións, mais nalgúns casos tamén existe nubosidade no borde traseiro (Winkler e Zawtz-Meise, 2001). Polo tanto, as precipitacións daranse especialmente ao sueste da DANA (Barry e Chorley, 1976; Palmén e Newton, 1969; Price e Vaughan, 1992). De todas maneiras, as DANAs producen precipitacións importantes só cando a masa de aire baixo elas aporten un suplemento de humidade e aire cálido significativo (Knippertz e Martin, 2005). Esta inestabilidade é frecuente baixo as DANAs de latitudes medias (arredor de 30-40° N) e os eventos convectivos afectarían, ás veces gravemente, a estes lugares. Estudos baseados na rexión mediterránea falan de chuvias convectivas nun radio de 300 km con respecto ao centro da DANA, cun máximo pronunciado preto do seu centro, que se despraza marxinalmente cara o leste, diante dela (Porcù et al., 2007).

Unha vez a DANA se desconecta do fluxo zonal, deixa de ser dirixida pola corrente en chorro e torna errático e difícil de predicir, o que supón un gran desafío para o seu prognóstico a pesar dos sistemas de predición modernos (Bozkurt et al., 2016; Muofhe et al., 2020). Neste punto o movemento é normalmente lento e permanece sobre unha rexión ata que se reconecta ou se debilita ata disiparse. Polo tanto, son capaces de afectar considerablemente as condicións meteorolóxicas na superficie da Terra durante varios días seguidos (Winkler e Zawtz-Meise, 2001). Isto sitúa ás DANAs entre os sistemas meteorolóxicos máis importantes que afectan ao sur de Europa e norte de África, sendo responsables da maioría de eventos catastróficos en termos de precipitacións e as súas consecuencias (García Herrera et al., 2001).

Se ben o efecto das DANAs xa resulta especialmente relevante no momento actual, as súas consecuencias non se espera que se vexan reducidas no futuro, especialmente na situación de cambio climático actual. As DANAs que desencadean precipitacións extremas poderían aumentar ata un 88% nun clima máis cálido no nordés da Península Ibérica e un 61% na costa mediterránea española según simulacións realizadas co modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Estes resultados proporcionan matices importantes ás proxeccións dunha tendencia decrecente de precipitacións totais a medida que o clima torna máis cálido, é dicir, que choverá moito

menos pero con maior intensidade (Ferreira, 2021), o que aumenta o potencial desastroso destes eventos.

O aire troposférico carece de valores altos de PV, a diferenza do estratosférico, que ademais posúe concentracións de vapor de auga moito menores ás do aire da troposfera. Polo tanto, no caso dun STE pola existencia dunha DANA, tanto a PV coma o vapor de auga son variables que se poden usar como trazador, dado que ambas se conservan ben (Kentarchos e Davies, 1998b). A importancia do ozono vai máis alá da súa utilidade como trazador, xa que é un dos gases activos de efecto invernadoiro na troposfera e xoga un papel importante na meteoroloxía, perturbando o fluxo da corrente en chorro na troposfera superior (Baray et al., 2003), e no forzamento radiativo do clima, modulando a radiación solar de onda curta e a radiación de onda longa da Terra (Chen et al., 2006). Ademais, o tempo de vida fotoquímico do ozono é arredor de 22 días na troposfera libre (Stevenson et al., 2006), polo que o transporte de aire rico en ozono desde a estratosfera pódese prever que producirá perturbacións significantes ao ozono da media e baixa troposfera.

1.4. Fases e evolución.

A maioría de modelos conceptuais e teorías de DANAs desenvólvense a través de casos de estudo. Algunhas das características foron identificadas en exemplos que suceden no hemisferio norte (Palmén, 1949 e Hoskins et al., 1985) e máis concretamente na Península Ibérica e na área mediterránea (Nieto et al., 2005 e Llasat et al., 2007). O estudo de Nieto et al. (2005) propón un modelo conceptual de DANA que inclúe catro etapas: o desenvolvemento da canle en niveis altos (*“upper level through”*), ruptura (*“tear-off”*), illamento (*“cut-off”*) e a etapa final (*“final stage”*), como se observa na *Figura 4*. Cabe destacar que estas fases representan unha vista ideal de como os campos meteorolóxicos varían durante o ciclo de vida da DANA, pero sen detallar factores coma a evolución da precipitación en cada etapa.

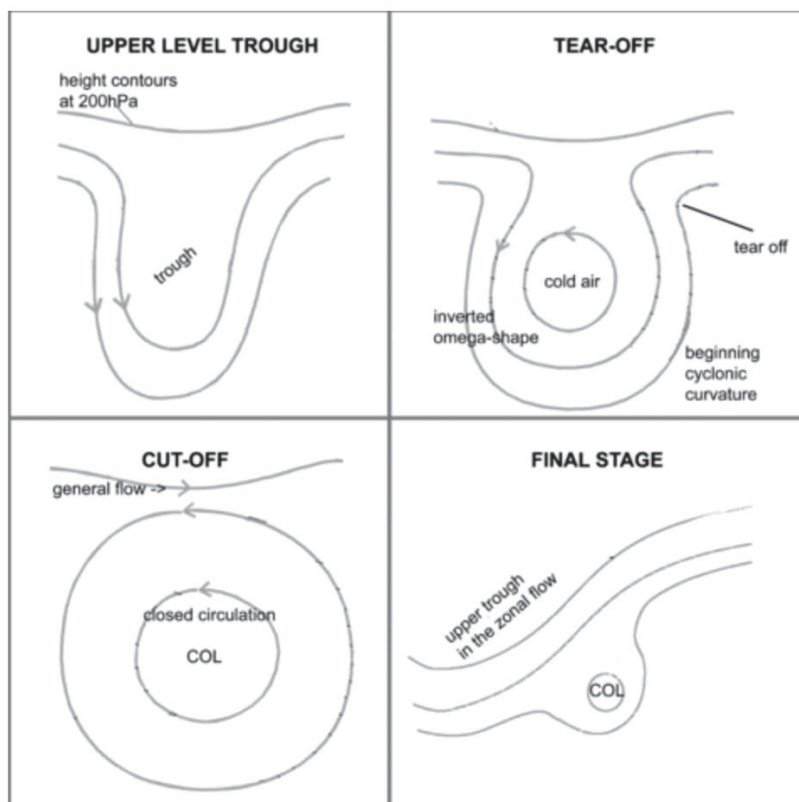


Figura 4. Diagrama da situación sinóptica típica dunha DANA, indicando as etapas do seu ciclo de vida en termos da súa estrutura meteorolóxica. O campo reflexado é o de xeopotencial en 200 hPa. Fonte: Nieto et al., 2008.

1.4.1. Desenvolvemento dunha vaguada en niveis altos.

Segundo o modelo conceptual exposto, a formación dunha DANA iníciase desde a corrente en chorro. Esta sofre unha ondulación debido ao aumento de intensidade, onde a compoñente meridional descendente do vento se ve incrementada polo crecemento da inclinación, como se observa na *Figura 5*.

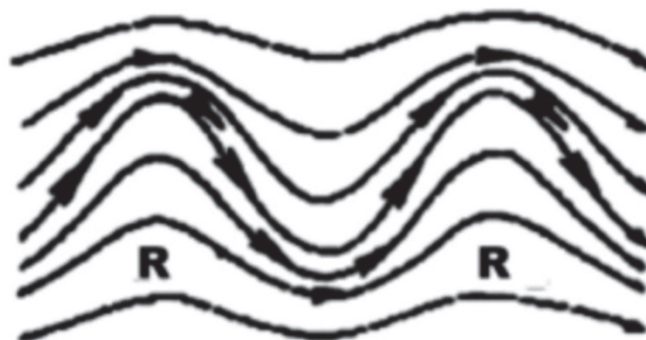


Figura 5. Ondulación da circulación en chorro en niveis altos, onde as R sinalan as dúas dorsais que rodean a vaguada. Fonte: Nieto et al., 2008.

Unha condición esencial para o desenvolvemento dunha DANA é a existencia dunha onda que se amplifica a escala sinóptica nos niveis altos da troposfera nos campos tanto de xeopotencial coma de temperatura, coa diferenza de que este último se caracteriza por situarse retrasado con respecto á primeira onda citada (Nieto et al., 2005), o que dota ao sistema dunha advección fría no interior da baixa e doutra de tipo cálido na dorsal. As isohipsas e isotermas amosan un desprazamento cara o ecuador coa consecuencia do afundimento da canle, ao mesmo tempo que o eixe vertical desta se inclina cara atrás coa elevación, como se observa na *Figura 6*.

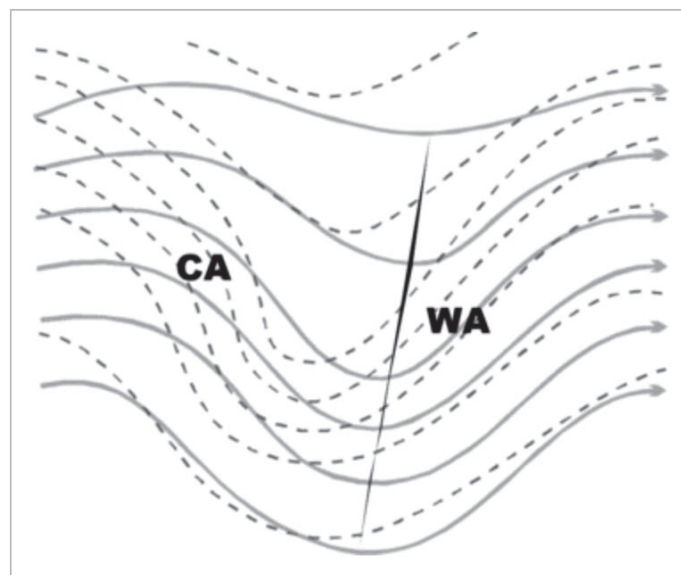


Figura 6. Ondas de temperatura (liñas descontinuas) e de xeopotencial (liñas continuas) xunto co eixe vertical marcado coa liña negra, ademais das adveccións fría e cálida citadas. Fonte: adaptación da Institución Central de Meteoroloxía e Xeodinámica de Austria (ZAMG, polas súas siglas en alemán).

Neste primeiro estado de profundización da vaguada en niveis altos existen zonas de aire húmido tanto diante como detrás da vaguada capaces de producir nubosidade, espesa e multicapa no sentido do movemento da DANA e deixando atrás outra fibrosa e alta relacionada co frente cálido. Sen embargo, o aire que se atopa no centro, en torno ao eixe, é seco (Muñiz, 2005).

1.4.2. Ruptura (“tear-off”).

Na segunda etapa, denominada de ruptura, o contorno xeopotencial en niveis medios da atmosfera amosa a forma dunha omega invertida e, debido ao crecemento continuo da amplitude de onda, a profundidade da canle aumenta e a vaguada comeza a desprenderse da circulación meridional. O aire frío no seu camiño cara o ecuador íllase da corrente xeral de natureza polar e o aire cálido, que sube en termos de latitude cara o polo, fai o propio con respecto á súa orixe subtropical. O resultado deste proceso é a formación e o desenvolvemento dun sistema de baixas presións e de núcleo frío en niveis altos, ao sur da canle, na parte inferior da vaguada. A baixa atópase nos seus estados iniciais, onde a baixa intensidade do sistema mantén a forma de omega invertida no campo de xeopotencial, como se observa na *Figura 7*.



Figura 7. Incremento da compoñente meridional do vento no seu lado descendente que dá ao sistema forma de omega invertida. Fonte: Nieto et al., 2008.

1.4.3. Illamento (“cut-off”).

A fase de illamento non é máis que a culminación do proceso iniciado na fase anterior. A separación da DANA respecto á súa corrente nai finaliza e o sistema amosa unha circulación ciclónica pechada ben definida no campo de ventos e a baixa en niveis altos intensifícase, como se observa na *Figura 8*. Este vórtice de ventos é evidente tanto en niveis altos (200 hPa) coma na media troposfera (500 hPa), acadando nalgúns casos incluso a superficie (1000 hPa). As bandas de nubes adquiren circulación ciclónica forte, pero o mantemento da DANA e a súa esperanza de vida depende de numerosos factores, en particular da estabilidade termodinámica baixo ela. Pódese desenvolver nubes convectivas se a inestabilidade no núcleo do sistema é suficiente e producirse un quecemento do aire frío que contén a DANA no seu centro, rematando co gradiente de temperatura respecto ao aire que o rodea e debilitando a circulación ciclónica (Muñiz, 2005).



Figura 8. Illamento completo da baixa con respecto á circulación xeral, coa posibilidade dunha rexión de altas presións na dorsal ao norte desta. Fonte: Nieto et al., 2008.

O desprazamento da DANA é moi lento, sendo incluso interpretable como estacionaria nalgunhas ocasións. Neste punto, o factor que determinará a vida restante do sistema será canto tarde o quecemento adiabático en disolver a estrutura (Muñiz, 2005).

1.4.4. Fase final.

Nesta etapa final será onde a DANA remate, polo tanto describiranse os procesos e situacións que levarán ao fin do sistema. Principalmente, os dous casos polos que poden suceder son a convección ou a adhesión de novo á circulación xeral, como se observa na *Figura 9*, aínda que ás veces o que ocorre é unha combinación de ambas, onde tras debilitarse por convección se reintroduce na corrente principal, ou de xeito excepcional noutra DANA (Muñiz, 2005).



Figura 9. Reabsorción da DANA por parte da circulación xeral. Fonte: Nieto et al., 2008.

Como se introduciu no apartado anterior, o destino da DANA depende esencialmente da situación atmosférica baixo ela. Se o aire desde a superficie é cálido, dotando ao sistema dun gradiente vertical de temperatura, desenvolverase a convección. Isto desencadeará un estado de decadencia, acompañado dun forte STE adicional final e dun desenvolvemento baroclino no borde dianteiro da DANA, como se observa na *Figura 10*, o que xerará ciclóns que poden suceder de xeito consecutivo. De todas maneiras, o campo de ventos transportará aire cálido e húmido cara o centro da baixa, levando á diminución do gradiente de temperatura e polo tanto á disolución da DANA. Pola contra, tamén pode darse o caso de que o aire da superficie sexa o suficientemente frío como para que non se inicie o proceso convectivo. O que ocorrerá nesta ocasión é que só a circulación xeral é capaz de disolver a DANA incorporándoa de novo, a non ser que o sistema sufra un desprazamento ata unha zona de superficie máis cálida, onde xa podería darse o caso anterior (Porcù et al., 2007).

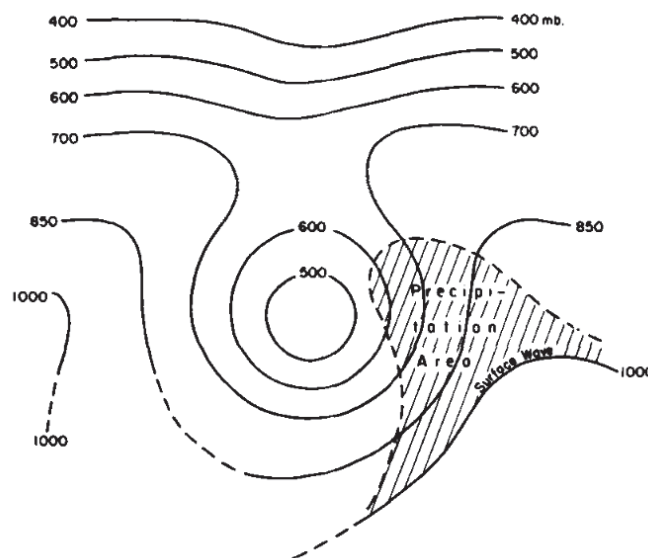


Figura 10. Topografía en mb (hPa) onde se sinala a área de precipitacións no borde dianteiro da DANA (zona sombreada), a cal será na que sucedan os ciclóns en superficie. Fonte: Palmén, 1949.

