

**UNIVERSIDAD FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIENCIAS NATURALES Y  
EXACTAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUACIÓN  
EN METEOROLOGÍA**

Natali Stephanie Bentancor Silva

**APLICACIONES PARA LA PREVISION DE TIEMPO SEVERO EN EL  
ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO-URUGUAY.**

Santa Maria, RS

2023

**Natali Stephanie Bentancor Silva**

**APLICACIONES PARA LA PREVISION DE TIEMPO SEVERO EN EL AREA  
METROPOLITANA DE MONTEVIDEO-URUGUAY**

Trabajo de Disertación presentado al Programa de Pos-Graduación en Meteorología, de la Universidad Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtener el título de Maestría en Meteorología

Orientador: Prof. Dr. Vagner Anabor

Santa Maria, RS

2023

**Natali Stephanie Bentancor Silva**

**APLICACIONES PARA LA PREVISION DE TIEMPO SEVERO EN EL AREA  
METROPOLITANA DE MONTEVIDEO-URUGUAY**

Trabajo de Disertación presentado al Programa de Pos-Graduación en Meteorología, de la Universidad Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtener el título de Maestría en Meteorología

**Aprovado el 7 de noviembre de 2023.**

---

**Vagner Anabor, Dr. (UFSM)**

---

**Everson Dal Piva, Dr. (UFSM)**

---

**Lucia Chipponelli, Dra. (INUMET)**

---

**Gustavo Rasera, Dr. (UFPEL)**

---

**Vanessa Ferreira, Dra. (UFSM)**

Santa Maria, RS

2023

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional, en especial a mi hijo Mateo y mi compañero Joaquín. También tengo un especial agradecimiento a mi tutor que a pesar de la distancia logró brindarme el apoyo necesario para llegar a esta etapa y a Gustavo Rasera por los aportes para poder evaluar el desempeño del índice desarrollado por él. Agradezco a Leonardo por haber sido de gran ayuda en este proceso final, Claudia Martínez y María Vera por sus contribuciones, Lucía y Vanessa por el apoyo incondicional. Agradezco también a todas aquellas personas que creyeron y contribuyeron para que esto fuera posible.

“El tiempo es la sustancia de la que estoy hecho.  
El tiempo es un río que me lleva, pero yo soy el  
río; es un tigre que me devora, pero yo soy el  
tigre; es un fuego que me consume, pero yo soy el  
fuego.”

(Jorge Luis Borges)

## RESUMEN

### APLICACIONES PARA LA PREVISION DE TIEMPO SEVERO EN EL AREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO URUGUAY

AUTORA: Natali Stephanie Bentancor Silva

TUTOR: Vagner Anabor

Este trabajo presenta la investigación de algunos eventos meteorológicos extremos generados por Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) en el Área Metropolitana de Montevideo, Uruguay, con foco en el Aeropuerto Internacional Gral. Cesáreo L. Berisso, código de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) SUMU, en adelante Aeropuerto MVD, durante el período 2015-2020, incluyéndose un evento extremo del año 2022. Como primera parte, se realizó una exploración de las observaciones meteorológicas convencionales de la Estación Meteorológica del Aeropuerto MVD, perteneciente al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) como fuente inicial de información sobre tormentas con el fin de identificar durante el periodo seleccionado la estacionalidad, anualidad y ciclo horario de las mismas. Posteriormente se seleccionaron dos de los eventos meteorológicos más extremos durante los años 2015-2020 que tuvieron afectación en la operativa del Aeropuerto MVD, incluyendo un evento del año 2022. Con información de las imágenes procesadas del banco de archivo del Centro de Previsión del Tiempo y estudios Climáticos del Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (CPTEC/INPE), y con la metodología adoptada por Anabor (2008) para la caracterización de SCM mediante imágenes de satélite, se identificó que los tres eventos meteorológicos cumplieron los criterios de SCM; posteriormente con los datos de NCEP Climate Forecast System CFSv2 (Saha, 2014) se evaluaron los campos sinópticos de los SCM, incluyendo un breve análisis de los Ríos Atmosféricos. Con los mismos datos se realizó una evaluación de los resultados del comportamiento del SA-MCS Index, desarrollado por Rasera (2017), con el fin de ser utilizado como herramienta operacional para los pronósticos vinculados a la navegación aérea del Aeropuerto MVD; dentro de los principales se encuentran el Pronóstico de Terminal Aérea (TAF), Información Meteorológica Significativa (SIGMET) y Avisos para los Aeródromos (AD WRNG). Los resultados mostraron un óptimo desempeño del SA-MCS Index para los tres casos seleccionados que tuvieron afectación en el sur de Uruguay, incluyendo el Área Metropolitana de Montevideo y el Aeropuerto MVD. En todos los eventos el valor encontrado del SA-MCS Index fue superior a -1.40, siendo este límite el óptimo encontrado por Rasera (2017) para la identificación de la convección organizada. Otro resultado a considerar es que en los tres casos de SCM los valores del SA-MCS Index fueron superiores a 1.58, y en los tres eventos considerados en este análisis se obtuvieron reportes de precipitaciones extremas, granizo, rachas de vientos, y particularmente en uno de ellos provocó inundación repentina. Por lo cual se puede realizar una identificación de ambientes favorables para SCM utilizando el SA-MCS Index atribuyendo grados de probabilidad basados en el umbral mínimo detectado por Rasera (2017). Teniendo presente que, en los casos analizados, con valores superiores a 1.58 fueron evidenciados SCM.

**Palabras clave:** SCM. SA-MCS Index. Aeropuerto MVD. SUMU. Meteorología Aeronáutica.

## RESUMO

### APLICAÇÕES PARA A PREVISÃO DE TEMPO SEVERO NA ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEU URUGUAI

AUTORA: Natali Stephanie Bentancor Silva

ORIENTADOR: Vagner Anabor

Este artigo apresenta a investigação de alguns eventos meteorológicos extremos gerados por Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) na Área Metropolitana de Montevideú, Uruguai, com foco no Aeroporto Internacional Gral. Cesáreo L. Berisso, código SUMU da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), doravante denominado Aeroporto MVD, durante o período de 2015-2020, incluindo um evento extremo no ano de 2022. Em uma primeira parte, foi realizada uma exploração das observações meteorológicas convencionais da Estação Meteorológica do Aeroporto MVD, pertencente ao Instituto Uruguaio de Meteorologia (INUMET), como fonte inicial de informações sobre tempestades, a fim de identificar a sazonalidade, a anualidade e o ciclo horário das tempestades durante o período selecionado. Posteriormente, foram selecionados dois dos eventos meteorológicos mais extremos durante os anos de 2015 a 2020 que afetaram as operações do Aeroporto MVD, incluindo um do ano de 2022. Com informações de imagens processadas do banco de arquivos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), e usando a metodologia adotada por Anabor (2008) para a caracterização de SCM usando imagens de satélite, os três eventos meteorológicos foram identificados como atendendo aos critérios para SCM. Posteriormente, com os dados do NCEP Climate Forecast System CFSv2 (Saha, 2014), os campos sinóticos do SCM foram avaliados, incluindo uma breve análise dos Rios Atmosféricos. Com os mesmos dados, foi realizada uma avaliação dos resultados de desempenho do SA-MCS Index, desenvolvido por Rasera (2017), para ser utilizado como ferramenta operacional para previsões ligadas à navegação aérea no Aeroporto de MVD; entre as principais estão a Previsão de Terminal Aéreo (TAF), Informações Meteorológicas Significativas (SIGMET) e Avisos de Aeródromo (AD WRNG). Os resultados mostraram um ótimo desempenho do SA-MCS Index para os três casos selecionados que afetaram o sul do Uruguai, incluindo a Área Metropolitana de Montevideú e o Aeroporto MVD. Em todos os eventos, o valor do SA-MCS Index encontrado foi superior a -1,40, sendo esse limite o ótimo encontrado por Rasera (2017) para a identificação de convecção organizada. Outro resultado a ser considerado é que nos três casos de SCM os valores do SA-MCS Index foram superiores a 1,58 e, nos três eventos considerados em esta análise, houve relatos de precipitação extrema, granizo, rajadas de vento e, particularmente em um dos eventos, inundações repentinas. Portanto, é possível identificar ambientes favoráveis ao SCM usando o SA-MCS Index e tendo em mente que nos casos analisados com valores superiores a 1,58 o SCM foi evidenciado.

**Palavras chave:** SCM. SA-MSC Index. Aeroporto MVD. SUMU. Meteorologia Aeronáutica.

## ABREVIATURAS

AD WRNG	Avisos de Aeródromo
CCM	Complejos Convectivos de Mesoescala
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.
ENSO	El Niño Southern Oscillation
FIR	Región de Información de Vuelo
INUMET	Instituto Uruguayo de Meteorología
LLJ	Low Level Jet
MVD	Código IATA (International Air Transport Association) para el Aeropuerto Internacional Gral. Cesáreo Berisso
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OMA	Oficina Meteorológica de Aeródromo
OVM	Oficina de Vigilancia Meteorológica
PECS	Sistemas Convectivos Persistentes Alargados
SALLJ	South American Low Level Jet
SESA	Sudeste de América del Sur
SINAE	Sistema Nacional de Emergencias
SCM	Sistemas Convectivos de Mesoescala
SUMU	Código OACI de la Estación Meteorológica de Carrasco del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET)
TAF	Terminal Aeródrome Forecast (Pronostico de Terminal Aérea)
SIGMET	Aviso para fenómenos meteorológicos en ruta

## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>2. REVISION BIBLOGRÁFICA</b> .....	17
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	21
<b>3.1 SELECCIÓN DE DATOS Y DE LA ESTACION SUMU</b> .....	24
<b>3.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE DATOS OBSERVACIONALES</b> .....	24
<b>3.3 CRITERIOS PARA LA DETERMINACION DE LOS EVENTOS DE TORMENTAS SIGNIFICATIVAS EN SUMU</b> .....	25
<b>3.4 SELECCIÓN DE LOS EVENTOS</b> .....	25
<b>4. RESULTADOS</b> .....	27
<b>4.1 ANUALIDAD DE LAS TORMENTAS CON LLUVIA EN SUMU DURANTE EL PERIODO</b> .....	27
<b>4.2 ESTACIONALIDAD Y CICLO HORARIO DE LAS OBSERVACIONES CON TORMENTA EN SUMU</b> .....	28
<b>4.3 EVENTOS EXTREMOS DETECTADOS EN SUMU DURANTE EL PERIODO 2015-2020</b> .....	29
<b>4.4 ANALISIS Y RESULTADOS DE LOS CASOS SELECCIONADOS</b> .....	30
<b>4.4.1 ANALISIS DE IMÁGENES SATELITALES CASO 1</b> .....	31
<b>4.4.2 PATRONES SINOPTICOS PARA EL CASO 1</b> .....	34
<b>4.4.3 ANALISIS DE IMÁGENES SATELITALES CASO 2</b> .....	43
<b>4.4.4 PATRONES SINOPTICOS DEL CASO 2</b> .....	45
<b>4.4.6 PATRONES SINOPTICOS DEL CASO 3</b> .....	56
<b>4.4.7 DESEMPEÑO DEL SA-MCS Index</b> .....	63
<b>5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS</b> .....	68
<b>6. CONCLUSIÓN</b> .....	69
<b>7. RECOMENDACIONES</b> .....	70

<b>ANEXO – DATOS Y FIGURAS ADICIONALES</b> .....	71
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	73

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tormentas son fenómenos meteorológicos de alto impacto para la sociedad, ya que pueden generar acumulados de precipitaciones significativos, descargas eléctricas, granizo, vientos fuertes y destructivos.

Existen diversos actores en la sociedad uruguaya que se ven afectados por estos fenómenos, como por ejemplo el Sistema Nacional de Emergencias (SINAE), la sociedad, el sector Agrícola, el sector Eléctrico, el sector Aeronáutico, entre otros.

Las tormentas severas pueden ocasionar, en estas latitudes, granizo mayor a 2,5 cm de diámetro, ráfagas de viento de más de 25 m/s, ocasionalmente tornados. Estos eventos han sido documentados en varias regiones del planeta, siendo responsables de grandes pérdidas de vidas humanas y económicas que, en ocasiones, exceden los 10 billones de dólares por año (Allen, 2018). Más específicamente en el sector aeronáutico uno de los fenómenos atmosféricos que afecta mayormente las aeronaves en vuelo y a las instalaciones de los aeropuertos son “las tormentas eléctricas”, por su impacto económico que generan los prolongados cierres (Abbas; Ojo; Igbru, 2012).

Sierra (2009) indica en su trabajo que las tormentas eléctricas limitan las operaciones y/o pueden generar el cierre de un aeropuerto, ya que se prioriza el salvaguardar las vidas humanas y también el patrimonio físico de las empresas explotadoras de los servicios para la navegación aérea. Por ello, el Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea a través de las OVM y OMA, deben disponer de información de diagnóstico y pronóstico meteorológico eficaz, de tal manera que optimice la toma de decisiones.

En cuanto a los reportes de accidentes e incidentes aéreos como consecuencia de tormentas estos comenzaron a documentarse desde el aumento en el tráfico mundial aéreo a partir del año 1940 (Fujita, 1981); como el caso del accidente del 24 de junio de 1975, donde un avión de pasajeros de Eastern Airlines partió de Nueva Orleans, Louisiana, con destino Nueva York cayó a tierra en la localidad de Jaimaica, Nueva York. De los 124 pasajeros solamente 12 sobrevivieron. Fujita (1990) en su trabajo “The Application of Weather Radar To Aviation Meteorology” relata que el vuelo fue rutinario hasta que ingresó al espacio aéreo de aproximación inmediata cerca del Aeropuerto Internacional Jhon K. Kennedy (JFK), donde la aeronave encontró lo que más tarde se denominó una Microburst, que sometió a la aeronave a una fuerte corriente descendente y un fuerte viento de cola justo antes del aterrizaje previsto.

Esto resultó en un descenso rápido del avión hacia las luces de aproximación en la pista 22, a la izquierda en JFK. Antes del accidente, poco se sabía sobre la cizalladura del viento de las tormentas convectivas. Fujita (1977) publicó un informe 15 meses después del accidente detallando la existencia de las Microburst.

En la actualidad, los posibles accidentes o incidentes aeronáuticos que pueden ocurrir, se clasifican según la etapa de vuelo en la que se encuentra la aeronave. En la Figura 1.1, se muestra la estadística de distribución de los accidentes entre 2012 y 2021. Los resultados son calculados en base a un vuelo de 1,5 horas de duración donde se destaca que el mayor porcentaje de accidentes ocurren en la aproximación final y aterrizaje, junto con el despegue (Boeing, 2021).

Figura.1.1 Porcentaje de accidentes según la etapa del vuelo durante el período 2012-2021



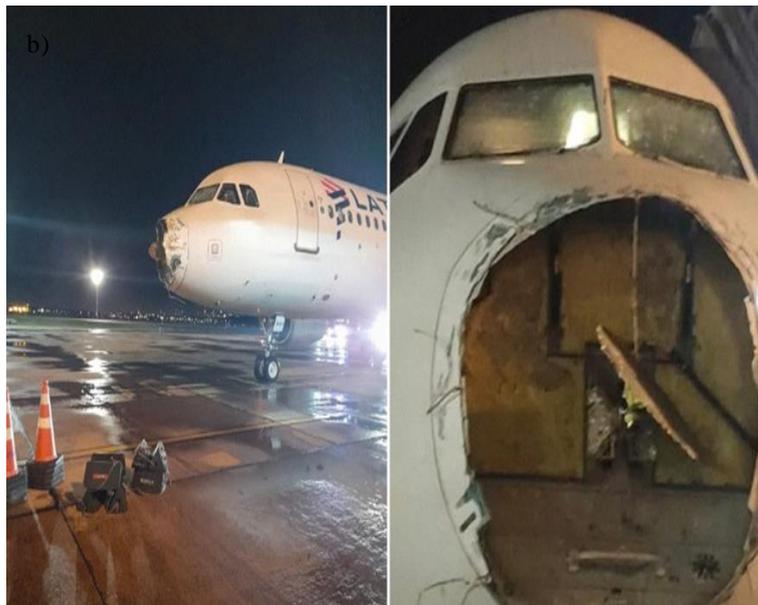
Fuente: (Boeing, 2021)

En los últimos años, se han constatado algunos incidentes en aeronaves en ruta (a nivel crucero) en América del Sur como consecuencia de atravesar zonas de fuertes tormentas, esto ha provocado daños en las aeronaves y en las personas dentro de ella (Figuras 1.2 a y b). Estos eventos, no solamente afectan a la tripulación y pasajeros en vuelo, sino también en los aeropuertos y sus inmediaciones. Tal es el caso del evento meteorológico extremo ocurrido el 17 de enero del 2022, que provocó precipitaciones copiosas con valores que alcanzaron en menos de una hora los 92 mm en SUMU, y que tuvieron como consecuencia inundaciones repentinas en la zona del Aeropuerto MVD (Figuras 1.3 a y b), así como también en otras zonas del Área Metropolitana de Montevideo, Uruguay.

Figura 1.2 (a) Daños provocados por granizo severo el 31/10/2018. Planificación del vuelo SBGR (Guarulhos, Brasil) SCEL (Santiago de Chile); (b) Daños provocados por tormenta severa el 27/10/2022. Planificación del vuelo SCEL -SGAS (Asunción, Paraguay)



Fuente: (Prensa)



Fuente: (Prensa)

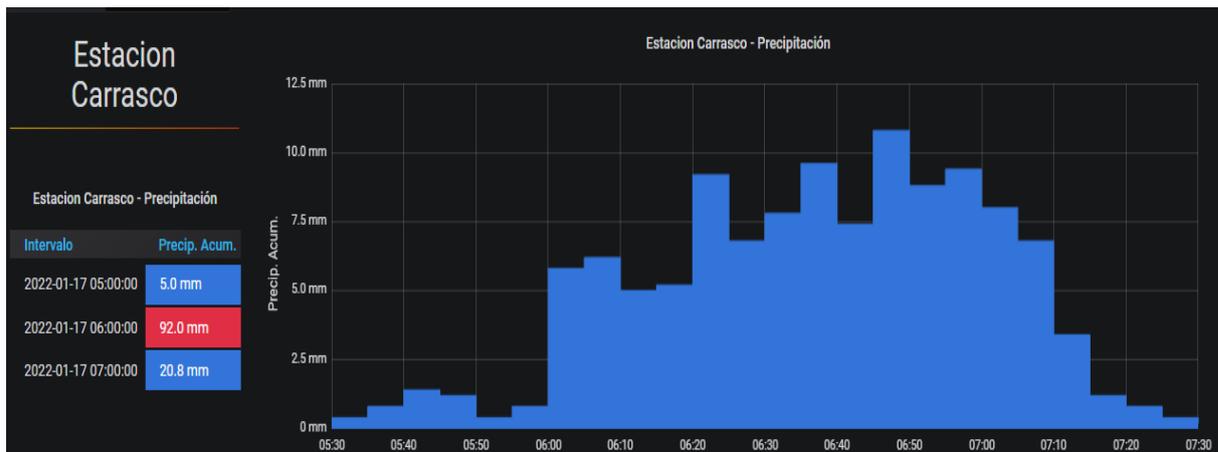
Figura 1.3 Inundación repentina en el Aeropuerto MVD como causa de la tormenta del 17 de enero de 2022.



a)

Fuente: (Prensa)

b) Datos del telepluviómetro ubicado en SUMU. Datos en hora local.