2. Caso de estudo e obxectivos.

2.1. Área de estudo.

Existe unha total concordancia e validación climatolóxica nos resultados dos estudos xa referenciados e máis acerca das áreas máis favorables para a ocorrencia de DANAs. Estas son: o sur de Europa e a costa oriental do océano Atlántico, incluíndo o mar Mediterráneo e o norte de África; o Pacífico Norte oriental e costa oeste estadounidense; e a rexión norte de China-Siberia, estendéndose ata a costa noroeste de océano Pacífico. Estes 3 sectores pódense delimitar mediante as seguintes coordenadas xeográficas: entre 47.5°N e 25°N e desde 50°O ata 40°L o europeo; entre 45°N e 25°N e desde 150°O ata 100°O o norteamericano; e entre 62.5°N e 37.5°N e desde 100°L ata 180°L o asiático. Cabe destacar á rexión europea descrita como a principal en termos de ocorrencia, ademais de contar con 2 zonas diferenciadas dentro dela: por un lado a referente ao océano Atlántico e por outro a que abrangue o Mediterráneo e as súas inmediacións, como se observa na *Figura 11*. Estes resultados amosan que as DANAs suceden preferentemente nas inmediacións das principais vaguadas de fluxo circumpolar de grande escala.

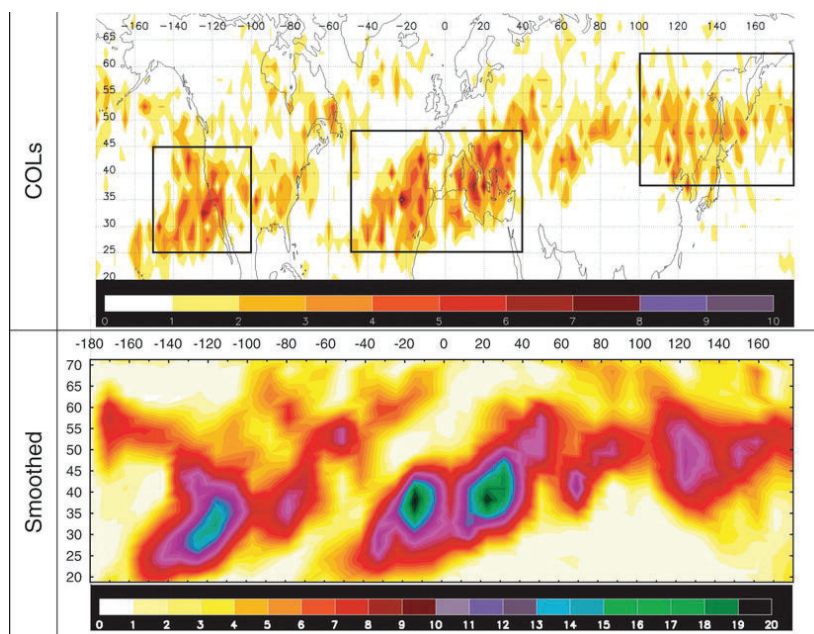


Figura 11. Número total de DANAs identificadas para o período de 1958 a 1998 (gráfica superior), cunha representación suavizada dos datos para unha mellor representación das principais áreas de ocorrencia (gráfica inferior), sinaladas arriba nun recadro negro. Fonte: Nieto et al., 2008.

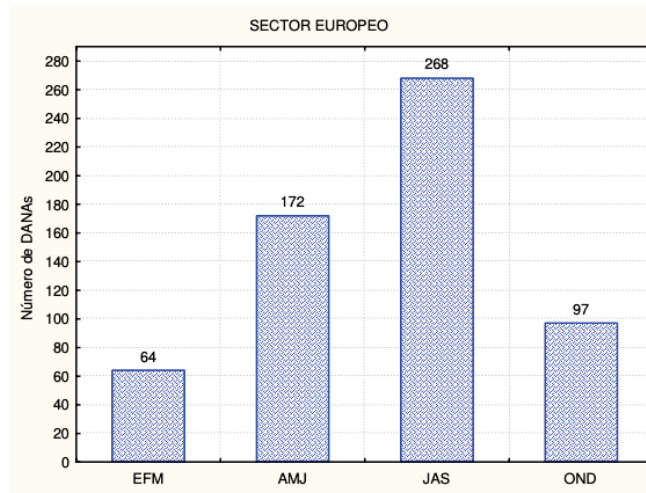


Figura 12. Distribución temporal de DANAs no sector europeo onde se amosa o número total de sistemas identificados en cada estación do ano, representada polas iniciais en castelán dos seus principais meses. Os datos son dun período de 40 anos, entre 1958 e 1998. Fonte: Muñiz, 2005.

Os meses de verán son os máis favorables para a formación deste tipo de sistemas, ao contrario dos meses de inverno, que serán os menos afectados pola ocorrencia de DANAs, como se observa na *Figura 12*. Esta distribución estacional é común nos 3 sectores descritos (amosado na *Figura A1* dos anexos), xa que o motivo está relacionado ca corrente en chorro que circunvala a Terra, como se observa na *Figura 13*. O que sucede é que no inverno a alta intensidade do “jet stream” se debe ao alto gradiente de temperatura meridional. Pola contra, no verán as zonas continentais son máis cálidas, diminuindo o gradiente e polo tanto a intensidade da corrente en chorro, favorecendo así as correntes meridionais e polo tanto a probabilidade de formación de DANAs (Price e Vaughan, 1992; Kentarcho e Davies, 1998a).

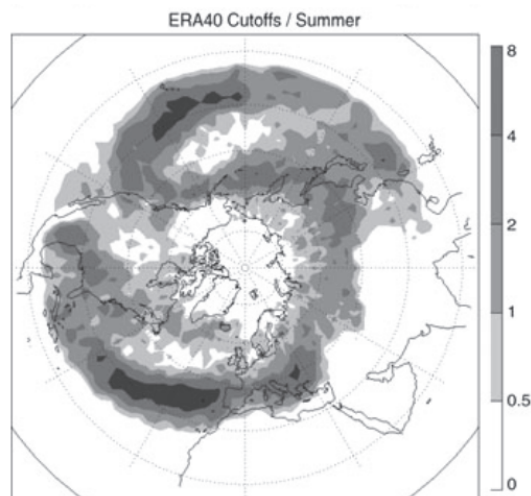


Figura 13. Distribución de DANAs identificadas pola antiga reanálise ERA-40 (1958-2002). A lenda mostra a porcentaxe por mil na que o punto formou parte dunha DANA. Fonte: Nieto et al., 2008

Será na Península Ibérica e polo tanto no sector europeo, e na época estival, onde se centra o estudo levado a cabo neste traballo. Aquí, as consecuencias da meteoroloxía extrema causada polo paso dunha DANA os primeiros días de setembro do ano 2021 foron dunha gravidade significativa. A área de estudo é a comprendida entre 70°N e 25°N e desde 50°O ata 25°L para a análise da formación e evolución do sistema, representada na *Figura 14*. É axeitado non incluír latitudes superiores a 70° N para evitar que o vórtice polar principal afecte aos datos (Nieto et al., 2005). E para a avaliación dos efectos que causou en superficie, a área elixida será entre 45°N e 35°N e desde 10°O ata 4°L, representada na *Figura 15*.

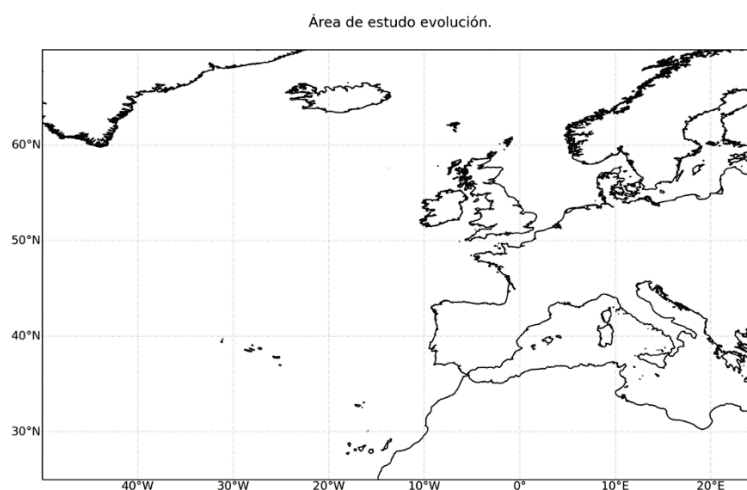


Figura 14. Mapa da rexión onde se analizará a evolución da DANA desde a súa separación da corrente en chorro en zonas polares ata a súa desaparición no sector europeo.

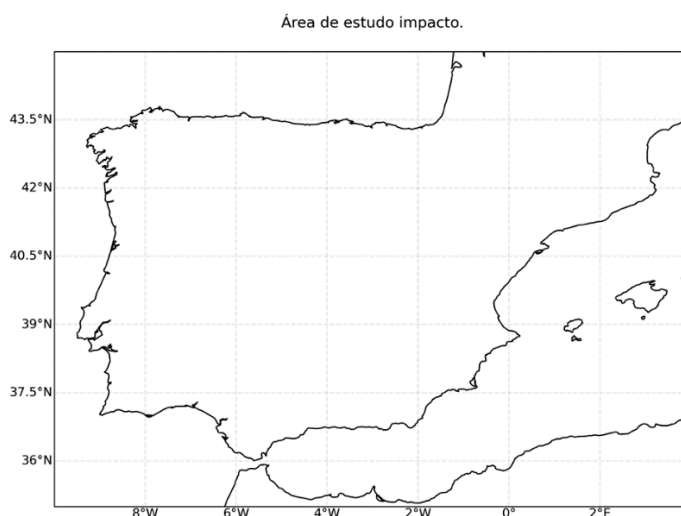


Figura 15. Mapa da rexión onde se analizarán as precipitacións da DANA sobre a Península Ibérica na súa etapa final.

2.2. Meteoroloxía asociada.

Non todas as DANAs traen á Península Ibérica precipitacións intensas de tipo convectivo, como se asocia ao termo antes de descrito de “gota fría”. Sen embargo, as precipitacións sobre a zona mediterránea si que son debidas principalmente ás ocasionadas pola localización dun sistema deste tipo, representando máis dun 60% do total anual (Muñiz, 2005). Non só pola acción directa desta estrutura meteorolóxica, senón que tamén a súa influencia na circulación xeral dos oestes, xa que nalgúns casos as precipitacións no terzo norte peninsular son consecuencia da entrada de fronteas asociadas ao fluxo xeral mentres que a DANA permanece illada na metade sur. Isto débese á orografía da Península Ibérica, que provoca un forte gradiente de precipitacións entre a costa cantábrica húmida do noroeste e a seca rexión de Levante no sueste (Ferreira, 2021). Na rexión occidental as precipitacións poden chegar a ser moito maiores, aínda que as orientais teñen maior potencial de ser extremas, pero con numerosos e duradeiros eventos de sequía (Olcina, 2020).

O Mediterráneo, especialmente a súa cunca occidental, aseméllase a unha cubeta case pechada por un borde montañoso elevado cuxo fondo ocupa o mar. En xeral, e cada vez máis debido ao cambio climático, o mar Mediterráneo supón un importante sumidoiro de calor, acumulando unha gran cantidade ao final do verán. Este almacenou, e cada vez máis a causa do cambio climático, gran cantidade de calor ao final do verán (Pastor et al., 2020). Este calor é transmitido ao aire xunto con humidade e cun gran potencial enerxético, o cal pode ser aínda maior se se produce un aporte de aire de orixe africano. No caso existir baixas presións sobre o mar Mediterráneo e ventos de compoñente leste, de maneira que sobre aire destas características se sitúe o aire frío contido no núcleo dunha DANA, prodúcese unha inestabilidade convectiva moi importante que pode desencadear un forte movemento ascendente debido ao gradiente vertical de temperatura (Pinheiro et al., 2021). Como resultado, libérase toda esta enerxía en forma de grandes chuvascos e tormentas, supoñendo arredor dun terzo das riadas e inundacións repentinas na costa mediterránea española e afectando a amplas rexións que poden ir desde Cataluña ata a rexión de Murcia (Ferreira 2021).

Pero esta DANA non afectou tan só ao litoral, senón que foi gran parte da Península Ibérica a que sufriu as súas consecuencias, a excepción do oeste peninsular.

2.3. Danos persoais e materiais.

Segundo apuntan as noticias reportadas por xornais coma “El Mundo”, medios dixitais coma “elDiario.es” e “Diario Público”, a DANA causou inundacións e riadas provocadas por intensas chuvias nas comunidades de Madrid, Castela-A Mancha e Navarra, ademais da provincia de Castelló e da zona do Baixo Ebro, durante o 1 de setembro de 2021. Nesta última acadáronse os 77 litros por metro cadrado en tan só media hora, para un total de 232 litros por metro cadrado. Durante a tarde sucedéronse numerosos cortes en estradas, túneles e o metro de Madrid.

Durante o día 2 de setembro a DANA continuou, deixando 13 comunidades en alerta por chuvias e fortes tormentas de sarabia, e sendo as do nordés peninsular, ademais das Illas Baleares ás de maior risco (alerta laranxa). O número de raios chegou a 41000, segundo informes da AEMET. Os danos non deixaron de sumarse, tales como desaloxos de vivendas, rescates de vehículos e cortes ferroviarios, ademais doutros centos de chamadas aos servizos de emerxencias.

Gobernos coma o de Castela-A Mancha xa activara o último día de agosto o Plan Específico ante o Risco por Fenómenos Meteorolóxicos Adversos (METEOCAM), aumentando posteriormente a fase de emerxencia nivel 1, tras valorar o aumento das incidencias especialmente na provincia de Toledo, onde máis tarde se declararían zonas afectadas gravemente por emerxencias de protección civil (ZAEPC) lugares con máis de 100 vivendas damnificadas pola DANA.

2.4. Obxectivos.

Lonxe de ser un caso illado, o verán e a Península Ibérica son o momento e o lugar predilecto para que sucedan episodios desta magnitude. As DANAs con fenómenos atmosféricos extremos causan importantes danos a moitos niveis, tanto persoais coma sociais e económicos. Polo tanto, a necesidade de coñecer o desenvolvemento deste tipo de eventos é de vital importancia.

Coa análise dun caso real, o que se busca con este traballo é describir a maneira na que se poden desenvolver este tipo de sistemas, co fin de aumentar o coñecemento sobre as DANAs para aumentar a precisión na súa predición e a capacidade de reducir ao mínimo o seu potencial impacto catastrófico. Analizáronse distintos campos de interese para describir a formación e dinámica do sistema, tanto desde o punto de vista de cada un deles como para observar como se inflúen entre si.

3. Metodoloxía.

3.1. Datos de reanálise.

A fonte de datos escollida para a realización do presente estudo correspóndese cos datos de reanálise ERA5. Os datos de reanálise son datos que combinan a precisión dos datos observacionais coa resolución espacial que ofrecen os modelos a nivel global, nunha base de datos. Nun principio, a análise combina as novas observacións dispoñibles cunha previsión anterior dun xeito óptimo para xerar unha nova estimación do estado de atmosfera para unha previsión actualizada. O que diferencia á reanálise é que pese a funcionar do mesmo xeito, esta reduce a resolución co fin de proporcionar un conxunto de datos de varias décadas de antigüidade. Ademais, sen a necesidade de emitir previsións, dedícase a recompilar observacións de xeito que canto máis atrás no tempo vai, maior será o beneficio para a calidade do produto de reanálise. ERA5 son datos de reanálise producidos polo Servizo de Cambio Climático Copernicus (C3S) impulsado polo Centro Europeo de Predición a Medio Prazo (ECMWF, polas súas siglas en inglés). Estes datos poñen a disposición diferentes variables atmosféricas desde 1940 ata hoxe, actualizándose en tempo real, cunha latencia de 5 días. Todos estes datos almacénanse na CDS (Climate Data Store) deste servizo, e deste repositorio é de onde se obtivo toda a información dos parámetros utilizados para a total análise da DANA obxecto deste estudo.