Fuente: (Telepluviómetro Estación SUMU-INUMET)

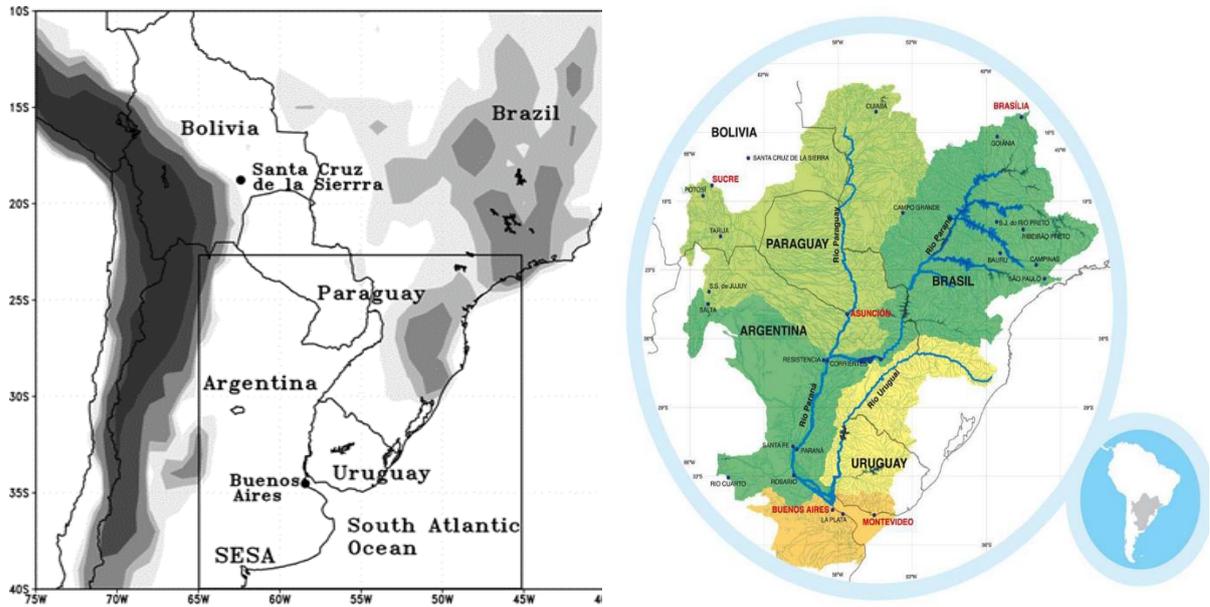
Los datos de las observaciones horarias de tormentas de la red de estaciones meteorológicas convencionales, principalmente las que provocaron algún tipo de tiempo significativo son una fuente de información de utilidad; dado que INUMET cuenta con una base de datos robusta de este tipo de observaciones, y pueden ser utilizados como base para comprender el comportamiento de los sistemas de las tormentas en el sur de Uruguay, como posible fuente de información para mejorar los pronósticos y los avisos para la navegación aérea. Más aún, teniendo en cuenta que el transporte, en general, es afectado por las condiciones del tiempo y eventos severos, y que el cambio climático muestra una tendencia al incremento de estos eventos en lo que refiere a parámetros, frecuencia e intensidad (Gössling y otros, 2023).

Una de las desventajas que tienen las OVM y OMA, y Uruguay, es la falta de un radar meteorológico que dificulta la tarea rutinaria de los pronosticadores al momento de identificar el potencial desarrollo de tiempo severo, más allá de un posible conocimiento del ambiente pre-convectivo, para emitir pronósticos y avisos con mayor eficacia; en este sentido, un estudio de las tormentas que provocan tiempo severo es necesario como fuente inicial de información. Por lo anterior expuesto, **esta investigación tiene los siguientes objetivos:**

- Analizar las condiciones sinópticas y presentar los resultados del SA-MCS Index desarrollado por Rasera (2017) con el fin de ser utilizado y validado como herramienta operacional para los pronósticos TAF, AD WRNG y SIGMET para el Aeropuerto MVD y la FIR Montevideo
- Identificar, ciclos horarios, estacionalidad y anualidad de tormentas en la Estación SUMU durante el período 2015-2020, con el fin de evaluar el comportamiento de las mismas en el Aeropuerto MVD.

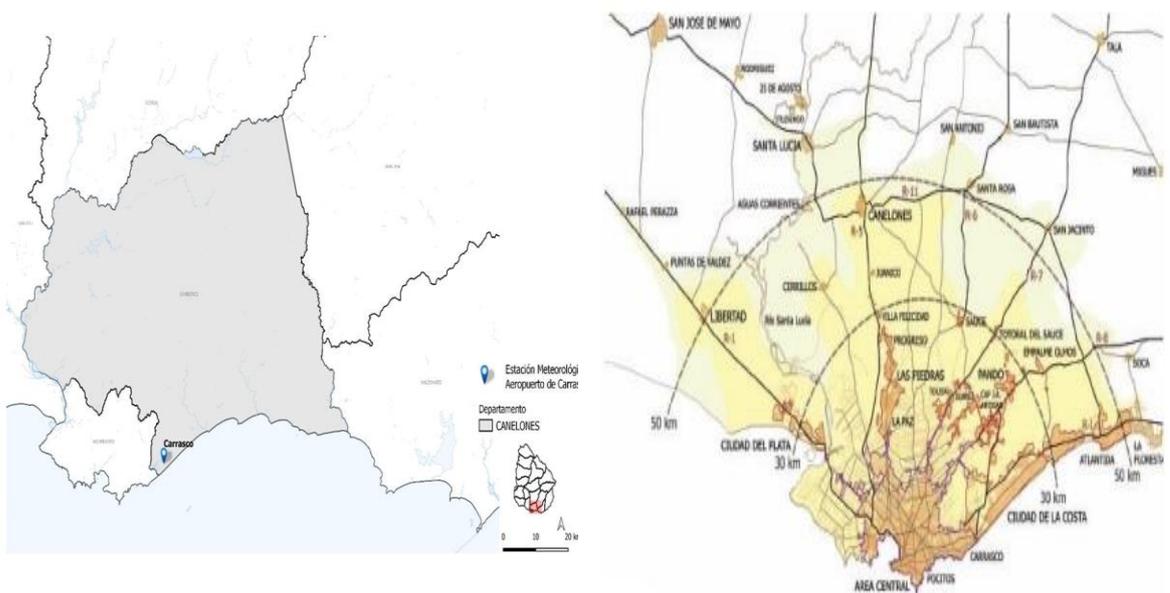
Una aclaración importante es que si bien para un análisis climatológico la densidad de información, tanto espacial como temporal debe ser mayor, con los datos obtenidos de la estación SUMU (un punto en Uruguay, ver Fig. 1.4, 1.5), a los efectos de detectar los eventos de tormentas que generaron algún tipo de tiempo severo en el Aeropuerto MVD, y desde el punto de vista aeronáutico, la información de 5 años es suficiente (OMM N° 49, 2021), no buscando ser este trabajo un análisis climatológico.

Figura. 1.4 Mapa de SESA (izq) y Mapa de la Cuenca del Plata (der)



Fuente:( Monthly Weather Review 135, 4; 10.1175/MWR3305.1; <https://cicplata.org/es/> (der))

Figura 1.5 Mapa de Uruguay con la ubicación de la estación SUMU- 34°S 56°W (izq) y Mapa del Área Metropolitana de Montevideo, Uruguay (der).



Fuente: (Elaboración propia (izq), Sorondo, 2014)

## 2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

La región de la Cuenca del Plata en América del Sur es bien conocida por la formación de SCM, los cuales contribuyen con más del 90% de las precipitaciones en la estación cálida (Rasmussen et. al. 2016). Las características de estos sistemas de tormentas son distintas y difieren de si se forman en zonas oceánicas, en áreas terrestres sub-tropicales, en áreas terrestres de latitudes medias en la cual los SCM tienden a ser más intensos con precipitaciones que provienen de un número menor de SCM de gran tamaño (Liu; Zipser, 2015). Pero el estudio de estos conglomerados nubosos data de varios años ya que existe extensa bibliografía académica, por ejemplo en Estados Unidos, han documentado la importancia los grandes sistemas de tormentas, principalmente por el hecho de que son causantes de altas tasas de precipitaciones, así como también de otras condiciones de tiempo severo, principalmente en los meses de primavera y verano (Fritsch; Kane; Chelius, 1986; Heidman; Fritsch, 1988; Maddox; Rodgers; Howard, 1982; Wetzel; Cotton; McAnelly, 1983; Rodgers; Magnano; Arns, 1985).

Los primeros resultados, luego de investigar varios sistemas de tormentas organizadas, fueron los analizados por Maddox (1980) en Estados Unidos, caracterizando a los CCM, que son una sub-clasificación de los SCM, con criterios de:

- área principal de 100.000 km<sup>2</sup> con temperatura de topes nubosos inferior a -32°C
- área interna de 50.000 km<sup>2</sup> con temperatura de topes nubosos inferior a -52°C
- excentricidad mayor a 0,7 en el momento de máxima extensión y tiempo de vida superior a 6 horas.

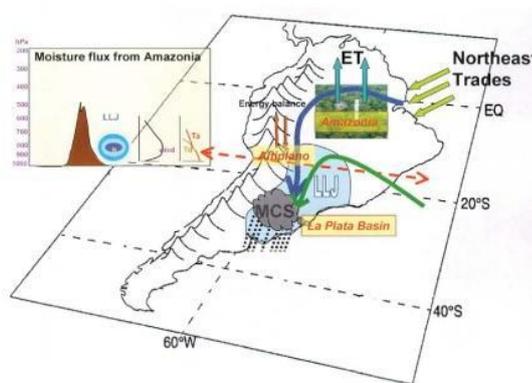
Los sistemas de tormentas severas, y en especial las generados por SCM, también son documentados en la región SESA (Velasco; Fritsch, 1987, Altinger, 1988; Torres, 2003; entre otros). Los análisis realizados por Velasco y Fritsch (1987) determinaron que los SCM son predominantemente nocturnos y continentales, y fueron los primeros en relacionar la vinculación entre el LLJ y la formación de SCM para esta región.

Estudios posteriores han identificado el rol que juega el SALLJ en la precipitación y convección generada en la región de salida del SALLJ en SESA (Nogues-Paegle; Mo, 1997; Seluchi; Marengo, 2000; Berbery; Collini, 2001; Mo; Paegle, 2001; Berbery; Barros, 2002; Nogués-Paegle et al., 2002; Cazes-Boezio; Robertson; Mechoso, 2003). También, se ha documentado que el efecto de la cadena montañosa de los Andes, en América del Sur, genera

un flujo dinámico, más que termodinámico; este efecto produce un flujo medio del norte y puede ser observado a lo largo del año (Byerle; Peagle 2002; Campetella; Vera 2002).

Las inundaciones y déficit de lluvias sobre la Cuenca del Plata tienen una relación (aunque no la única) con la intensidad y el posicionamiento del SALLJ. Sus dimensiones de mesoescala transversal modulan la estructura de las lluvias de verano y primavera a través de la organización de SCM en su región de salida. La cuenca del Plata es, de hecho, una de las regiones del mundo con la mayor frecuencia de este tipo de sistemas (Nesbitt; Zipser 2003), por lo que la predicción SCM tiene una gran importancia práctica (Figura. 2.1).

Figura 2.1 Modelo conceptual: Esquema representativo del transporte de humedad desde el Amazonas hacia SESA.



Fuente: (Vera et al, 2006)

Una clasificación particular de SCM son los PECS (Sistemas Convectivos Persistentes Alargados); esta sub clasificación fue estudiada primeramente en Estados Unidos por Anderson y Arriti (1998); cumplen los mismos requisitos que los Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM) establecidos por Maddox (1980) y tienen la particularidad de que se relacionan más con eventos de tiempo severo. Estos análisis de PECS determinaron que mayormente se forman embebidos en un área de nubes medias o debido a la confluencia de sistemas convectivos más pequeños comprendidos en las escalas meso- $\beta$  y meso- $\gamma$  de Orlansky (1975), esta última causa ocurrió en un 70% de los casos estudiados por Jirak y otros (2003). Porter y otros (1955), Stensrud y Fritsch (1993) registraron los SCM en serie propagándose a través de la convección explosiva en dirección sur, teniendo la particularidad de que se propagan corriente arriba del flujo en todos los niveles de la troposfera, y se desplazan a lo largo de las proximidades de los Frentes Fríos. En SESA (Sudeste de América del Sur) se han identificado y caracterizado los SCM en serie con duración temporal de más de 18 horas, principalmente en la primavera y verano de este hemisferio, comenzando a formarse sobre la región de la Cuenca del Plata; estos

sistemas inician como convección individual, generalmente desplazándose hacia el este con el flujo de niveles medios (Anabor; Stenrsrud; Moraes, 2008).

El pronóstico con anticipación de los ambientes favorables para la formación de SCM, combinado con el lograr identificar si la probabilidad de ocurrencia es alta, media o baja, es de vital importancia para la meteorología operativa, ya que permiten realizar previsiones con antelación de su posible ocurrencia. Por otra parte, si tomamos en cuenta los cambios en la interacción de la atmósfera debido a factores antropogénicos, análisis recientes muestran tendencias positivas en intensidad y frecuencia de los SCM, principalmente en el centro y este de Estados Unidos (zona donde más han sido estudiados) en la primavera 1979-2014 y en la estación cálida durante el periodo 1997-2018 (Hu; Leung; Feng, 2020). Shumacher y Rasmussen (2020) plantean que en otras regiones del planeta se han observado cambios en el comportamiento de los SCM, pero falta información debido a la limitación de datos.

En cuanto a la identificación de los ambientes para la formación de SCM, a lo largo de los años, se han desarrollado índices que intentan identificarlos con el objetivo de determinar potenciales zonas para su formación. Jirak y Cotton (2007), investigaron los ambientes precursores de varios SCM en Estados Unidos durante la estación cálida de 1996-1998, utilizando datos de reanálisis de superficie para identificar los mecanismos de inicio de cada sistema, a su vez utilizaron una metodología similar para evaluar los entornos capaces de soportar sistemas convectivos organizados y compararlos con entornos precursores de SCM; en base a la información obtenida, notaron que los SCM se inician mayormente en las zonas de límites frontales, pero que no siempre el entorno era compatible para el desarrollo y organización de la convección de larga duración, propia de los SCM. En base al análisis se detectó que la advección de aire cálido en niveles bajos, cizalladura vertical de viento en niveles bajos y la inestabilidad convectiva eran los parámetros más importantes para determinar si la convección organizada podría llegar a evolucionar en SCM. En base a los resultados encontrados en su investigación, se desarrolló un índice para la previsión de SCM (MCS-Index), el cual asigna una probabilidad de ocurrencia en base a tres términos:

- advección de temperatura en la capa atmosférica de 700 hPa
- cizalladura vertical de viento en la capa atmosférica 0-3 km
- índice Lifted.

Estos términos son en base a los resultados estadísticos realizados en el análisis de Jirak y Cotton (2007) cuando analizaron ambientes precursores de SCM. Por ejemplo, encontraron

que la variable advección de temperatura en 700 hPa es la que más favorece los ambientes precursores de SCM en su estudio, ya que esta advección indica zonas de movimientos ascendentes que son beneficiosos para la organización de las tormentas. En relación a la cizalladura en la capa 0-3 km fue seleccionada debido a su alto Heide Skill Skore (HSS) en comparación a otras capas. El mismo método de testeo fue utilizado para evaluar que el índice Lifted era el más representativo para ser empleado en el MCS-Index.

En relación a América del Sur, el trabajo realizado por Rasera (2017) analizó 117 eventos de SCM en la región Sub Tropical de América del Sur. Con la metodología utilizada por Jirak y Cotton (2007) durante el período 2005-2010, y evaluando mediante test estadísticos las variables utilizadas para el cálculo del MCS Index, realizo una adaptación del índice con las variables atmosféricas más significativas, es decir las que obtuvieron mayor HSS para la región de América del Sur, atribuyendo un valor de ocurrencia en base a los siguientes términos:

- cizalladura vertical de viento en la capa atmosférica 0-6 km (1)
- advección de temperatura en la capa atmosférica 775 hPa (2)
  - índice Lifted más inestable (hasta 1600 m) (3)
  - omega en 800 hPa (4)

La inclusión de la variable omega, fue por el hecho de que, además de ser una variable dinámica, y de haber obtenido un alto HSS para esta región, es una buena representación del disparo de la convección que ocurre próximo a la superficie, por lo que busco con esta incorporación delimitar mejor el área de iniciación de SCM.

Luego de la determinación de las variables más significativas para la de América del Sur, y del testeo y validación de las ecuaciones documentadas en Rasera (2017), la fórmula que tuvo mayor tasa de detección de SCM es la presentada en la ecuación (1), y la que será utilizada en este trabajo para la detección de SCM de los eventos seleccionados. Por otra parte, Rasera (2017) destaco también la importancia de evaluar el ambiente sinóptico y la posición del máximo de vientos de la corriente en chorro de niveles altos- jet streak.

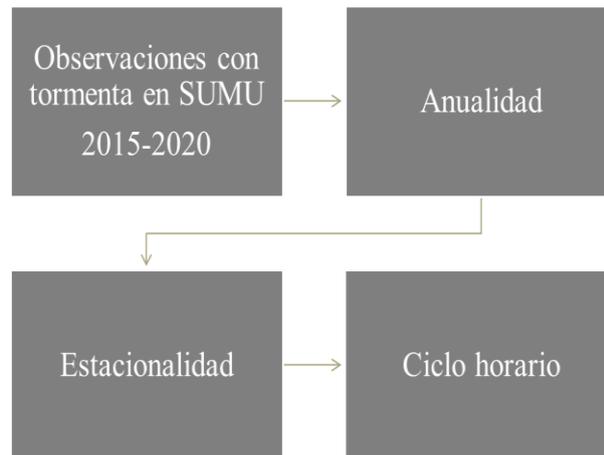
$$SA - MCS Index = \frac{[V_{6km}^{\vec{v}}] - 20,01}{7,87} + \frac{[-\vec{v} \cdot \nabla T_{775 hPa}] - 4,84 \times 10^{-5}}{5,65 \times 10^{-5}} + \frac{Ll_{inst} + 2,17}{2,23} + \frac{-\omega_{800 hPa} + 0,27}{0,29} \quad (1)$$

Dada la importancia de la identificación de SCM mediante herramientas que sean de utilidad para la meteorología operativa, la evaluación del comportamiento del SA-MCS Index, además de los campos sinópticos para la región un poco más al Sur de SESA, puede otorgar resultados interesantes para el pronóstico operativo.

### **3. METODOLOGIA**

Teniendo en cuenta que en todo Uruguay aún existe una red de estaciones meteorológicas convencionales en funcionamiento, se procederá a realizar una exploración de las observaciones horarias de la Estación SUMU de INUMET, como fuente de información sobre tormentas y sus fenómenos asociados, teniendo presente que una de las dificultades en el estudio de estos eventos es que si bien las tormentas pueden estar inmersas dentro de un SCM, los fenómenos más severos ocurren en escalas muy pequeñas y son de corta duración (escala meso- $\gamma$  de Orlansky (1975)), lo que dificulta su observación y registro por parte de un Observador Meteorológico. Los datos serán utilizados para evaluar anualidad, estacionalidad y ciclo horario de las tormentas. Un detalle que es necesario aclarar es que en este estudio no fue utilizada la información METAR (clave utilizada para los informes meteorológicos de rutina en aeródromos), debido a que las observaciones meteorológicas convencionales del aeródromo ya tienen un control de calidad cuando son incorporados a la base de datos de INUMET, no así el METAR que viaja por una red de comunicaciones externa al Servicio Meteorológico, dificultando esto el control de calidad necesario.

Figura. 3.1 Proceso de las Tareas a realizar en relación a los datos de observaciones con tormenta en la Estación SUMU.



Fuente: (Elaboración Propia)

Con la información mencionada anteriormente se compararán con los registros pluviométricos de la Estación SUMU y serán discriminados los eventos más extremos ocurridos en esta estación dado que está ubicada en el Aeropuerto MVD; esta selección de eventos extremos es determinada en base a reglamentaciones internas de INUMET. Posteriormente, se seleccionarán 2 eventos comprendidos en el período 2015-2020 y se incorporará un evento del año 2022.

Mediante imágenes satelitales de Goes-13 y Goes-16 procesadas del banco de archivo del Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), a través del sitio <http://satelite.cptec.inpe.br/satelite>, se procederá analizar e identificar los posibles SCM, utilizando la metodología de Anabor (2018) en relación a la temperatura de topes nubosos, y utilizando una herramienta gráfica será calculada el área de los posibles SCM. Posteriormente, con los datos de reanálisis del National Center for Atmospheric Research (NCEP) Climate Forecast System CFSv2 (Saha, 2014), disponibles en el catálogo de información [ncei.noaa.gov](http://ncei.noaa.gov) será evaluado el ambiente sinóptico con las informaciones de superficie, 850 hPa, 500 hPa, 250 hPa e índices de inestabilidad. También se realizará un análisis del Flujo Vertical Integrado (Q) en la capa 1000-850 hPa utilizando la metodología descrita por Salió, Saulo y Nicoloni (2002) presentada en la Ecuación 2; se realizarán los cálculos de reanálisis para cada evento del Transporte Vertical Integrado (IVT en

inglés) con la metodología utilizada por Reid y otros (2020) presentada en la Ecuación 3 dado que el cálculo del IVT es utilizado para la identificación de los Ríos Atmosféricos (AR en inglés), y varios autores indican que estos AR son canales de vapor de agua que inducen eventos de precipitación extremas e inundaciones, por lo que es interesante realizar una evaluación del comportamiento de los AR mediante el cálculo de IVT para esos casos. Para estos análisis se optó por utilizar un umbral que va desde los  $250 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , y que alcance o supere los valores de  $1000 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ; esta razón es que si bien ya hay resultados, como los encontrados por Rutz y otros (2014) en los cuales para el oeste de Estados Unidos el umbral de IVT hallado fue de  $250 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , los resultados de la metodología utilizada por Reid y otros (2020) concluyeron que el uso de umbrales bajos de IVT si bien identifica mayor cantidad de AR, no logra identificar los AR más intensos, y lo que se busca en este análisis es poder lograr una conexión entre los patrones sinópticos más comunes en estas latitudes, la relación con Q y el IVT para la identificación de potenciales SCM con altas tasas de precipitación.