A reanálise ten unha ampla aplicación en ciencias atmosféricas, especialmente en centros de meteoroloxía operacional, onde se utiliza para valorar o impacto dos cambios nos sistemas de observación. Para calibrar os avances nas capacidades de modelización e asimilación, e así obter climatoloxía de última xeración que permita avaliar as anomalías nos erros de predición (Hersbach et al., 2020).

ERA5 está baseado na recente versión do IFS (Sistema Integrado de Predición) do ECMWF e ofrece notables melloras respecto á tecnoloxía que substitúe: a ERA-interim. Entre estos avances están a máis alta resolución vertical e horizontal e o mellor uso dos datos satelitais (Thépaut et al., 2018). Ten unha cobertura horizontal global e unha resolución de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ na reanálise atmosférica.

A reanálise ERA5 ofrece datos horarios e a calquera nivel de presión atmosférica (37, desde 1000 a 1 hPa) de distintas variables, ademais doutras baseadas nun só nivel. De entre estas escolléronse as máis axeitadas para o estudo deste sistema. Os parámetros escollidos para a identificación e análise da evolución da DANA desde a súa orixe polar ata a súa chegada á Península

Ibérica son: a altura xeopotencial nos niveis de 200, 300, 500, 850 e 100 hPa, co fin de obter unha boa representación ao longo da vertical atmosférica; o espesor equivalente, resultante da combinación de dous dos niveis do parámetro anterior; e a vorticidade potencial nos niveis altos da atmosfera (200 e 300 hPa). Ademais, para avaliar o impacto meteorolóxico na Península tamén se obtiveron os valores de precipitación na superficie. Por último, certos parámetros serán combinados para dotar ao estudo de maior profundidade.

Todos estes datos foron descargados do repositorio para o período comprendido entre o 24 de agosto ata o 3 de setembro do 2021, ambos incluídos. Se ben os datos de reanálise están dispoñibles cunha resolución temporal dunha hora, co fin de optimizar o tempo de descarga, tendo en conta as necesidades de caracterización da DANA, os datos foron descargados cada 3 horas. O formato de descarga elixido foi *netCDF*. Este tipo de datos permite almacenar a información nunha estrutura multidimensional, limitando a cantidade de arquivos a descargar. Neste caso teremos arquivos con 4 “dimensión”. Teremos unha dimensión horizontal representada pola latitude e a lonxitude, sumada á dimensión vertical establecida polos diferentes niveis na vertical seleccionados neste estudo. Por último a dimensión adicional serán os diferentes pasos de tempo. Outra vantaxe de este tipo de datos é que permite unha fácil visualización dos datos a través do programa Panoply sen a necesidade de programar todos os pasos de tempo a través de *python*, linguaxe usada para o postprocesamento dos datos e a súa representación. Panoply é unha aplicación baseada en Java desenvolto polo Instituto Goddard de Estudos Espaciales da NASA es que permite a visualización de diferentes formatos de datos xeoreferenciados.

Como xa se comentou con anterioridade o procesamento e representación final dos datos realizouse a través da linguaxe de programación *python*. Foron varias as librerías utilizadas nesta linguaxe de programación. Debido o tipo de datos empregados para a descarga (*netCDF*) foi necesario da librería *netcdf4* para a carga das diferentes variables. Para o tratamento básico dos datos empregouse a librería *numpy* Para a representación bidimensional dos datos empregouse a librería *matplotlib*, apoiada da librería *cartopy* a cal permite o correcto procesamento e representación dos datos xeoespaciais. Finalmente empregouse tamén un filtro gaussiano para suavizar e homoxeneizar os datos representados, co fin dunha mellor visualización.

3.2. Parámetros de identificación e análise.

3.2.1. Altura xeopotencial.

Para a caracterización da DANA é imprescindible a representación da altura xeopotencial, a cal tal e como se explicou brevemente na introdución permite analizar a altura á que se atopa un determinado valor de presión. Esta variable non se atopa directamente na reanálise escollida para a realización deste estudo, sen embargo pódese calcular a través do xeopotencial (Hersbach et al., 2023). Este parámetro é a enerxía potencial gravitacional por unidade de masa, nun lugar particular, relativa ao nivel medio do mar, sendo as súas unidades m^2s^{-2} . Pode verse tamén coma a cantidade de traballo que debería facerse en contra da gravidade para elevar unha unidade de masa a un punto desde o nivel medio do mar. A altura xeopotencial pódese obter dividindo o valor que ofrece a reanálise entre a aceleración gravitacional da Terra, $g=9.80665 \text{ ms}^{-2}$, polo que a unidade da variable resultante sería o metro. O papel desta variable na meteoroloxía sinóptica é de gran importancia, para a análise de patróns meteorolóxicos. Os niveis de presión escollidos (200, 300, 500 e 1000 hPa) pódense usar para identificar sistemas como ciclóns, anticiclóns, canles, ou neste caso, DANAs. Ao seleccionar, por exemplo o valor de presión de 200 hPa, o mapa de altura xeopotencial indicará a que altura se atopará ese nivel de presión na rexión de interese. Segundo se ilustrou na *Figura 2*, as superficies isobáricas non son superficies planas, senón que presentan ondulacións. Un centro con valores máis baixos de altura xeopotencial permitirá identificar as zonas de baixas presiónse aire frío asociado á DANA, causado pola vaguada de superficie isobárica.

3.2.2. Espesor equivalente.

O espesor equivalente trátase do espesor da capa atmosférica entre dúas superficies de presión. É unha variable de gran utilidade en meteoroloxía, especialmente para a localización de sistemas (Huber-Pock and Kress, 1981). Para o seu cálculo é preciso obter os datos de altura xeopotencial dos dous niveis para os que se precise o espesor. Unha vez obtidos, o espesor non será máis que a diferenza entre ambas alturas.

Os niveis utilizados para o estudo desta variable serán por un lado niveis máis altos (200 e 300 hPa), e por outro niveis intermedios (500 e 850 hPa).

3.2.3. Vorticidade potencial.

A vorticidade potencial (PV) é unha medida da capacidade do aire de rotar na atmosfera (Hersbach et al., 2023). Este parámetro calcúlase a partir do vento, a temperatura e a presión a través dunha columna de aire na atmosfera. Se esta comeza a rotar pode resultar na formación de fortes tormentas, polo que esta é unha variable moi útil para buscar puntos onde sexa probable que se orixinen e desenvolvan grandes temporais.

As unidades nas que a reanálise ofrece esta variable son $\text{m}^2\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}$, pero para este traballo multiplicamos os datos por 10^6 para telos en PVU (unidade de vorticidade potencial). Isto é de gran utilidade xa que a PV sofre un forte incremento máis alá da tropopausa (polo que tamén se utiliza en estudos relacionados coa estratosfera e o STE), a cal se pode asociar a un valor de 2 PVU. Usando isto como referencia, resulta sinxelo distinguir intrusionés de aire estratosférico na troposfera.

O campo de PV serve ás veces como acompañamento do xeopotencial nos primeiros pasos do proceso de identificación dunha posible DANA, polo que tamén se amosarán en conxunto neste estudo.

3.2.4. Precipitación total.

Este parámetro abarca a auga líquida e conxelada acumulada -chuvia e neve- que cae á superficie da Terra (Hersbach et al., 2023). É a suma das precipitacións a grande escala e convectivas. Esta variable non inclúe a néboa, o resío, nin as precipitacións que se evaporan na atmosfera antes de chegar á superficie da Terra. Para a reanálise, o período de acumulación depende dos datos extraídos, sendo de máis dunha hora. As unidades nas que se ofrece a precipitación total son os metros, aínda que dado o curto período de acumulación os datos neste estudo serán representados en milímetros, multiplicando os orixinais por 10^3 . Serán polo tanto os mm de profundidade equivalente que tería a auga uniformemente repartida na área de resolución (“grid box”, en cada punto de malla no que se dividen os datos). Cómpre ter coidado á hora de comparar os parámetros do modelo coas observacións, xa que estas son a miúdo locais en espazo e tempo, en lugar de representar medias sobre unha área delimitada (punto de malla) polo que a precisión vese reducida co uso de datos de reanálise neste parámetro.

3.2.5. Outros.

Ademais da PV, outras variables serán representadas xunto co xeopotencial para poder extraer máis información delas. Estas son a temperatura, o vento e a presión media ao nivel do mar (MSLP, polas súas siglas en inglés).

Nunha DANA os campos de temperatura e xeopotencial son paralelos, excepto na fase inicial, onde as isotermas se atopan retrasadas, como se observa na *Figura 16*.

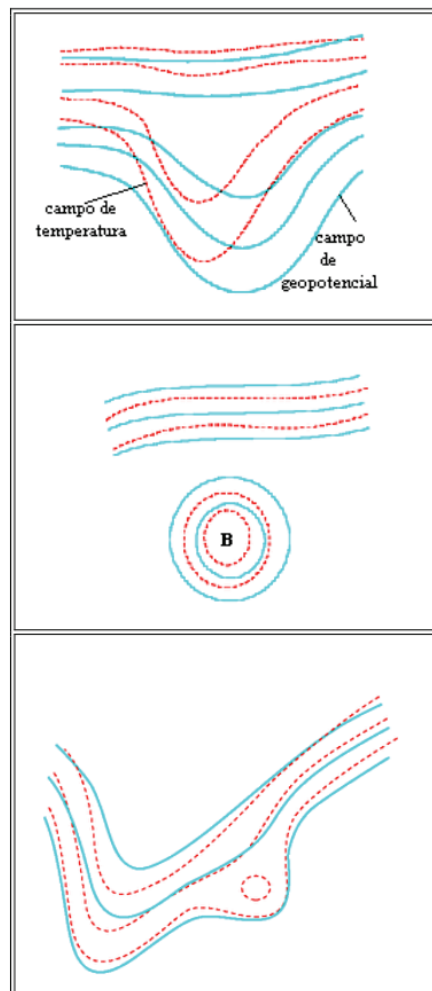


Figura 16. Esquema ideal dunha DANA para os campos de xeopotencial (liñas azuis) e temperatura (liñas vermellas descontinuas) ambas no nivel de 500 hPa para a primeira fase, a de illamento e a etapa final (de arriba a abaixo, respectivamente). Fonte: Muñiz, 2005.

A reanálise ERA5 descompón o vento nas súas compoñentes u e v , sendo a primeira a velocidade horizontal do aire movéndose cara o leste, e a segunda a velocidade horizontal do aire movéndose cara o norte (Hersbach et al., 2023). Un signo negativo indicaría movementos cara o oeste e o sur, respectivamente. Ambas compoñentes pódense combinar para representar a

velocidade e dirección do vento horizontal, a través do cálculo do módulo do vector. Este parámetro é útil no estudo de DANAs xa que no nivel de 200 hPa, o campo de ventos amosa máximos na rexión que atravesa a tropopausa (Nieto et al., 2005).

As DANAs ás veces amosan unha baixa débil pero non sempre teñen sinal en superficie. Para clasificar o sistema obxecto de estudo neste traballo elixiuse o parámetro de presión media ao nivel do mar (MSLP, polas súas siglas en inglés) no lugar do de presión en superficie coma noutros estudos similares, xa que este último se vía moi influído pola orografía do terreo e non amosaba información útil para a análise da presión a nivel superficial. Esta variable é a presión por unidade de área da atmosfera na superficie do planeta, medida en Pa e axustada á altura do nivel medio do mar (Hersbach et al., 2023). É unha medida do peso que tería toda a columna de aire sobre un punto da superficie da Terra, se ese lugar se atopara no nivel medio do mar. Calcúlase sobre calquera superficie -terra, mar ou augas continentais-. Os mapas de MSLP son útiles para identificar puntos de sistemas meteorolóxicos de baixas e altas presións, chamados habitualmente ciclóns e anticiclóns, respectivamente. Contornos de MSLP tamén indican a forza do vento, xa que zonas de alto gradiente amosan fortes ventos.

Por último, cabe destacar unha variable non utilizada neste traballo pero moi relacionado cas DANAs, o parámetro frontal térmico (TFP). É de gran utilidade para a análise e localización de fronteas, xa que mide o cambio de gradiente de temperatura na dirección deste (Porcù et al., 2007), e os seus valores máximos marcan os puntos onde se produce o cambio de temperatura nunha fronte (Muñiz, 2005), que ademais coinciden coa zona de alto gradiente de espesor equivalente.

4. Resultados e discusión.

4.1. Localización, traxectoria e evolución.

O proceso levado a cabo para a análise dinámica desta DANA comeza por identificar en aspectos xerais o seu ciclo de vida, en base ás fases anteriormente definidas. En primeiro lugar, trátase de identificar a través de mapas de altura xeopotencial en distintos niveis de presión atmosférica, os momentos asociados a cada unha destas fases. Na primeira fase do ciclo de vida da DANA, a vaguada comeza a definirse en 200 hPa. Polo tanto, é neste nivel onde se buscará un mínimo de altura xeopotencial para identificar unha posible DANA (Porcù et al., 2007). Pódese situar a primeira destas, o desenvolvemento dunha vaguada en niveis altos, o día 24 de agosto ás 21 horas. Neste caso, tanto o mapa en 200, coma en 300 e 500 hPa, como se observa na *Figura 17*, amosan claramente a vaguada e a dorsal dianteira. Os mapas contan cunha representación por cores onde de frías (azuis) a cálidas (vermellas) amosan un valor maior de altura xeopotencial.

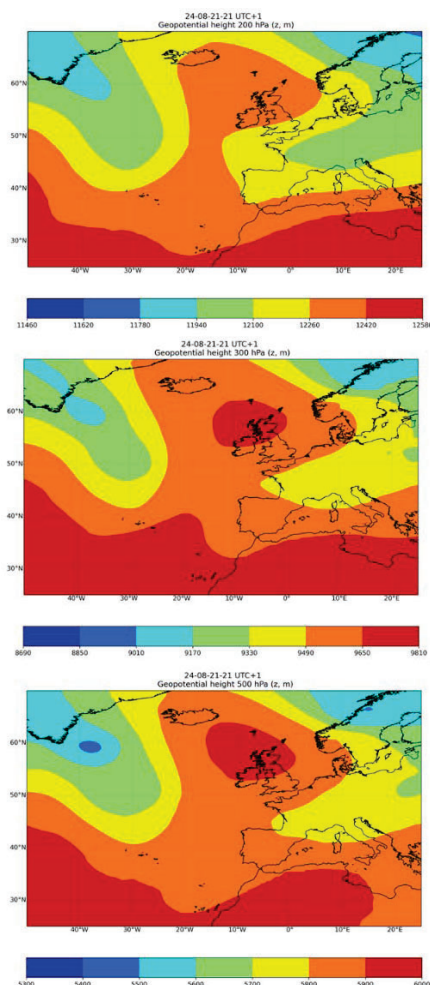


Figura 17. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, do 24/08/2021 ás 21 horas.

Respecto á segunda etapa, a chamada “*tear-off*” ou de ruptura, a forma de omega aparece en primeiro lugar en maior altura (200 hPa) e descende na atmosfera cara niveis medios (Muñiz, 2005) co paso das horas, entre os días 25 e 26 de agosto, como se observa na *Figura 18*.