Para finalizar, será evaluado el desempeño del SA-MCS Index utilizando la Ecuación 1 readaptada por Rasera (2017) para la región al Sur de los  $20^\circ\text{S}$  para los casos seleccionados, teniendo en cuenta que el umbral mínimo detectado por el autor para la identificación de convección organizada y no organizada es de -1.40; se utilizará la escala de colores verde, amarillo, naranja y rojo para la obtención de los umbrales. Esta escala es la misma que Rasera (2017) utiliza en sus cálculos para la generación de los mapas. También se analizará en el punto más cercano de grilla del Aeropuerto MVD el valor del SA-MCS Index.

$$Q = \int_{P_t}^{P_s} \frac{qV}{g} dp \quad \int \nabla \cdot Q dA = \int (Q \cdot n) dl \quad (2)$$

q: humedad específica

V: Vector viento

g: gravedad

L: curva que representa el área de estudio

n: versor normal a la curva

$$IVT = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \sum_{1000}^{3000} qu \delta p\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \sum_{1000}^{3000} qv \delta p\right)^2} \quad (3)$$

g: aceleración de la gravedad  
q: humedad específica  
 $\delta p$ : diferencia de presión cada 100 hPa

### 3.1 SELECCIÓN DE DATOS Y DE LA ESTACION SUMU

Para la obtención de los días con tormenta, fueron utilizados los datos de las observaciones meteorológicas horarias de la estación meteorológica de SUMU del INUMET durante el período 2015-2020, como información adicional se incluyó el evento del 17 de enero del 2022.

La selección de la Estación SUMU fue debido a dos causas: datos disponibles las 24 horas del día, sin interrupciones al estar ubicada en el Aeropuerto MVD; es representativa del Área Metropolitana de Montevideo, Uruguay, ver Figura 1.5.

También fueron utilizados datos del Departamento de Clima Producción y Sociedad (DCPS), del INUMET el cual cuenta con una red pluviométrica con datos de acumulado de precipitación en 24 horas.

### 3.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE DATOS OBSERVACIONALES

La codificación de tormentas fue discriminada a través de lo estipulado por el OMM N°306 (2019), de acuerdo a la documentación para codificar observaciones con tormenta se utilizan la metodología presentada en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Codificación de tormenta utilizada tomando como referencia el Manual de Claves Internacionales Vol. II, Parte A.

Código	Definición
17	Tormenta sin precipitación
95	Tormenta débil o moderada con lluvia en el momento de la observación
96	Tormenta débil o moderada con granizo en el momento de la observación
97	Tormenta fuerte sin granizo en el momento de la observación

Fuente: (OMM N°306, 2019)

### **3.3 CRITERIOS PARA LA DETERMINACION DE LOS EVENTOS DE TORMENTAS SIGNIFICATIVAS EN SUMU**

La normativa internacional y nacional aeronáutica (Anexo 3, 2018; DINACIA-LAR 203, 2020) indica las pautas para la emisión de AD WRNG, el Servicio Meteorológico Aeronáutico de INUMET tiene establecido en su instructivo de trabajo interno los umbrales para la emisión de AD WRNG:

- tormentas (con o sin granizo)
- actividad eléctrica
- ráfagas de viento mayores a 15 m/s
- acumulados de lluvia que en 24 horas superen los 30 mm.

Para la emisión de los pronósticos TAF y SIGMET, además de contar con instructivo interno de trabajo, existe normativa internacional que regula el formato de confección de estos pronósticos, que son de gran importancia para la planificación del vuelo y para la toma de decisiones no solo de los pilotos, sino también del personal de aeropuertos.

### **3.4 SELECCIÓN DE LOS EVENTOS**

La clasificación de las observaciones con tormentas que provocaron algún tipo de evento meteorológico mencionado en el criterio establecido en el punto 3.3 se visualizan en la Tabla 3.2. Posteriormente, fueron seleccionados los eventos que durante el periodo 2015-2020 hayan cumplido los criterios establecidos en la metodología en relación a eventos que pudieran generar la emisión de AD WRNG. Como información complementaria fue incluido el evento del 17 de enero del 2022.

Tabla 3.2 Eventos que generaron algún tipo de tiempo significativo en SUMU.

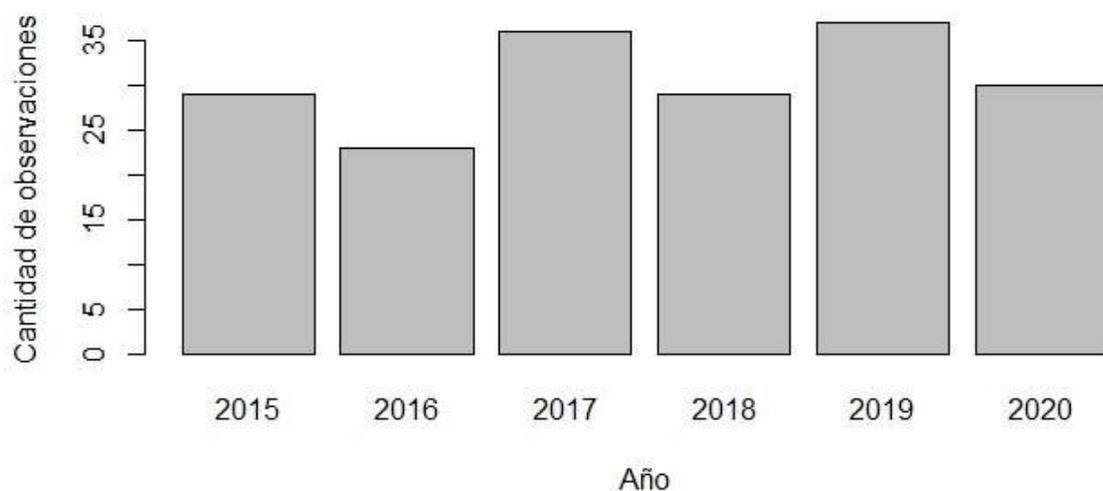
<b>Fecha</b>	<b>Precipitación en 24 horas</b>	<b>Tormentas en SUMU</b>	<b>Ráfagas mayores a 15 m/s en SUMU</b>	<b>Granizo en SUMU</b>
28/01/2015	38.5 mm	Si	No	No
3/03/2015	42.0 mm	Si	Si	No
1/08/2015	39.0 mm	Si	No	No
6/08/2015	49.0 mm	Si	SI	No
1/10/2015	32.0 mm	Si	No	Si
14/02/2015	46.0 mm	Si	No	No
17/02/2015	37.0 mm	Si	No	No
18/03/2016	43.0 mm	Si	No	No
15/04/2016	100.3 mm	Si	No	No
25/12/2016	52.0 mm	Si	No	No
10/09/2017	54.6 mm	Si	No	No
27/10/2017	48.0 mm	No	No	No
17/03/2018	40.0 mm	Si	No	No
29/09/2018	50.0 mm	Si	No	No
13/12/2018	170.0 mm	SI	Si	Si
9/05/2019	57.5 mm	Si	No	No
20/05/2019	47.0 mm	No	No	No
15/06/2019	41.0 mm	No	No	No
17/08/2019	32.5 mm	SI	No	No
1/10/2019	59.7 mm	Si	Si	No
11/10/2019	36.6 mm	Si	Si	No
12/10/2019	46.0 mm	Si	Si	No
20/06/2020	52.9 mm	Si	SI	No
22/06/2020	88.0 mm	Si	No	No
17/01/2022	97.0 mm	Si	Si	No

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ANUALIDAD DE LAS TORMENTAS CON LLUVIA EN SUMU DURANTE EL PERIODO

En la figura 4.1 se muestran los años con mayor cantidad de observaciones con tormenta en SUMU de acuerdo a la Tabla 3.1. Para este análisis se identificó anualmente la cantidad de reportes de tormentas. El pico de observaciones con tormenta en el año 2019 podría tener relación con el evento Niño de ese año, sabiendo que los eventos ENSO cálidos (fríos) inducen a anomalías positivas (negativas) de precipitaciones en SESA, con gran impacto en la hidrología de la Cuenca del Plata (Ropelewski; Halpert, 1987). Por otra parte, existen otros modos de variabilidad del clima o tipos de régimen de tiempo (Weather Regimes, en adelante WRs) que afectan particularmente América del Sur, y que tienen diferentes impactos dependiendo de la estación del año y de los eventos ENSO. En este sentido, una investigación realizada sobre las afectaciones de los WRs en América del Sur, con énfasis en Uruguay de Arizmendi y otros (2022) encontraron que para la estación cálida del hemisferio sur (dic.-enero-feb.) hay 5 WRs; en tanto para la estación fría (jun.-jul.-agosto) se detectaron 7 WRs. A su vez, estos WRs interactúan con los eventos ENSO teniendo diferentes comportamientos según sea la fase del ENSO que afecte en este momento la región. Para realizar una vinculación entre estos modos de variabilidad del clima y los datos observacionales obtenidos, se precisa de otras informaciones no siendo el objetivo de este trabajo realizar esa investigación.