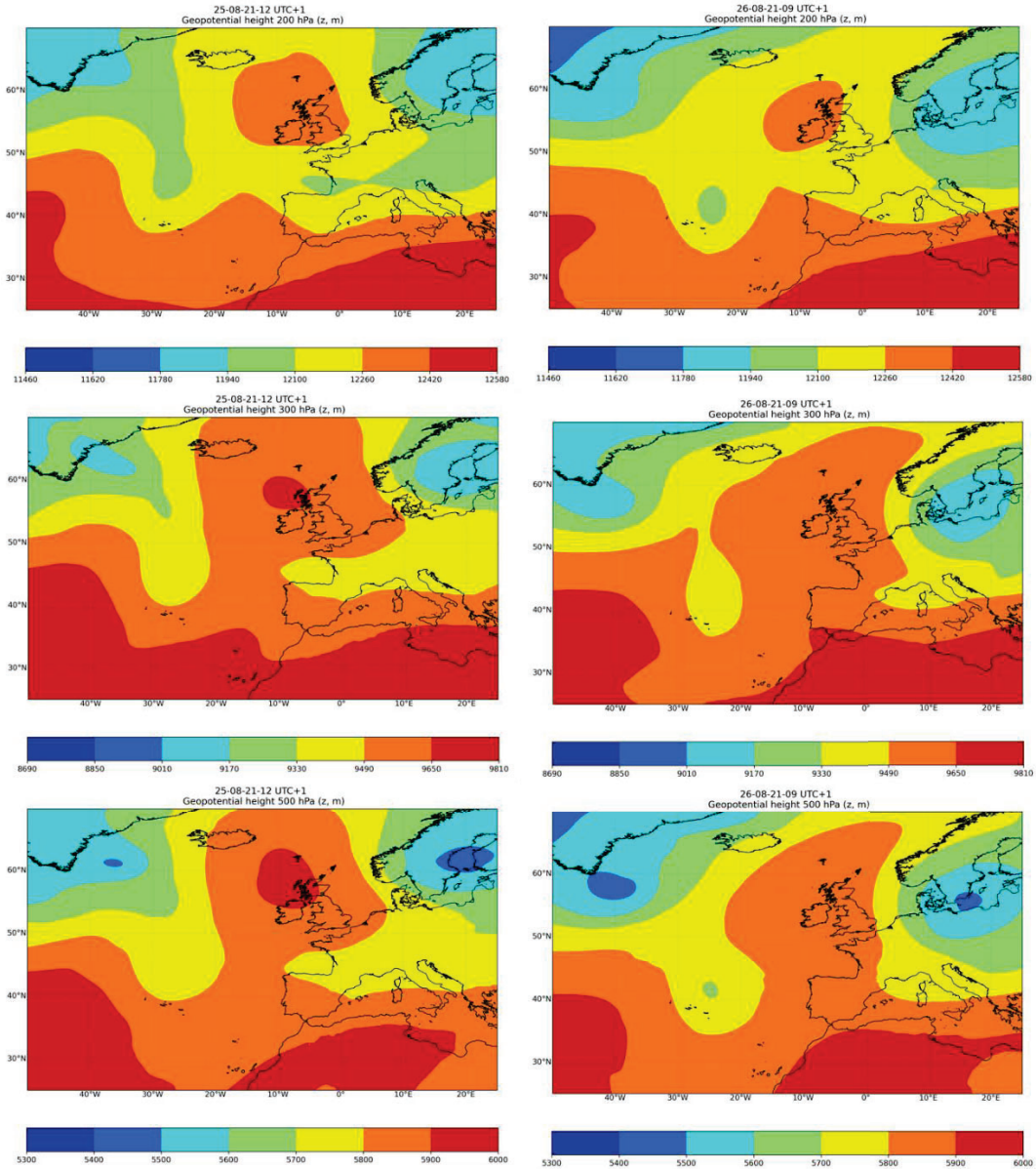


Figura 18. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, dos días 25/08/2021 e 26/08/2021 ás 12 e 9 horas, respectivamente.

A DANA alcanza a etapa de illamento total, progresivamente desde 200 ata 500 hPa o día 28 de agosto. Aquí, moi lentamente e cun xiro ciclónico pechado sobre si mesmo, amosado nas *Figuras A2, A3, A4, A5 e A6* nos anexos, o sistema achégase á Península Ibérica. O día 31 de agosto, o último antes do comezo das fortes precipitacións, os mapas amosan unha rexión de

altas presións ao norte da baixa, como se observa na *Figura 19*. A DANA chega durante esta fase ao nivel de 850 hPa, pero deixa de ter sinal antes de alcanzar terra.

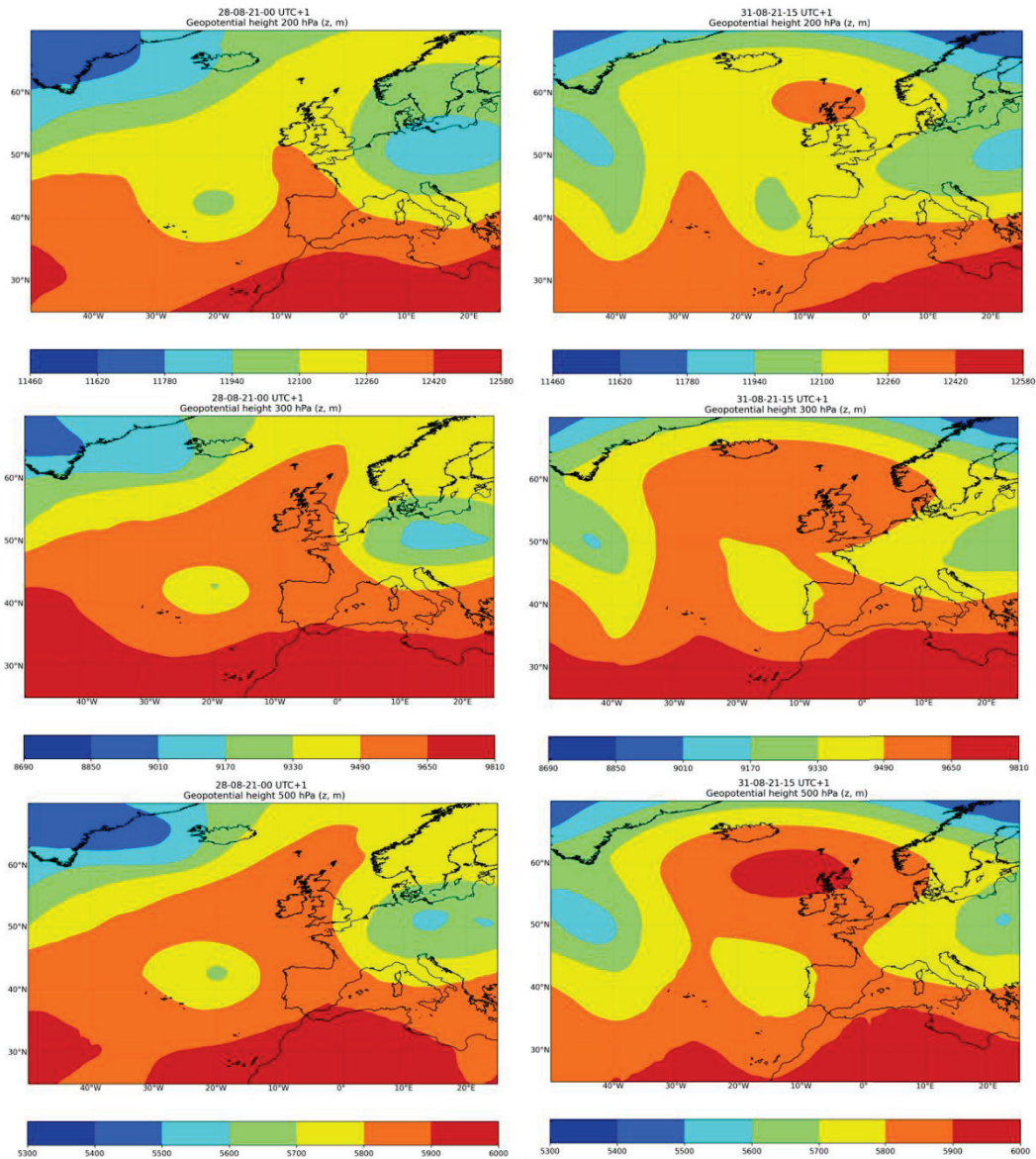


Figura 19. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, dos días 28/08/2021 e 31/08/2021 ás 0 e 15 horas, respectivamente.

Sen rematar a fase “*cut-off*” ou de illamento, o día 1 de setembro a DANA alcanza a Península Ibérica nos 3 niveis e comezan os episodios torrenciais descritos anteriormente sobre diversos puntos do territorio. Menos de 24 horas despois o sistema deixa de amosar sinal na alta troposfera, en 200 hPa, tras case 8 días do seu illamento neste nivel, como se observa na *Figura 20*.

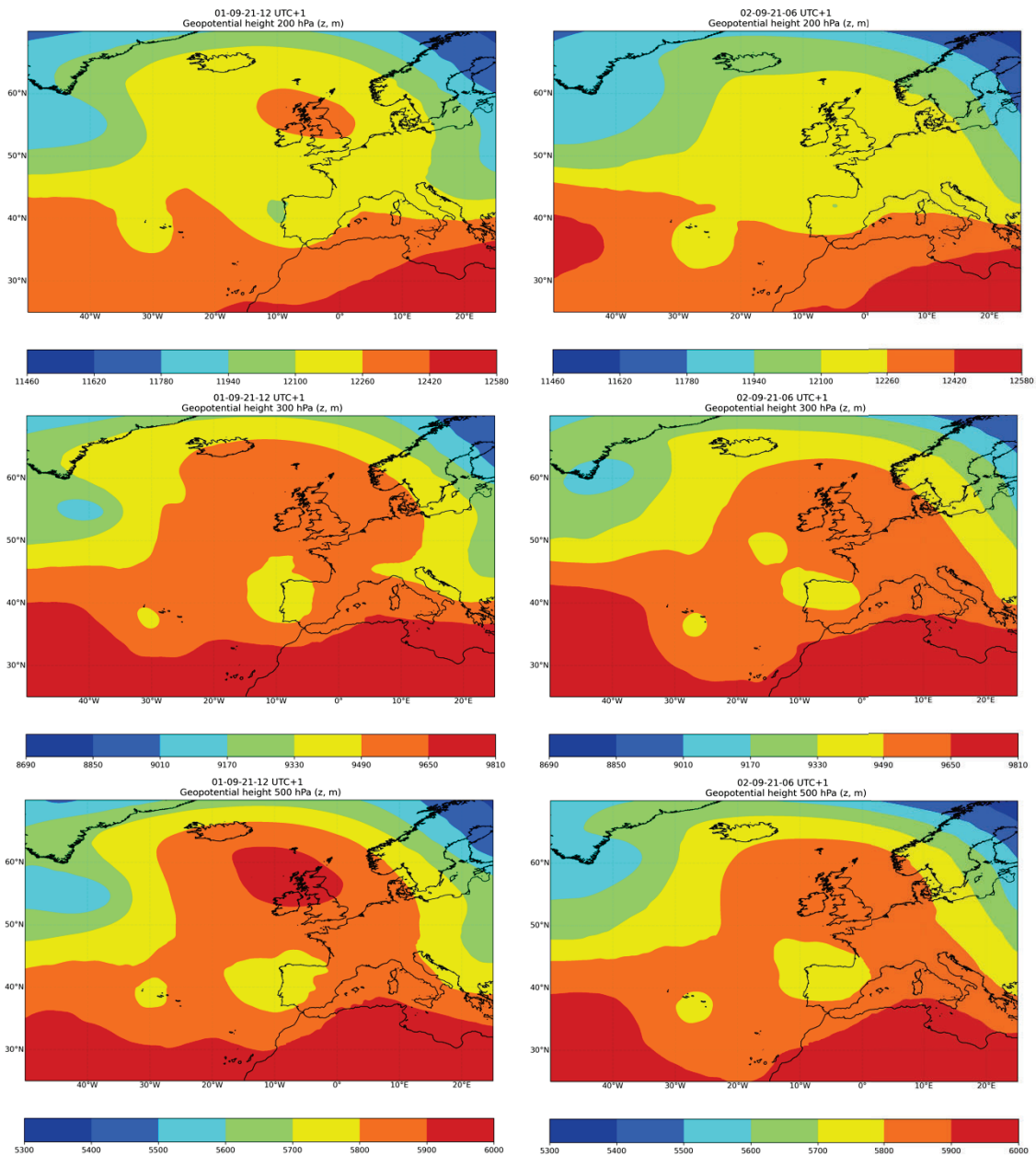


Figura 20. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 200, 300 e 500 hPa, dos días 1/09/2021 e 2/09/2021 ás 12 e 6 horas, respectivamente.

A DANA conclúe coa súa etapa final entre os días 2 e 3 de setembro, cando é reabsorbida pola circulación xeral no nivel de 500 hPa, como se observa na *Figura 21*. No nivel que se toma como referencia para a superficie, o de 1000 hPa, non hai evidencia da existencia da DANA que está a suceder nos niveis superiores, algo que ás veces si sucede (Nieto et al., 2005).

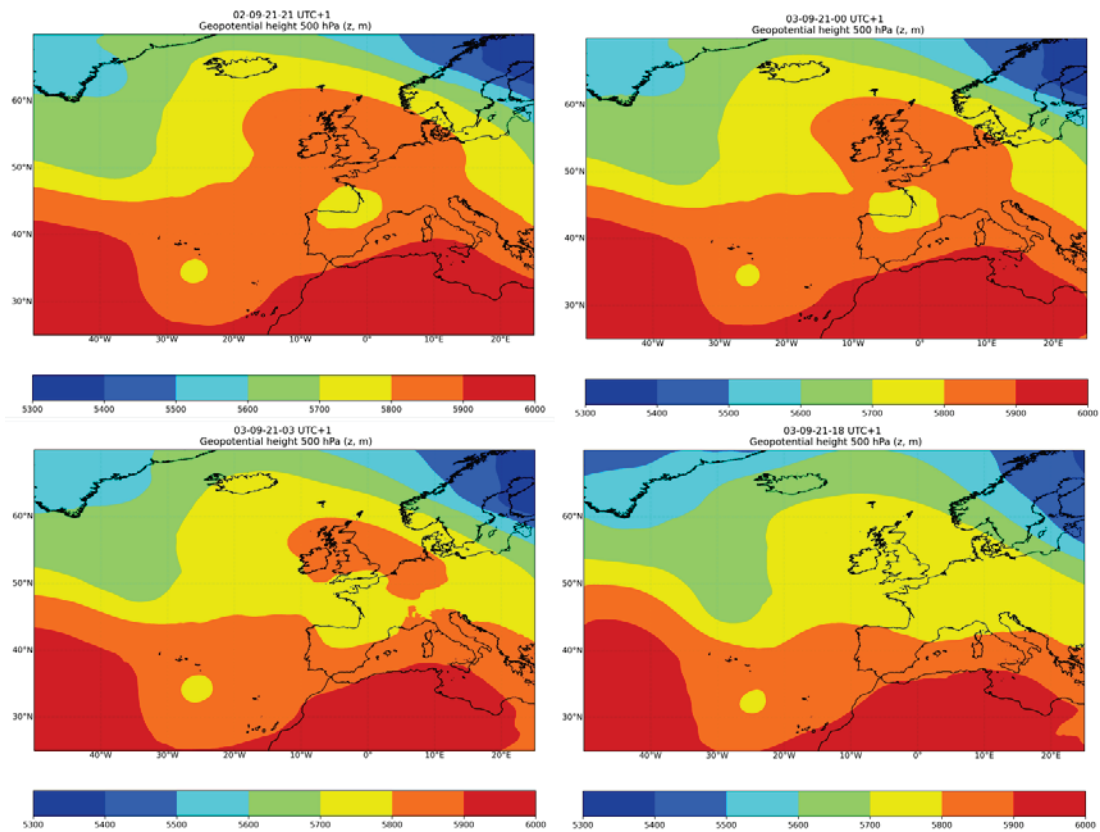


Figura 21. Mapas de altura xeopotencial (en metros) en 500 hPa do 2/09/2021 ás 21 horas e do 3/09/2021 ás 0, 3 e 18 horas. A orde cronolóxica neste caso é seguindo as filas.

4.2. Características sinópticas.

En base ao resto de parámetros rematarase por definir e clasificar a DANA. En primeiro lugar na *Figura 22* amósase a espesor equivalente entre os niveis de 200 e 300 hPa e 500 e 850 hPa. O espesor nesta figura estará representados polas liñas mentres que en cores preséntase a altura xeopotencial co fin de identificar a posición da DANA. Esta variable daranos unha idea do próximas ou separadas que se atopan as superficies isobáricas en cada punto da nosa rexión de estudo. En canto ao espesor equivalente, os mapas de 200-300 (columna esquerda da *Figura 22*) e 500-850 (columna esquerda da *Figura 22*) amosan zonas de alto gradiente, como era de esperar, ao longo do ciclo de vida do sistema. Na primeira fila desta, amósase un alto gradiente arredor do núcleo na primeira fase de desenvolvemento da DANA, como se expón no modelo teórico (Nieto et al., 2007). De seguido, as dúas filas seguintes correspóndense coa etapa de illamento, onde se aprecia especialmente xa sobre a Península Ibérica, un gradiente significativo por todo o territorio, que indica multitude de fronteas. E por último, os mapas amosan por última vez a estrutura esperada sobre o litoral mediterráneo, momento correspondente á fase final da DANA.

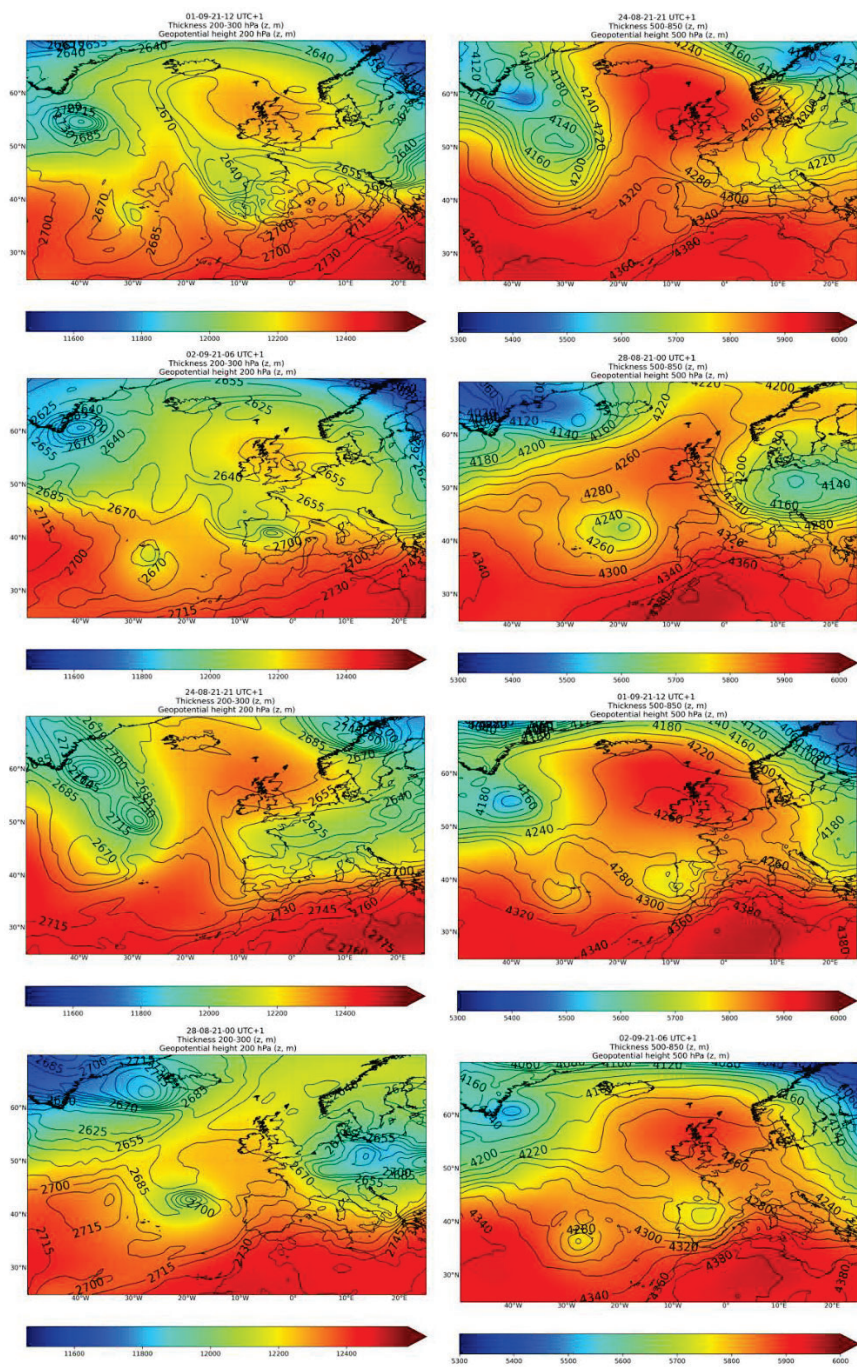


Figura 22. Mapas de espesor equivalente (liñas) e altura xeopotencial (cores, en metros), de 200-300 hPa (esquerda) e 500-850 hPa (dereita) durante os días 24 e 28 de agosto, e 1 e 2 de setembro, antes asociados ás etapas do ciclo de vida da DANA.

A PV pode usarse como indicador de presenza de aire estratosférico, xa que no núcleo da DANA ocorre unha intrusión deste cara a troposfera polo pregamento da tropopausa, xa explicado en seccións anteriores. As anomalías de PV que representan o pregamento da tropopausa inducen a circulación pechada da DANA, polo que a súa orixe dinámica é un proceso de alta troposfera, pero que pode estenderse a niveis inferiores na atmosfera

(Barnes et al., 2021a, 2021b; Pinheiro et al., 2021; e inducir cicloxénes en superficie (Portmann et al., 2020). O nivel de presión de referencia para estes intercambios é o de 200 hPa, mais neste estudo engádese o de 300 hPa para analizar a profundidade da DANA. Este aire estratosférico posúe un valor de moita maior PV ca o que habitualmente hai na troposfera, polo que se observamos os mapas en ambos niveis de altura xeopotencial e PV resultará doado detectar os máximos de vorticidade nos contornos pechados.

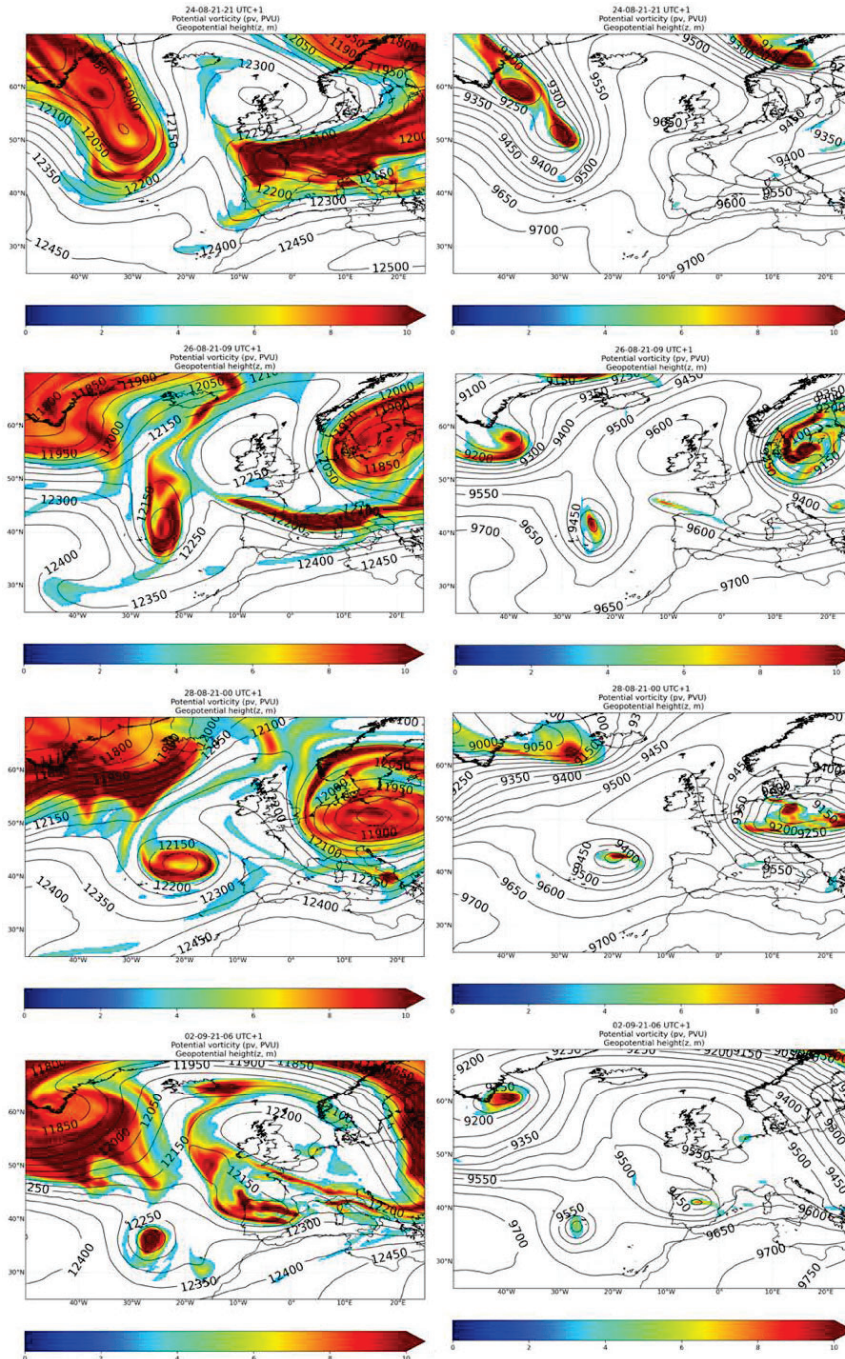


Figura 23. Mapas de altura xeopotencial e PV en 200 (coluna da esquerda) e 300 hPa (columna da dereita) durante os días 24, 26 e 28 de agosto, e o 2 de setembro. Días xa identificados con etapas do ciclo de vida da DANA.

A *Figura 23* amosa a evolución deste conxunto de campos ao longo do ciclo de vida da DANA. Nesta figura as liñas representan o xeopotencial mentres que as cores representarán a PV. Elimináronse os valores menores a 2 PVU no campo de PV, xa que se determina este valor para a tropopausa dinámica, para unha mellor visualización da aire estratosférico na troposfera. Na primeira columna de esta figura, correspondente ao nivel de 200 hPa identificase claramente esta intrusión estratosférica representada polos elevados valores de PU clamente asociados ao centro da DANA. Se analizamos este campo no nivel de 300 hPa (segunda columna da *Figura 23*) podemos ver que valores elevados de PV no centro da DANA, amosando que a profundidade da DANA é suficiente como para deixar sinal nel.

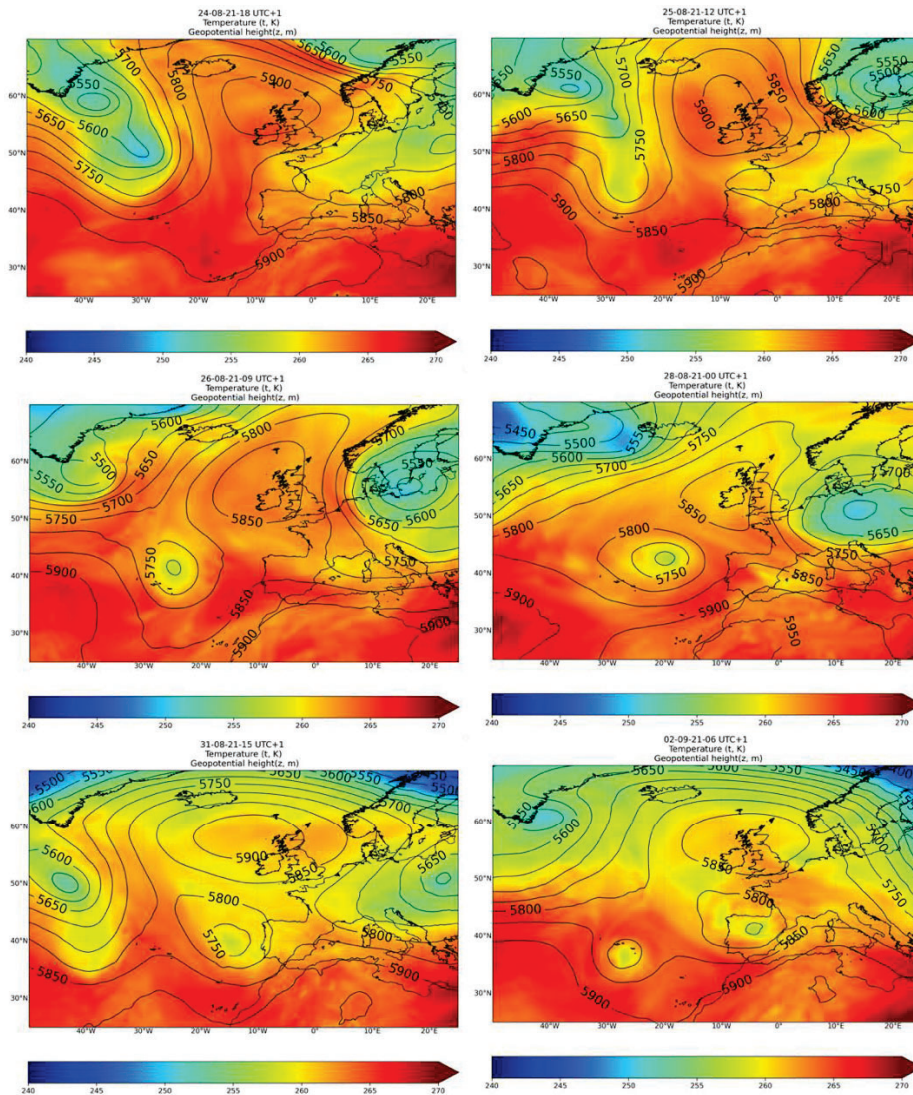


Figura 24. Evolución dos campos de altura xeopotencial (liñas negras continuas) e temperatura (cores) no nivel de 500 hPa ao longo do ciclo de vida da DANA, durante os días 24 e 25 de agosto (primeira fila), 26 e 28 agosto (segunda fila) e 31 de agosto, e 2 de setembro (tercera fila), días antes asociados ás etapas do ciclo de vida da DANA. A unidade da temperatura é o Kelvin.