Figura 4.1 Anualidad de las tormentas durante el período 2015-2020 en la estación SUMU



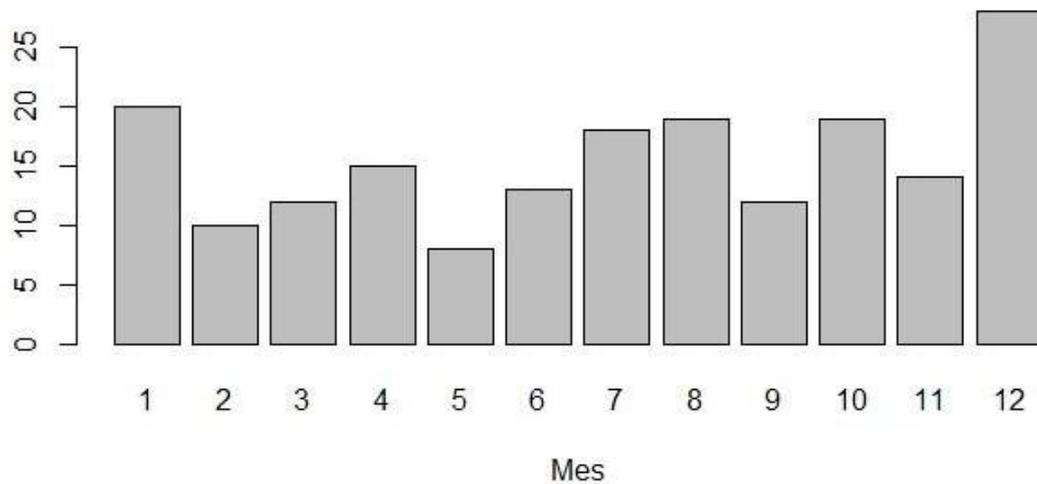
Fuente: (Elaboración propia)

## 4.2 ESTACIONALIDAD Y CICLO HORARIO DE LAS OBSERVACIONES CON TORMENTA EN SUMU

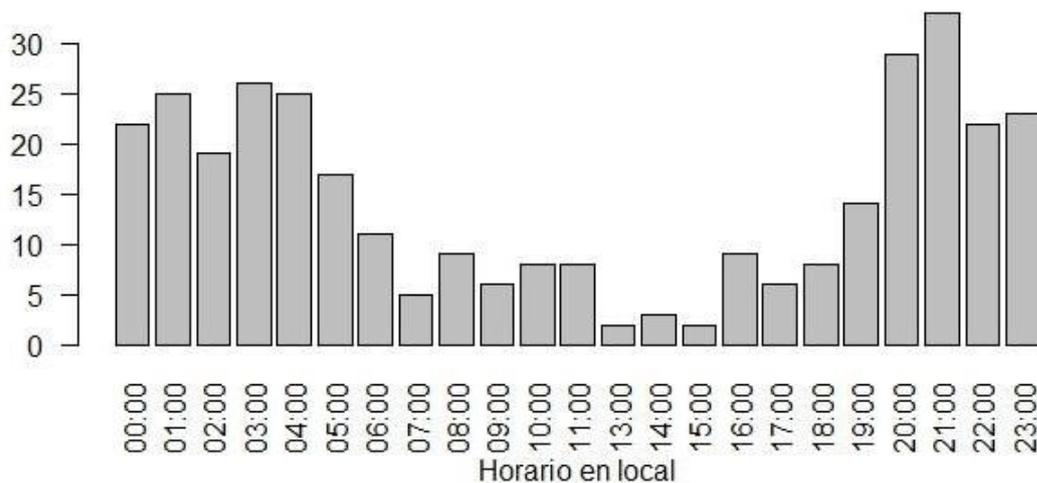
Como punto inicial, se define la estación cálida la comprendida entre los meses de dic.-enero-feb., la estación intermedia la que abarca los meses de marzo-abr.-mayo., y sept.-oct.-nov., la fría es la comprendida entre los meses de jun.-jul.-agosto.

Para este análisis también fueron utilizadas las observaciones con tormenta en base a la codificación de la Tabla 3.1. La frecuencia estacional con mayores reportes de tormentas durante el periodo 2015-2020 ocurre en la estación cálida (Figura. 4.2 a), si bien en parte de la estación fría hay un aumento de los datos, puede deberse a otro tipo de condiciones atmosféricas en la región como el pasaje de frentes fríos, o también pueden estar vinculados a los WRs mencionados en el punto 4.1. Por otra parte, en relación al ciclo horario, se observa una mayor frecuencia de datos con tormentas en horario nocturno, que abarca desde las 20:00 hr y las 05:00 hr local. En una evaluación preliminar, si comparamos los datos de las figuras 4.2 (a y b) con los resultados obtenidos por Shumacher y Rasmussen (2020) a nivel mundial, y por Rasera y otros (2018) en América del Sur, existe coincidencia en cuanto a la variabilidad estacional y horaria de las tormentas, con una tendencia a ser predominantemente nocturnas y generarse en la estación cálida.

Figura 4.2 Estacionalidad de las tormentas (a) y ciclo horario (b) en la estación SUMU para el período 2015-2020.



a) Fuente: (Elaboración propia)



b) Fuente: (Elaboración propia)

### 4.3 EVENTOS EXTREMOS DETECTADOS EN SUMU DURANTE EL PERIODO 2015-2020

De acuerdo a la información de la base de datos de observaciones horarias de INUMET obtenidos para SUMU, durante el periodo 2015-2020, se detectaron un total de 24 eventos de tormentas que causaron lluvias mayores a 30 mm en 24 horas, rachas de vientos mayores a 15 m/s y/o granizo (Tabla 3.2); a su vez se agregó el evento del 17 de enero de 2022 debido a las

graves consecuencias que tuvo tanto en el Aeropuerto MVD como por ejemplo retrasos en la operativa del aeropuerto, inundaciones en sus inmediaciones y algunos daños estructurales en el perímetro del mismo; también tuvo repercusión en el Área Metropolitana de Montevideo (Fig. 1.5).

De estos eventos se seleccionaron 2 del periodo 2015-2020 e incluyendo el del año 2022, dos de ellos pertenecientes a la estación cálida y uno a estación intermedia (determinadas en el punto 4.2), con el fin de reanalizar los campos sinópticos y satelitales. Se descarta el año 2020 ya que no hay registros en SUMU de eventos extremos durante la estación intermedia o cálida, (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Selección de casos.

<b>CASO</b>	<b>FECHA</b>	<b>REGISTRO EN SUMU</b>
<b>1</b>	15 y 16 de abril de 2016	100 mm en 24 hr, tormenta
<b>2</b>	13 y 14 de diciembre de 2018	170 mm en 24 hr, tormenta, granizo y ráfagas de viento
<b>3</b>	17 de enero de 2022	92 mm en 1 hr, tormenta, ráfagas de viento

Como indican Ferreira y Lima (2016), la previsión de tormentas severas con potencial para la generación de rachas de vientos fuertes permite la generación de Avisos Meteorológicos más específicos por lo que se hace necesario realizar un análisis de los ambientes sinópticos de estos eventos para obtener un mayor conocimiento de las tormentas en Uruguay y lograr documentar diferenciando por zonas, épocas del año y horarios con mayor ocurrencia abarcando un área más extensa de datos.

#### **4.4 ANALISIS Y RESULTADOS DE LOS CASOS SELECCIONADOS**

En esta sección se analizarán las imágenes satelitales procesadas del banco de archivo del CPTEC de los satélites GOES-13 y GOES 16; los datos del NCEP (Saha, 2014); con el lenguaje de programación Python se escribieron los scripts para el análisis sinóptico, de índices

de inestabilidad y sondeos para el punto más próximo al Aeropuerto MVD. Tomando como base que varios estudios han sido realizados para identificar los ambientes más propicios para la formación de SCM en América del Sur. Una de las configuraciones sinópticas más comunes es la presencia de un frente quasi-estacionario, característico de la estación caliente (Petters; Shumacher, 2014), donde el aire húmedo e inestable, en este caso asociado al SALLJ interacciona con la corriente en chorro de niveles altos, esto proporciona un ambiente favorable para la cizalladura del viento.

Por último, se evaluará el desempeño del SA-MCS Index, en los tres casos seleccionados; para ello, se adaptó el script del SA-MCS-Index, desarrollado por Rasera y otros (2017) confeccionado en NCL (NCAR Command Language), con el lenguaje de programación Python.

#### **4.4.1 ANALISIS DE IMÁGENES SATELITALES CASO 1**

Para este análisis, fueron descargadas del archivo de CPTEC las imágenes infrarrojas realizadas del satélite Goes-13, con el objetivo de identificar las estructuras en imágenes satelitales que ocasionaron el evento extremo del Caso 1 y evaluar si cumple las características de SCM.

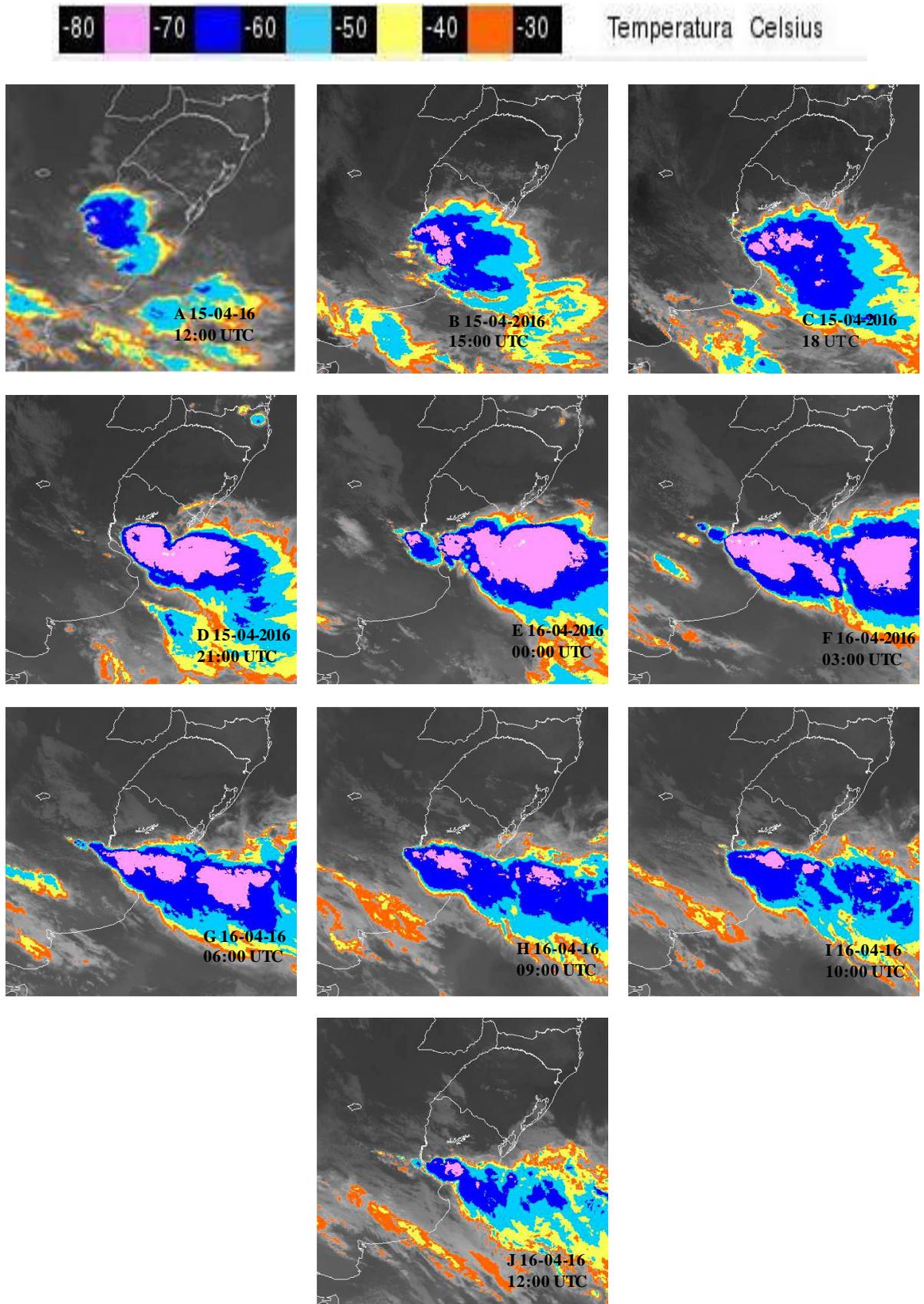
En el Caso 1 se seleccionaron imágenes Infrarrojas Realzadas (IR-T realce) cada 3 horas, debido a la persistencia en horas del evento. El área de estudio aproximada se extiende entre los 25°S y los 45°S. En cuanto a los umbrales de temperaturas para la determinación de SCM mediante imágenes de satélite, existen diferencias en relación a la temperatura de tope nubosos para definirlos. En este caso se empleará un criterio similar al de Anabor y otros (2008) con umbrales de temperaturas: -38°C, -45°C y -50°C utilizados para la identificación de SCM en SESA.