Na *Figura 24* preséntase as temperatura e a altura xeopotencial no nivel de 500 hPa. Representáanse ambos campos para analizar o seu comportamento en conxunto, o de temperatura con cores e a altura xeopotencial con liñas. No primeiro mapa amosado na *Figura 24* apréciase perfectamente a localización adiantada das ondas de temperatura con respecto ás de altura xeopotencial no campo de 500 hPa, na primeira etapa de desenvolvemento da DANA. Ao longo da súa evolución, apréciase así un núcleo frío na baixa ata a disipación do sistema, xa que outra relación que gardan ambos campos é que dentro do contorno de altura xeopotencial pechado, requírese que a temperatura sexa menor ca no entorno (Hu et al., 2011).

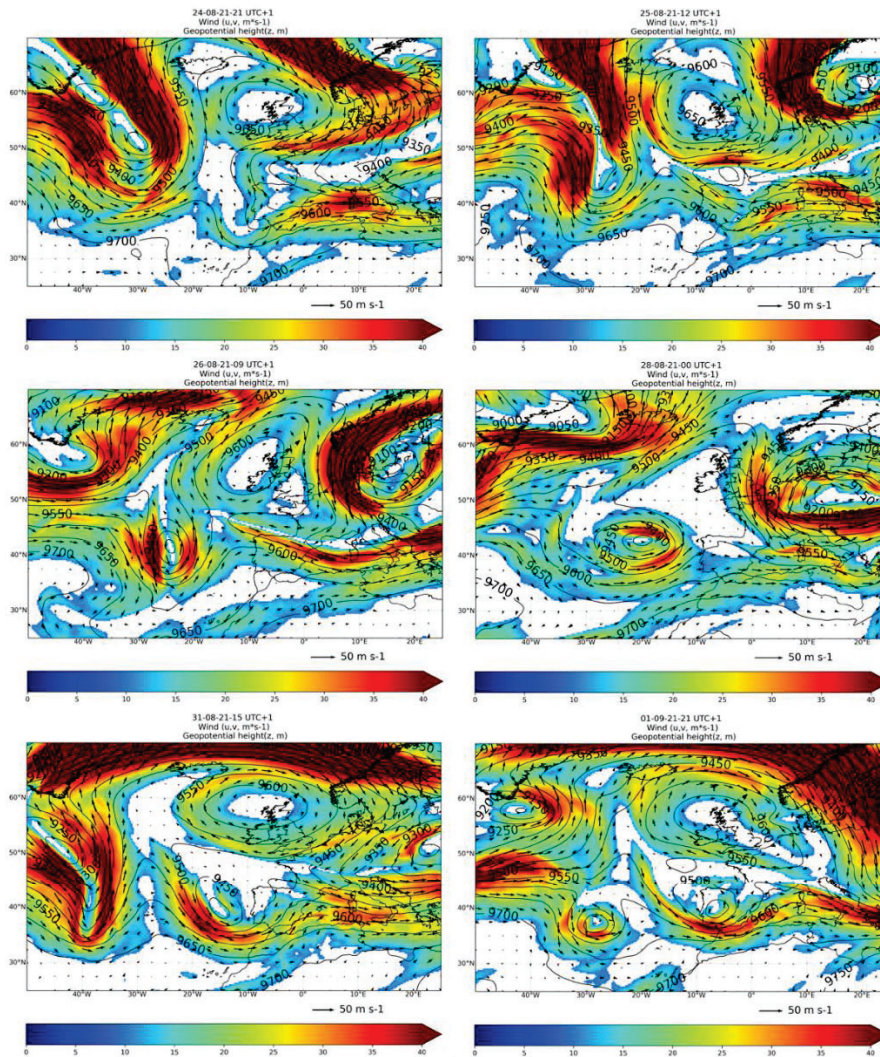


Figura 25. Mapa de ventos (ms^{-1}) e altura xeopotencial no nivel de 300 hPa, durante os días 24 e 25 de agosto (primeira fila), 26 e 28 agosto (segunda fila) e 31 de agosto, e 2 de setembro (tercera fila). O vento vén determinado polo módulo en cor e a dirección sinalada cunha frecha negra, cuxo tamaño tamén vai asociado ao módulo. A altura xeopotencial amosa sinalada por liñas negras continuas.

O estudo do campo de ventos levouse a cabo na media e alta troposfera, nos niveis de 200, 300 e 500 hPa, sen embargo debido ao similitude nos resultados en todos estes niveis decidiuse presentar só un neste traballo. O nivel elixido para a representación do campo, como se observa na *Figura 25*, foi o de 300 hPa, xa que neste é onde mellor se amosan as características do campo de ventos ao longo da evolución da DANA. Elimináronse os valores menores a 10 ms^{-1} para unha mellor visualización. O campo de altura xeopotencial, tamén representado en liñas para comprobar a concordancia de ambos campos, tamén é o do nivel de 300 hPa.

Durante a primeira fase, asociada ao 24 de agosto, existe un vento meridional cara o sur na parte traseira da vaguada. Durante o seguinte día amósase unha intensificación desta corrente ata existir xa en ambos lados, en sentidos contrarios, o día 26 (fase de ruptura). Chegada a fase de illamento, o mapa a día 28 amosa circulación ciclónica pechada, que remata cando os ventos se asocian ás liñas de presión ao nivel do mar, que se verá a continuación. O campo de ventos amosa claramente o comportamento esperado ao longo das fases de evolución da DANA.

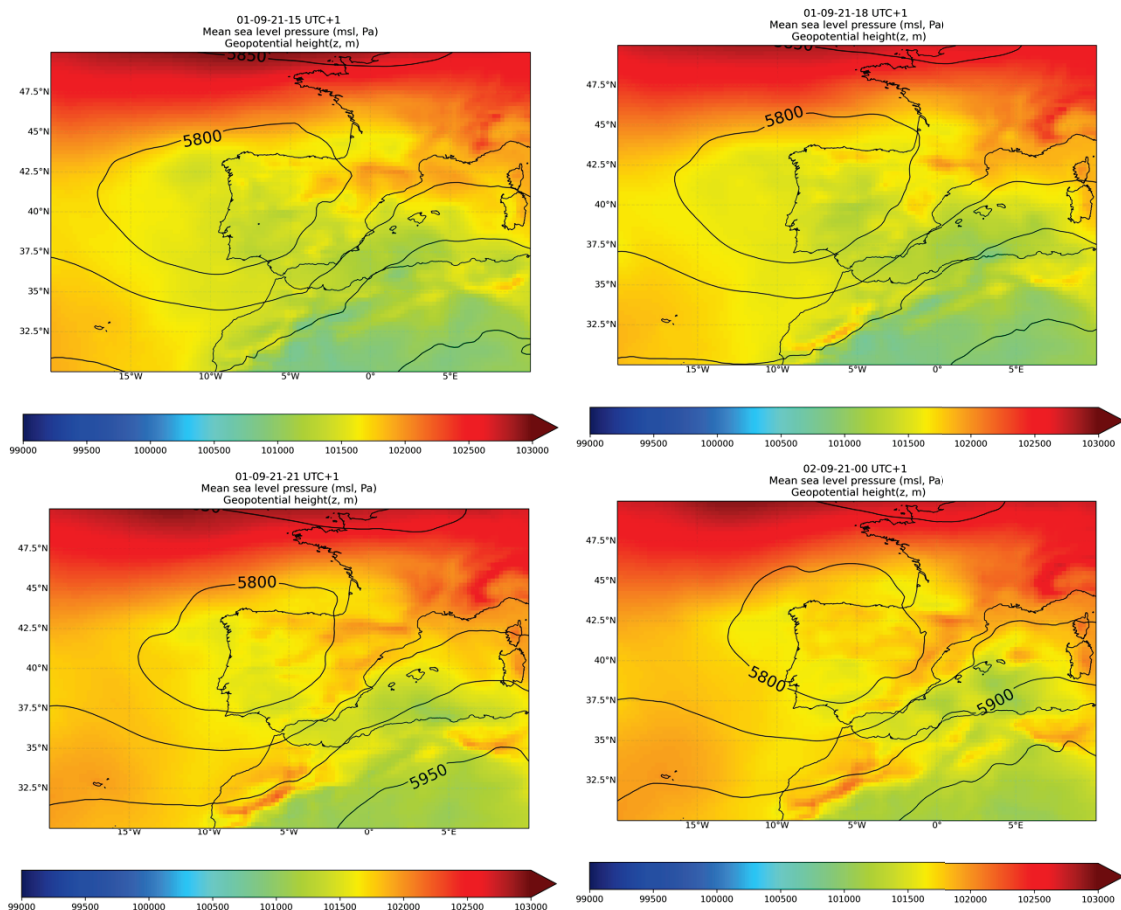


Figura 26. Evolución dos apas de altura xeopotencial en 500 hPa (liñas negras continuas) e MSLP (gradiente de cor) durante as horas descritas. As unidades dos valores da presión son Pa.

Ao longo deste estudo comprobouse que a profundidade da DANA de estudo non foi suficiente como para ter reflexo en 1000 hPa. Na *Figura 26* trátase de inferir as situación cerca da superficie sobre a Península Ibérica con referencia aos eventos de precipitación observados sobre ela (a partir de día 1 de setembro). Para elo represéntase o MSLP, este parámetro vén representado por un gradiente de cores de tonalidade fría a cálida. O campo de altura xeopotencial en 500 hPa sinalado con liñas, acompaña na representación desta variable para situar axeitadamente o estudo do parámetro no tempo. A área de estudo vese reducida para unha mellor visualización do que acontece sobre o lugar da DANA neste punto. Durante os días nos que o sistema xa se atopa sobre a Península Ibérica, os mapas de MSLP (*Figura 26*) amosan unha división entre presións máis altas na metade oriental e o outras menos na metade occidental, sen ser estes valores significativamente baixos, ata as 18 horas do día 1 de setembro. A partir das 21 horas, este campo amosa altas presións xeneralizadas.

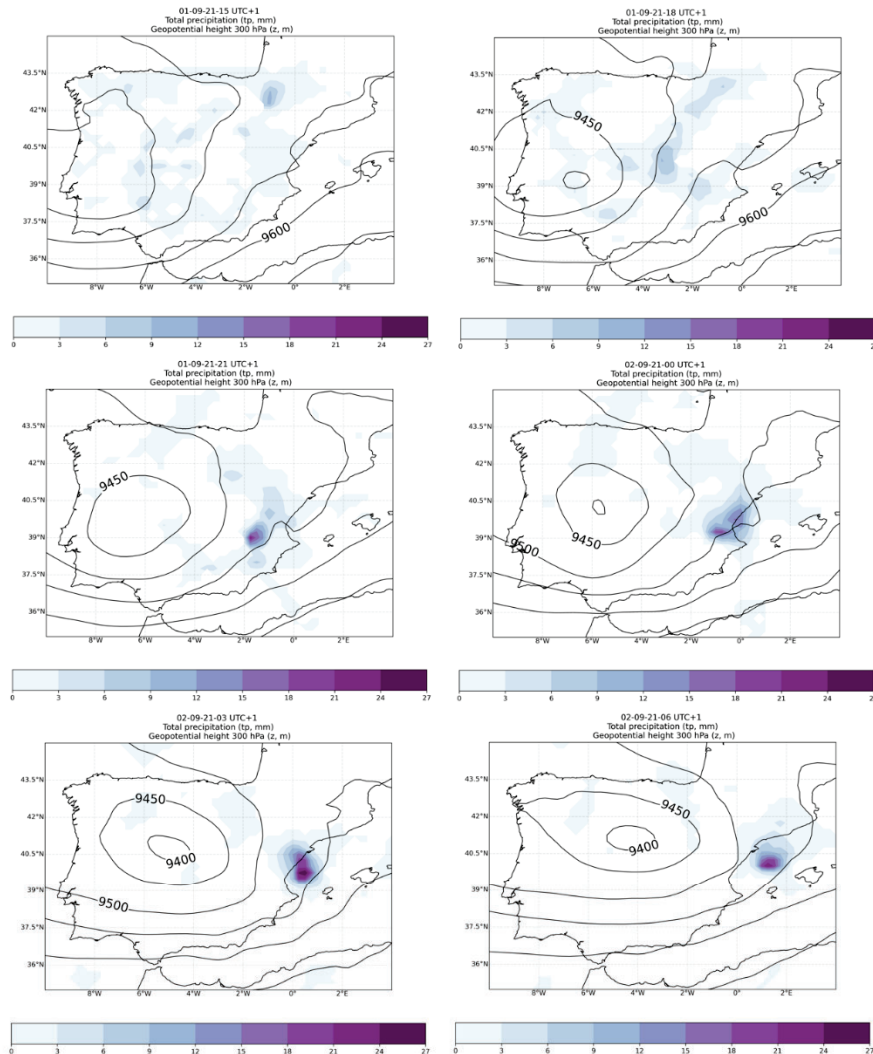


Figura 27. Campo de precipitacións totais durante os episodios de chuvias de maior intensidade do paso da DANA pola Península Ibérica, medido en mm. Altura xeopotencial en 300 hPa representada en liñas.

Por último tratase de analizar o efecto da DANA nas precipitacións sobre a península. Con este fin á *Figura 27* amosa a precipitación total sobre a rexión entre os días 1 e 2 de setembro. Xunto coa precipitación preséntase as liñas de xeopotencial en 300 hPa co fin analizar a situación da precipitación con respecto á DANA. O campo de precipitacións amosa chuvias de xeito xeral por todo o territorio, como se observa na *Figura 27*, desde a madrugada do día 1 de setembro ata as 21 horas, con maior presenza na metade oriental da Península Ibérica. É neste punto cando destacan precipitacións de alta intensidade entre as 21 horas do 1 de setembro e as 6 horas do día 2, sinaladas en cor morada, que coinciden coa distribución esperada na *Figura 10*. Tras este episodio torrencial, as chuvias cesan. Polo tanto, pese a non ser datos de estacións meteorolóxicas sobre o terreo, son valores moi representativos da realidade.

5. Conclusións.

Neste traballo tratouse de analizar unha DANA que en setembro de 2021 causou numerosos danos nunha ampla zona da Península Ibérica. Esta análise realizouse mediante o uso e tratamento de datos de reanálise ERA5 e a través da comparación co que sinala o modelo conceptual de DANA sobre o seu comportamento esperado

Este estudo amosa que esta DANA foi un sistema verdadeiramente típico en características sinópticas, cumprindo co que se esperaba atopar en cada un dos parámetros estudados. Feito, que tamén destaca a reanálise coma datos de gran utilidade en meteoroloxía. Limitacións coma a atopada na variable de precipitación total, suxeita a unha complexa resolución horizontal, non supuxeron un problema neste traballo, xa que os resultados coinciden co reportado en superficie.

A maior peculiaridade deste sistema en particular é o potencial destrutivo que tivo. Unha DANA é un fenómeno habitual no sector no que se atopa a Península Ibérica, xa que esta se atopa no lugar de maior ocorrencia de todo o hemisferio. Por iso, aínda que gran parte dos sistemas deste tipo non sexan tan severos, resulta de gran importancia estudos acerca das DANAs, para coñecer cada vez mellor as súas características e así predicilas e paliar o súa perigosidade.

6. Referencias

- Ancellet, G., Beekmann, M., & Papayannis, A. (1994). Impact of a cutoff low development on downward transport of ozone in the troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D2), 3451-3468.
- Barnes, M. A., Ndarana, T., & Landman, W. A. (2021a). Cut-off lows in the Southern Hemisphere and their extension to the surface. *Climate Dynamics*, 56(11-12), 3709-3732.
- Barnes, M. A., Turner, K., Ndarana, T., & Landman, W. A. (2021b). Cape storm: A dynamical study of a cut-off low and its impact on South Africa. *Atmospheric Research*, 249, 105290.
- Bamber, D. J., Healey, P. G. W., Jones, B. M. R., Penkett, S. A., Tuck, A. F., & Vaughan, G. (1984). Vertical profiles of tropospheric gases: Chemical consequences of stratospheric intrusions. *Atmospheric Environment* (1967), 18(9), 1759-1766.
- Baray, J. L., Baldy, S., Diab, R. D., & Cammas, J. P. (2003). Dynamical study of a tropical cut-off low over South Africa, and its impact on tropospheric ozone. *Atmospheric environment*, 37(11), 1475-1488.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (1976). *Atmosphere Weather and Climate*. Third edition.
- Barsby, J., & Diab, R. D. (1995). Total ozone and synoptic weather relationships over southern Africa and surrounding oceans. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D2), 3023-3032.
- Borchi, F., & Marengo, A. (2002). Discrimination of air masses near the extratropical tropopause by multivariate analyses from MOZAIC data. *Atmospheric environment*, 36(7), 1123-1135.
- Bozkurt, D., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Arriagada, A. (2016). Impact of warmer eastern tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama floods. *Monthly Weather Review*, 144(11), 4441-4460.
- Chen, H. B., Bian, J. C., & Lu, D. (2006). Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange. *CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES-CHINESE EDITION-*, 30(5), 813.
- Cuevas, E., & Rodríguez, J. (2002). Statistics of cutoff lows over the North Atlantic. *Proc. Third Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, 1-3.

- Delgado, G., Redano, A., Lorente, J., Nieto, R., Gimeno, L., Ribera, P., ... & Serrano, A. (2007). Cloud cover analysis associated to cut-off low-pressure systems over Europe using Meteosat Imagery. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96, 141-157.
- Ferreira, R. N. (2021). Cut-off lows and extreme precipitation in eastern Spain: Current and future climate. *Atmosphere*, 12(7), 835.
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1996). Case studies of cyclogenesis over South America. *Meteorological Applications*, 3(4), 359-367.
- Gimeno, L., Hernández, E., Rúa, A., García, R., & Martín, I. (1999). Surface ozone in Spain. *Chemosphere*, 38(13), 3061-3074.
- Gouget, H., Vaughan, G., Marengo, A., & Smit, H. G. J. (2000). Decay of a cut-off low and contribution to stratosphere-troposphere exchange. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(564), 1117-1141.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.adbb2d47 (Accessed on DD-MMM-YYYY)
- Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., & Pfister, L. (1995). Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of geophysics*, 33(4), 403-439.
- Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., & Robertson, A. W. (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(470), 877-946.
- Hu, K. X., Lu, R. Y., & Wang, D. H. (2011). Cold vortex over Northeast China and its climate effect. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 35(1), 179-191.
- Huber-Pock, F., & Kress, C. (1981). Contribution to the Problem of Numerical Frontal Analysis. na.
- Jansà Clar, A. (2004). ¿ Qué es la gota fría?.

- Kentarchos, A. S., & Davies, T. D. (1998a). A climatology of cut-off lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990–1994. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(4), 379-390.
- Kentarchos, A. S., Davies, T. D., & Zerefos, C. S. (1998b). A low latitude stratospheric intrusion associated with a cut-off low. *Geophysical Research Letters*, 25(1), 67-70.
- Kentarchos, A. S., Roelofs, G. J., Lelieveld, J., & Cuevas, E. (2000). On the origin of elevated surface ozone concentrations at Izana Observatory, Tenerife during late March 1996. *Geophysical research letters*, 27(22), 3699-3702.
- Knippertz, P., & Martin, J. E. (2005). Tropical plumes and extreme precipitation in subtropical and tropical West Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 131(610), 2337-2365.
- Kuo, H. L. (1949). Dynamic instability of two-dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. *Journal of Atmospheric sciences*, 6(2), 105-122.
- Llasat, M. C. (1991). Gota fría. *Boixareu Universitaria*, (6), 165.
- Llasat, M. C., Martín, F., & Barrera, A. (2007). From the concept of “Kaltlufttropfen”(cold air pool) to the cut-off low. The case of September 1971 in Spain as an example of their role in heavy rainfalls. *Meteorology and Atmospheric physics*, 96, 43-60.
- Martín León, F. (2003). *Las gotas frías/DANAs: ideas y conceptos básicos*. Instituto Nacional de Meteorología.
- Miky Funatsu, B., Gan, M. A., & Caetano, E. (2004). A case study of orographic cyclogenesis over South America. *Atmósfera*, 17(2), 91-113.
- Muñiz, R. N. (2005). *Validación climática del modelo conceptual de dana* (Doctoral dissertation, Universidade de Vigo).
- Muofhe, T. P., Chikoore, H., Bopape, M. J. M., Nethengwe, N. S., Ndarana, T., & Rambuwani, G. T. (2020). Forecasting intense cut-off lows in South Africa using the 4.4 km Unified Model. *Climate*, 8(11), 129.
- Nieto, R., Gimeno, L., de La Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., ... & Lorente, J. (2005). Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *Journal of climate*, 18(16), 3085-3103.

- Nieto, R., Sprenger, M., Wernli, H., Trigo, R. M., & Gimeno, L. (2008). Identification and climatology of cut-off lows near the tropopause. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 256-290.
- Nieto, R., Gimeno, L., De la Torre, L., Ribera, P., Barriopedro, D., García-Herrera, R., ... & Lorente, J. (2007). Interannual variability of cut-off low systems over the European sector: The role of blocking and the Northern Hemisphere circulation modes. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96, 85-101.
- Olcina, J. (2020). Clima, cambio climático y riesgos climáticos en el litoral mediterráneo. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 66(1), 159-182.
- Oltmans, S. J., Levy, H., Harris, J. M., Merrill, J. T., Moody, J. L., Lathrop, J. A., ... & Johnson, B. J. (1996). Summer and spring ozone profiles over the North Atlantic from ozonesonde measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D22), 29179-29200.
- Palmén, E. (1949). Origin and Structure of High-Level Cyclones South of the: Maximum Westerlies. *Tellus*, 1(1), 22-31.
- Palmén, E., & Newton, C. W. (1969). *Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation*. Academic press.
- Pastor, F., Valiente, J. A., & Khodayar, S. (2020). A warming Mediterranean: 38 years of increasing sea surface temperature. *Remote sensing*, 12(17), 2687.
- Pinheiro, H., Gan, M., & Hodges, K. (2021). Structure and evolution of intense austral cut-off lows. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(734), 1-20.
- Porcù, F., Caracciolo, C., & Prodi, F. (2003). Cloud systems leading to flood events in Europe: an overview and classification. *Meteorological Applications*, 10(3), 217-227.
- Porcù, F., Carrassi, A., Medaglia, C. M., Prodi, F., & Mugnai, A. (2007). A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 96, 121-140.
- Portmann, R., Sprenger, M., & Wernli, H. (2020). The three-dimensional life cycle of potential vorticity cutoffs: A global ERA-interim climatology (1979–2017). *Weather and Climate Dynamics Discussions*, 2020, 1-52.
- Price, J. D. (1992). Statistical studies of cut-off-low systems. *Annal. Geophys.*, 10, 96-102.

- Price, J. D., & Vaughan, G. (1993). The potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off-low systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 119(510), 343-365.
- Shapiro, M. A., Hampel, T., & Krueger, A. J. (1987). The Arctic tropopause fold. *Monthly Weather Review*, 115(2), 444-454.
- Stevenson, D. S., Dentener, F. J., Schultz, M. G., Ellingsen, K., Van Noije, T. P. C., Wild, O., ... & Szopa, S. (2006). Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D8).
- Thépaut, J. N., Dee, D., Engelen, R., & Pinty, B. (2018, July). The Copernicus programme and its climate change service. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1591-1593). IEEE.
- Thorncroft, C. D., Hoskins, B. J., & McIntyre, M. E. (1993). Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 119(509), 17-55.
- Tripoli, G. J., Medaglia, C. M., Dietrich, S., Mugnai, A., Panegrossi, G., Pinori, S., & Smith, E. A. (2005). The 9–10 November 2001 Algerian flood: A numerical study. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(9), 1229-1235.
- Vaughan, G., & Price, J. D. (1989). Ozone transport into the troposphere in a cut-off low event. *Ozone in the Atmosphere*, 415.
- Winkler, R., & Zwatz-Meise, V. (2001). *Manual of synoptic satellite meteorology. Conceptual models*, Vers, 6.
- Wirth, V. (1995). Diabatic heating in an axisymmetric cut-off cyclone and related stratosphere-troposphere exchange. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121(521), 127-147.
- Wirth, V., & Egger, J. (1999). Diagnosing extratropical synoptic-scale stratosphere-troposphere exchange: A case study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(554), 635-655.

Páginas web consultadas

Xornal “El Mundo”:

- https://www.eldiario.es/castilla-la-mancha/mes-despues-dana-inundo-toledo-hay-replantea-vida-nuevo_1_8351066.html

Medio dixital “elDiario.es”:

- https://www.eldiario.es/castilla-la-mancha/fuertes-tormentas-colapsan-provincia-toledo-riadas-coches-atascados-vias-inundadas-cortadas_1_8264280.html

- https://www.eldiario.es/castilla-la-mancha/mes-despues-dana-inundo-toledo-hay-replantea-vida-nuevo_1_8351066.html

Medio dixital “Diario Público”:

- <https://www.publico.es/directos/tormentas-espana-dana-ultima-hora-lluvias-espana-directo.html>

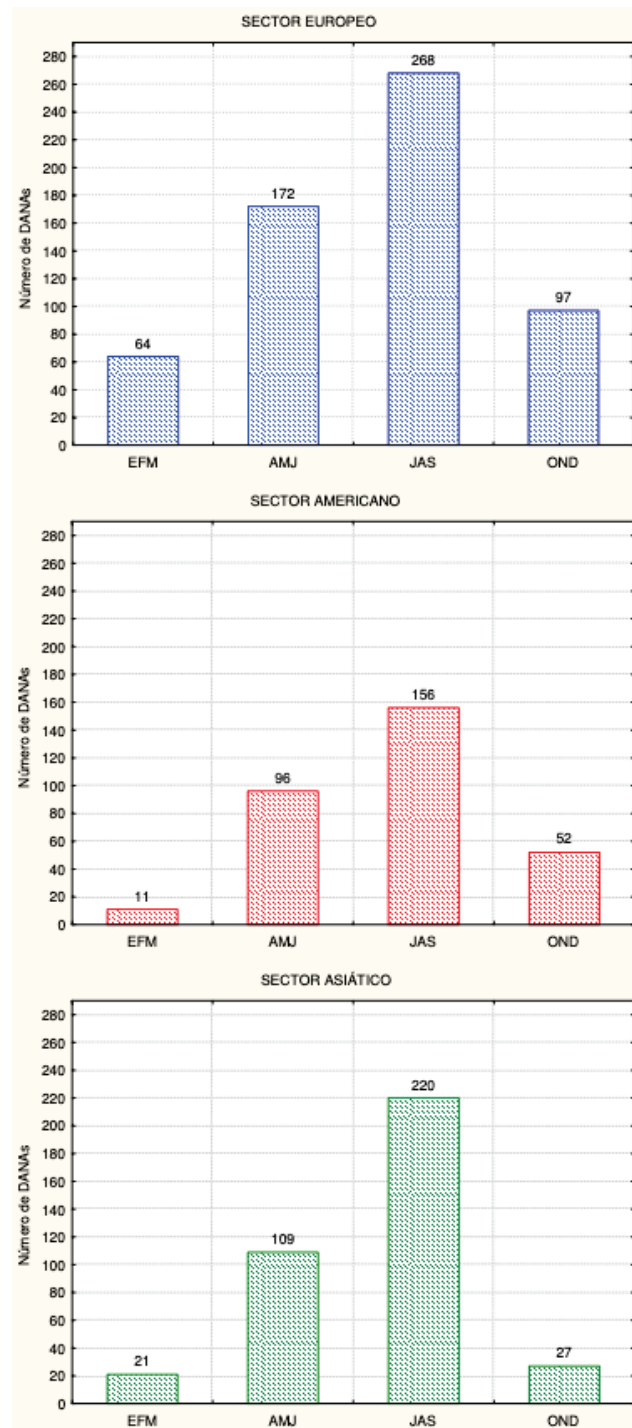
Datos horarios ERA5 en niveis de presión desde 1940 ata o presente:

<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>

Datos horarios ERA5 en niveis únicos desde 1940 ata o presente:

<https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>

Anexos.



*Figura A1. Distribución estacional nos 3 sectores de maior ocorrencia de DANAs.
Fonte: Muñiz, 2005*

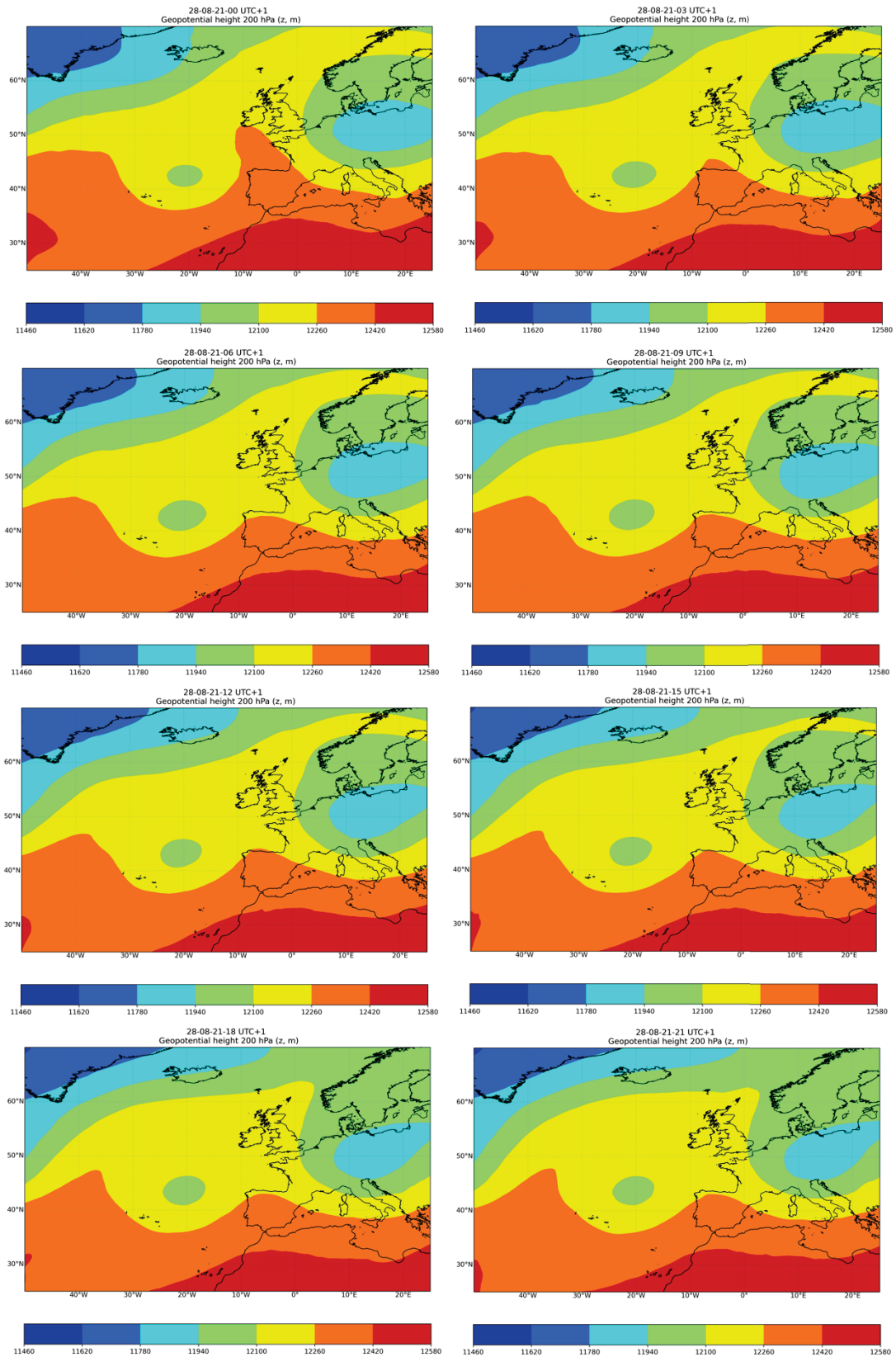


Figura A2. Altura xeopotencial en 200 hPa durante o 28 de agosto de 2021.