El Caso 1 fue seleccionado conociendo los eventos provocados, no solo en la región de estudio puntual, sino también en otras partes de Uruguay que fueron desde: eventos de lluvias intensas, granizo, ráfagas de viento y tornados, el más destructivo fue el de la ciudad de Dolores, ubicada en el departamento de Soriano en la zona suroeste de Uruguay; luego hubo más reportes de tornados en la tarde del 15 de abril de 2016 en la zona central de Uruguay hacia el este.

En las imágenes presentadas en la Figura 4.3 la convección más intensa inicia sobre la región de Argentina, entre los 30-35°S 65-50°W, con temperaturas de tope de nubes entre -

40°C y -80°C a las 12 UTC del día 15/04/2016 (Fig. 4.3 A). La región convectiva tiene un desplazamiento Sur-Sureste, posteriormente se estaciona sobre la región sur de Uruguay. Mediante herramientas gráficas, fue realizado un cálculo aproximado del área del escudo nuboso de las tormentas en el horario de máxima actividad, que en este caso se determinó a las 03 UTC del día 16/04/2016 (Fig. 4.3 F), encontrando que las zonas con temperaturas de brillo por debajo de -50°C superaron los 500.000 km<sup>2</sup>. Estos resultados son algo diferentes a los encontrados por Anabor y otros (2008) pero al ser distinta la técnica utilizada puede haber diferencias. De todas formas, el área encontrada es más grande que alguno de los países de SESA, incluyendo Uruguay que tiene un área de 176.215 km<sup>2</sup>. El SCM permaneció varias horas afectando la región de interés; esta persistencia también fue encontrada por Anabor y otros (2008). Los toques más fríos detectados en las imágenes de satélite (Fig. 4.3) permanecen por debajo de los -60°C durante los horarios seleccionados y se destaca que tuvo una persistencia de mayor a 18 horas, y entre las 18:00 UTC del día 15/04/2016 y las 10:00 UTC del día 16/04/2016 (Figs. 4.3 C-I) la región de temperatura de toques de nubes por debajo -70°C permaneció activa durante esas horas. Otra metodología utilizada para la evaluación de SCM analizar los registros de precipitaciones con un radio aproximado de 100 km, para ello se obtuvieron los registros pluviométricos del DCPS de INUMET (Anexo I, Fig. A1) donde se destacan los registros de lluvias de los sistemas de tormentas que ingresaron por el suroeste de Uruguay, y que afectaron el Aeropuerto MVD, teniendo presente que la distancia entre esa región y el Aeropuerto es de unos 100-200 km, dependiendo del punto que se seleccione para analizar. De acuerdo con la definición general, un SCM genera un área de precipitación con un radio aproximado de 100 km en al menos una dirección (Houze, 2004). En el Caso 1 fue verificada la metodología de Houze (2004), además de los criterios establecidos por Anabor (2008), por lo que se verifica la presencia del SCM.

Figura 4.3 Secuencia de imágenes Satélite banda IR T-realce para el Caso 1.



Fuente: (CPTEC/INPE Goes-13)

#### 4.4.2 PATRONES SINOPTICOS PARA EL CASO 1

Después de la identificación del SCM del Caso 1 por medio de imágenes de satélite descritas en la sección 4.4.1, fueron descargados los datos detallados en la metodología NCEP CFSv2 (Saha, 2014), con el objetivo de estudiar las condiciones sinópticas asociadas a la convección en horarios donde los SCM ya estaban presentes o en las inmediaciones del área de estudio. Los horarios analizados fueron los siguientes: 18:00 UTC y 00:00 UTC.

En la figuras 4.4 (A y B), es observado el sistema de baja presión a sotavento de los Andes ubicado entre los 25°S a 35°S, la configuración es similar a la Baja térmica del Noroeste Argentino (NAL en inglés) (Linchestein 1980; Seluchi, Saulo, Satyamurty, 2003). La intensificación de la NAL contribuye a expandir el SALLJ en dirección hacia el sur; la naturaleza de la NAL y la interacción con el SALLJ ya ha sido demostrada (Vera et. al., 2006). Estudios también han demostrado que la extensión del SALLJ está en equilibrio geostrofico con la NAL (Saulo et. al 2004). Este comportamiento del SALLJ es el principal mecanismo para la producción del flujo de humedad. El mismo, se ve reflejado también en 850 hPa (Fig. 4.4 C y D) en aire húmedo proveniente del Amazona es transportado hacia la región sur de SESA coincidiendo con lo encontrado por Nicoloni y Saulo (2000) y por Anabor, Stenrsrud y Moraes (2008).

Los valores de humedad específica encontrados en 850 hPa son superiores a  $12 \text{ g kg}^{-1}$  (Fig 4.4 C) y a los  $15 \text{ g kg}^{-1}$  (Fig. 4.4 D) en la zona de estudio; en los casos estudiados por Jirak y Cotton (2007), y por Rasera (2017) el valor encontrado de humedad especifica en este nivel fue de  $13 \text{ g kg}^{-1}$ . Al este de los Andes el LLJ con valores máximos al sur de Uruguay entre  $20\text{-}25 \text{ m s}^{-1}$  (Fig 4.5 A) y entre  $15\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$  (Fig. 4.5 B) contribuye a la advección cálida y húmeda, que se presenta corriente abajo y al sur del LLJ

Utilizando la metodología de Salio, Saulo y Nicoloni (2002), fue realizada la integración 1000-850 hPa, para evaluar el flujo de humedad vertical integrado (Q), ya que la convección y la humedad convergente están fuertemente relacionadas, y ellas coexisten cuando hay convección presente (Salio; Nicoloni; Zipser, 2007). Los resultados para el Caso 1 muestran que la convergencia de Q se intensifica conforme las tormentas comienzan a estar presente en la región sur de Uruguay (Fig. 4.3). Los valores de Q encontrados se presentan en la Figura 4.5 (C y D). Una evaluación importante que sugieren Salio y otros (2002) es la comparación de Q con los acumulados de precipitación, en el Caso 1, y teniendo presente que solamente se

analizaron los datos del Aeropuerto MVD y de su estación meteorológica SUMU en la Tabla 4.2 se presentan los resultados de  $Q$  en la región de análisis y de acumulados de precipitación.

De este análisis de niveles bajos para el Caso 1, la configuración sinóptica y el aporte de humedad estaban presentes en la región sur de Uruguay, donde está ubicado el Aeropuerto MVD.

Figura 4.4 Presión atmosférica a nivel medio del mar cada 1 hPa para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B); Geopotencial en 850 hPa (mgp) y humedad específica para el mismo nivel ( $\text{g kg}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (C) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (D).