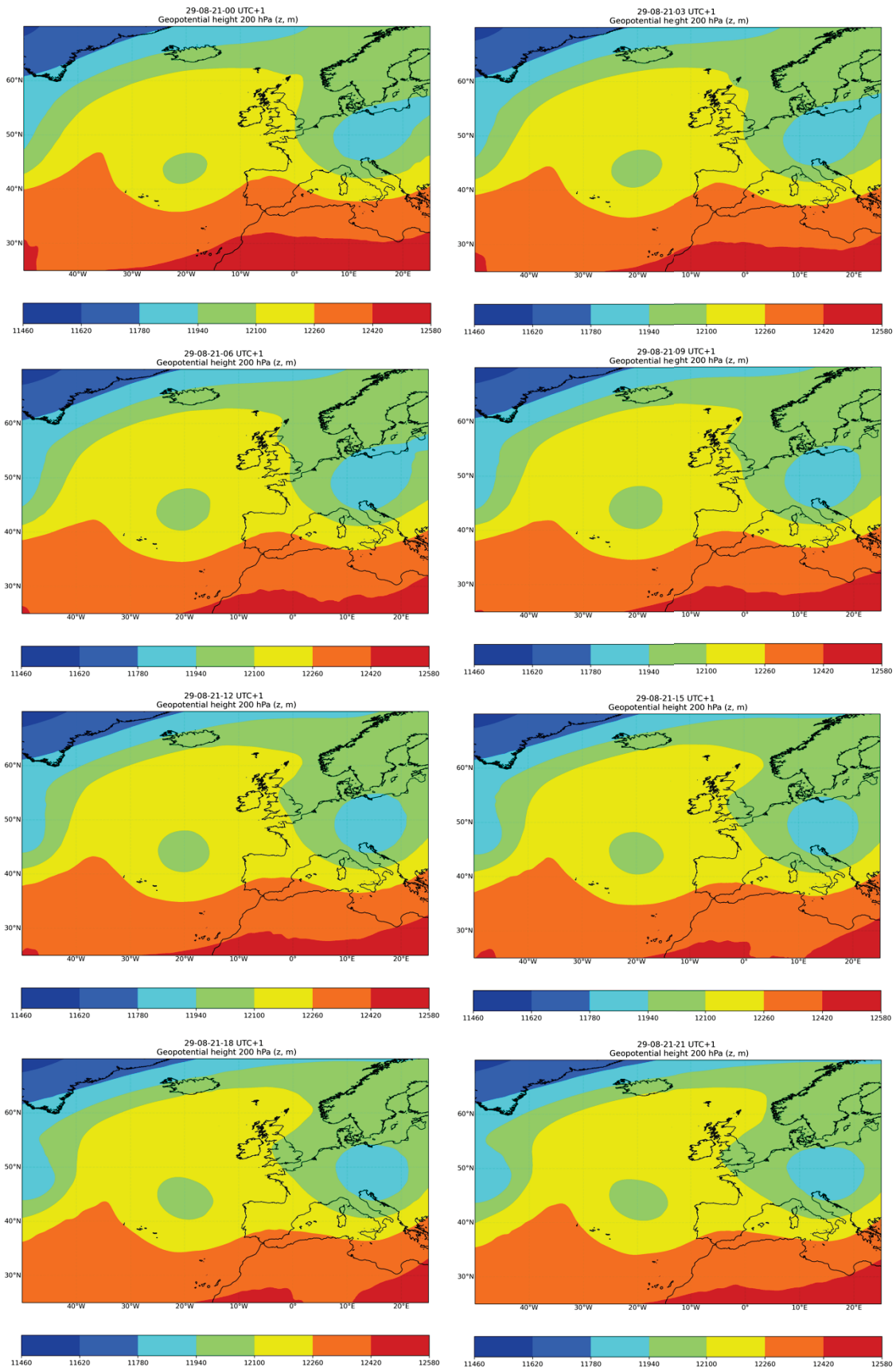


Figura A3. Altura xeopotencial en 200 hPa durante o 29 de agosto de 2021.

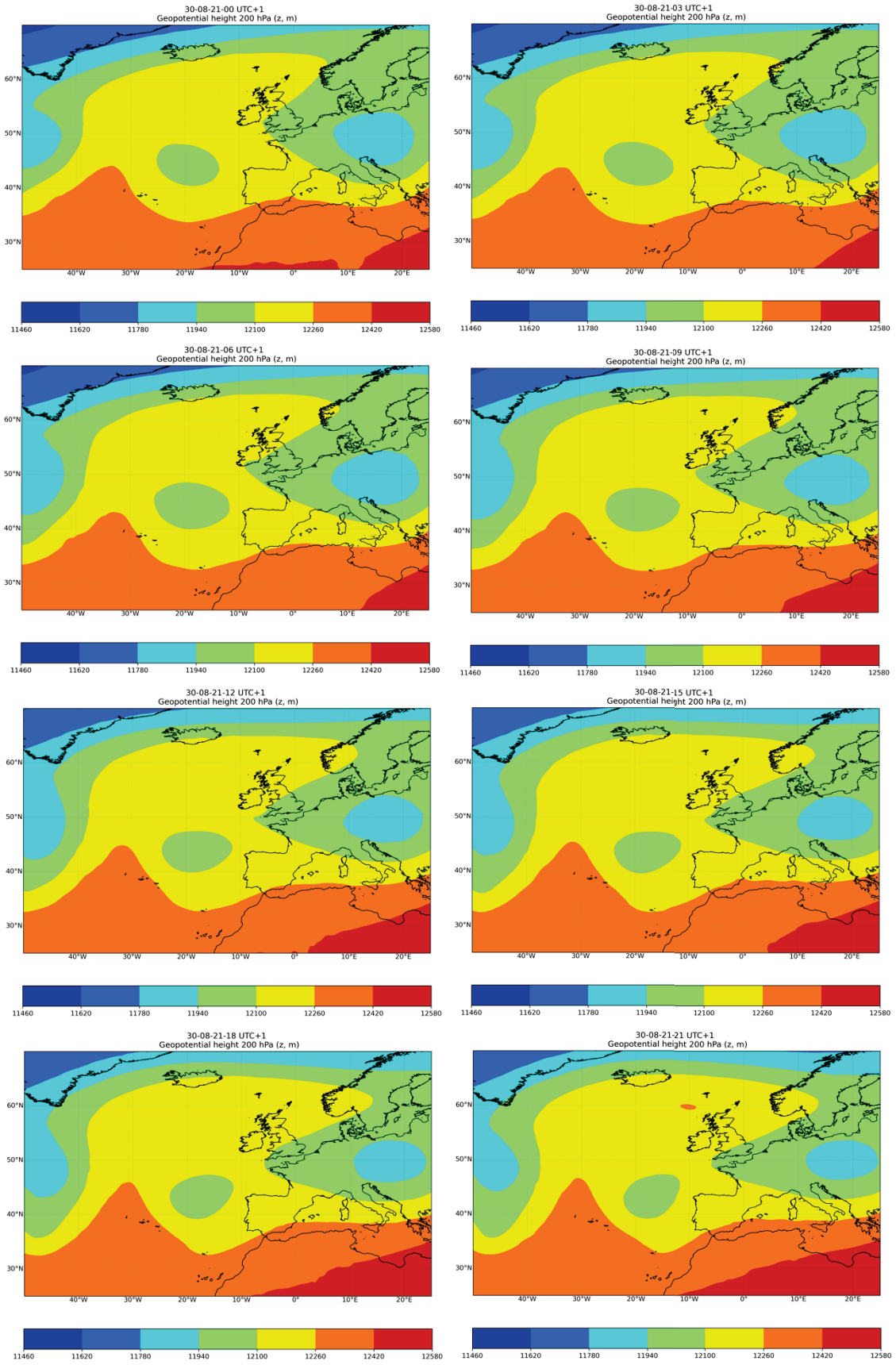


Figura A4. Altura xeopotencial en 200 hPa durante o 30 de agosto de 2021.

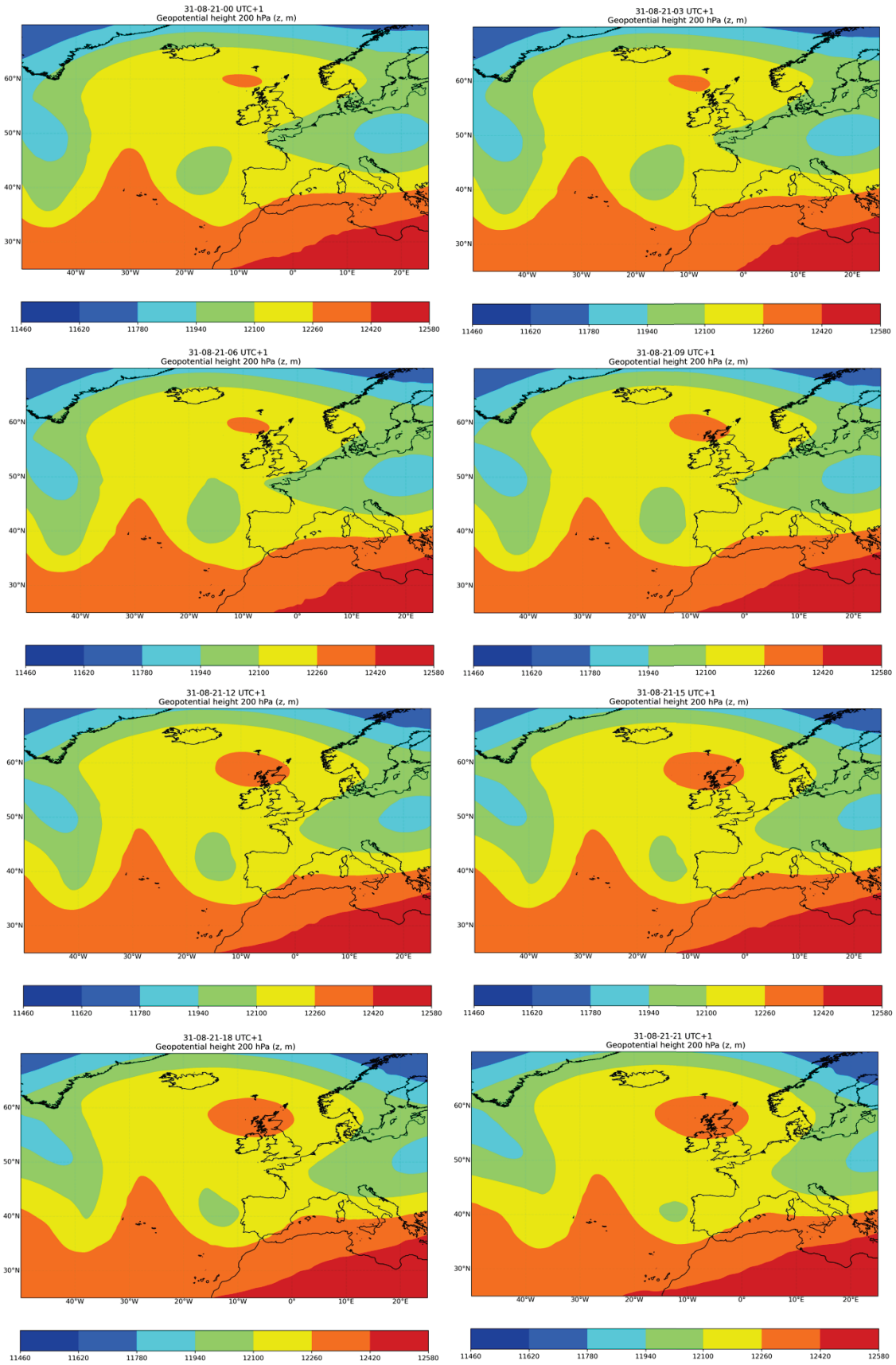


Figura A5. Altura xeopotencial en 200 hPa durante o 31 de agosto de 2021.

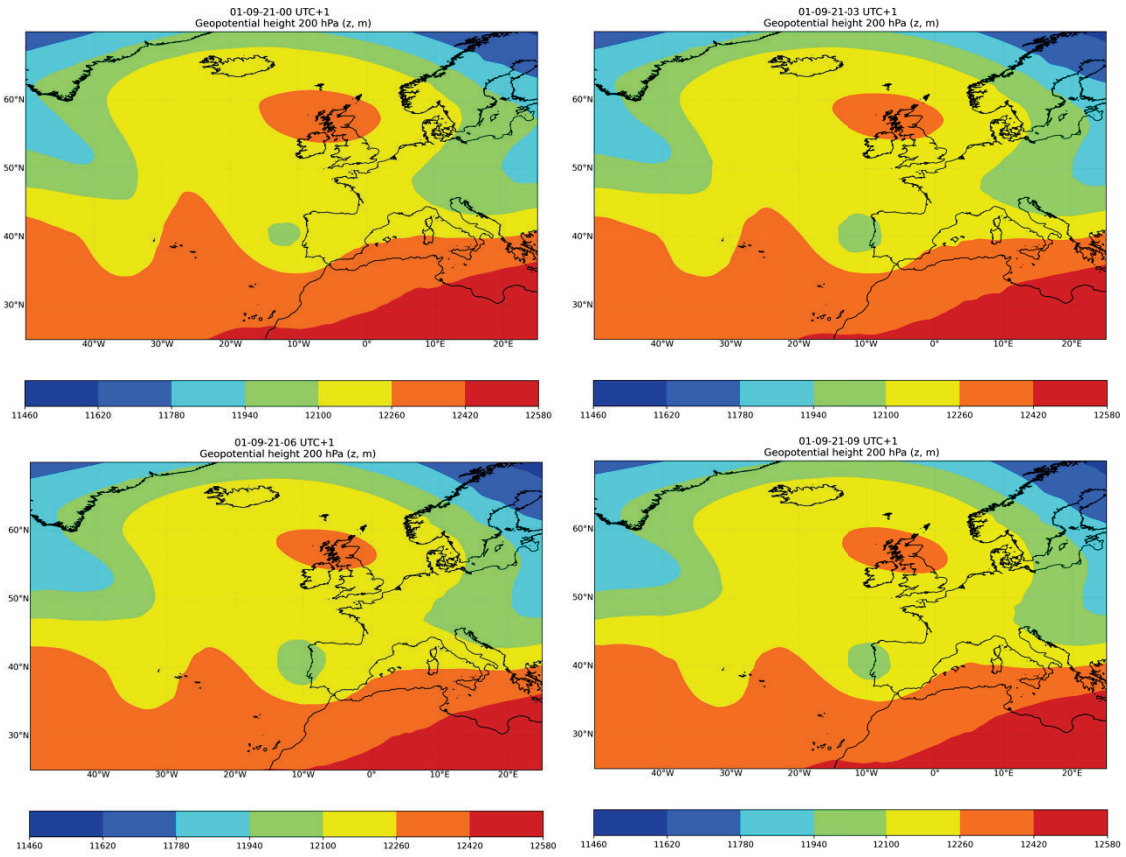


Figura A6. Altura xeopotencial en 200 hPa durante o 1 de setembro de 2021.