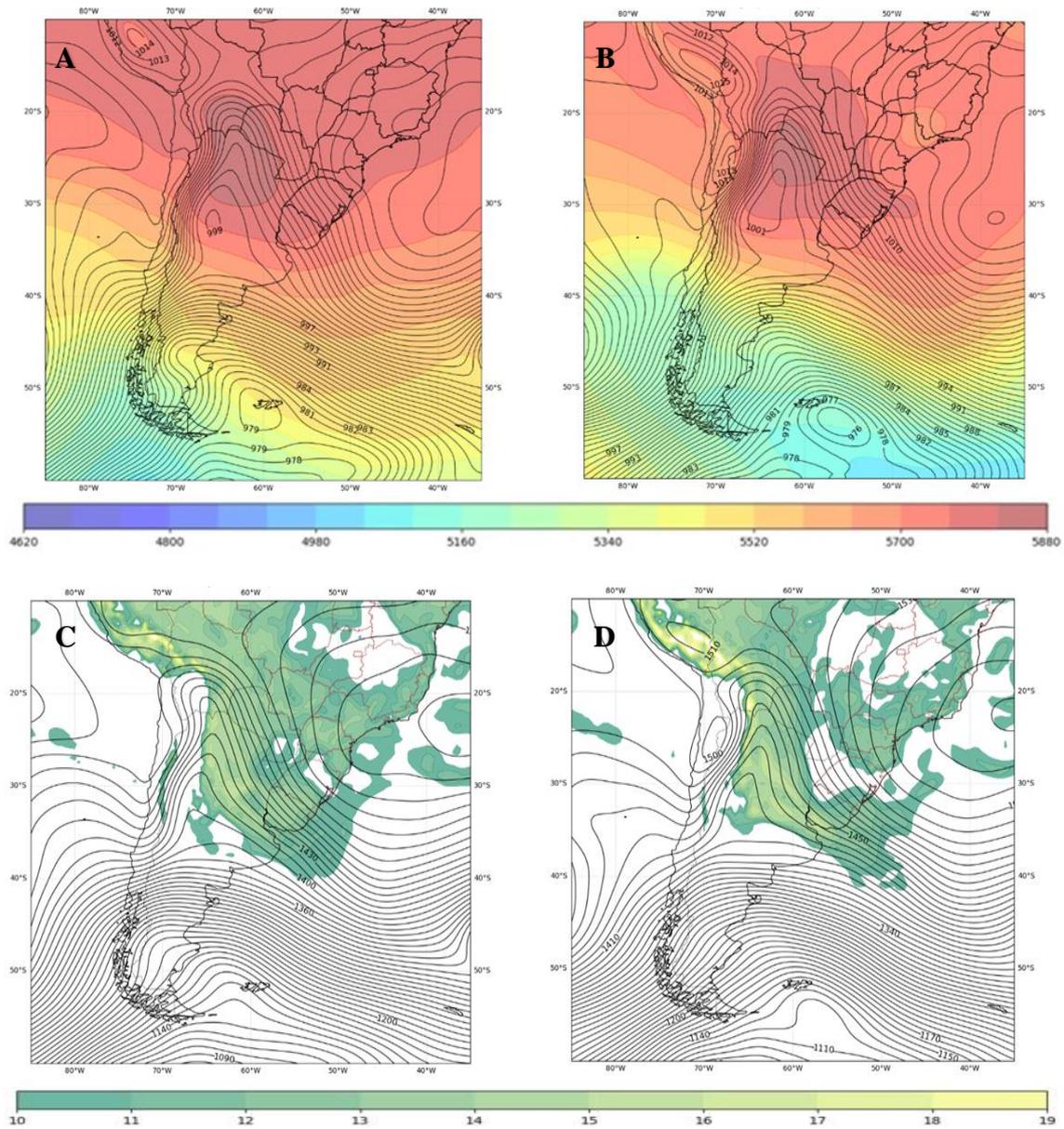


Figura 4.5 Geopotencial en 850 hPa (mgp) y magnitud del viento para el mismo nivel ( $\text{m s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B); Flujo vertical integrado Q en la capa 1000/850 hPa ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (C) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (D).

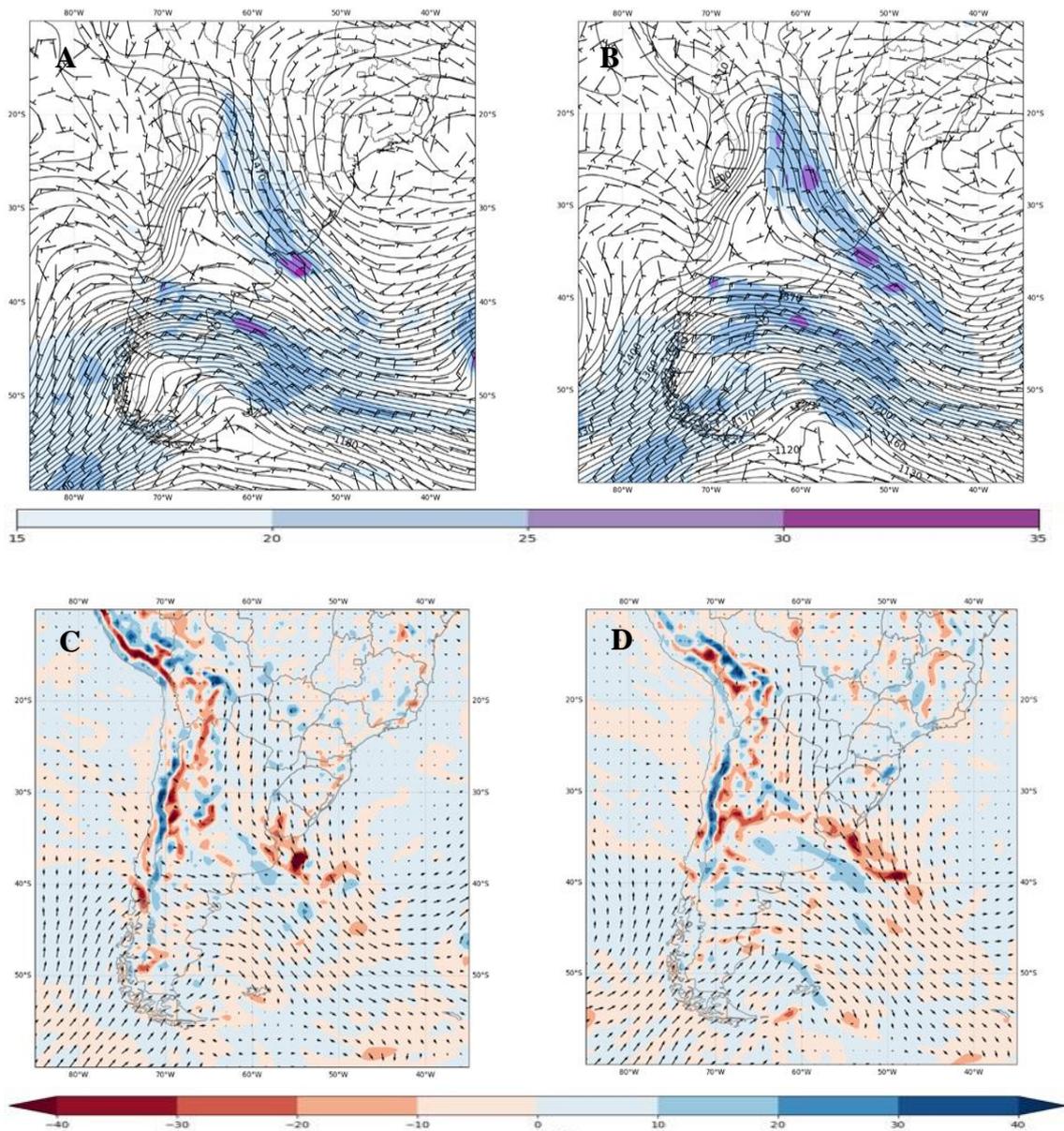
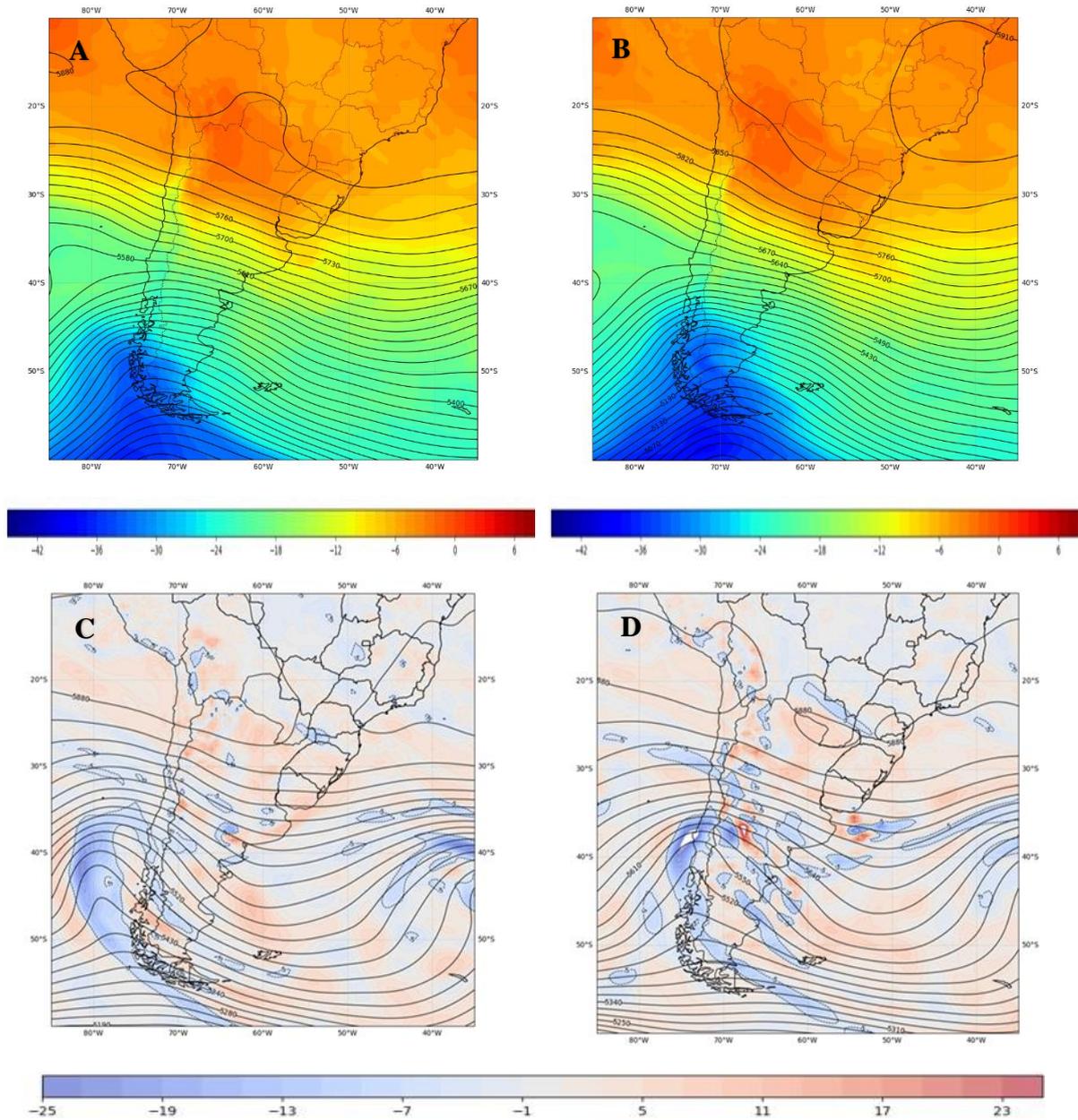


Tabla 4.2 Comparación de Q con el acumulado de lluvia en 24 hs para el Caso 1 (07:00 hora local del 15/04/2016 a las 07:00 hora local del 16/04/2016).

Día y Horario	Q	Lluvia en 24 hr en SUMU
15/04/2016 18:00 UTC	-10 y -20 kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	100 mm
16/04/2016 18:00 UTC	-10 y -20 kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	

En niveles medios, el contraste térmico observado entre los 30°- 40°S marca la presencia de una fuerte zona baroclínica en la región (Figs. 4.6 A y B), por otra parte, la vorticidad menos positiva en la zona de análisis (Fig. 4.6 C y D) comienza a notarse a medida que avanzan los horarios en el que el SCM se intensifica. Los valores más negativos se ubican al suroeste de Uruguay, más en la región de Argentina en la Provincia de Buenos; este patrón de circulación a escala sinóptica es consistente con la teoría quasi-geostrófica, y analizando la ecuación de la tendencia quasi-geostrófica, donde la advección cálida de temperatura en 500 hPa observada sobre Uruguay profundiza la vaguada e intensifica las bajas presiones, provocando valores de vorticidad negativa, que en este caso no es muy marcada.

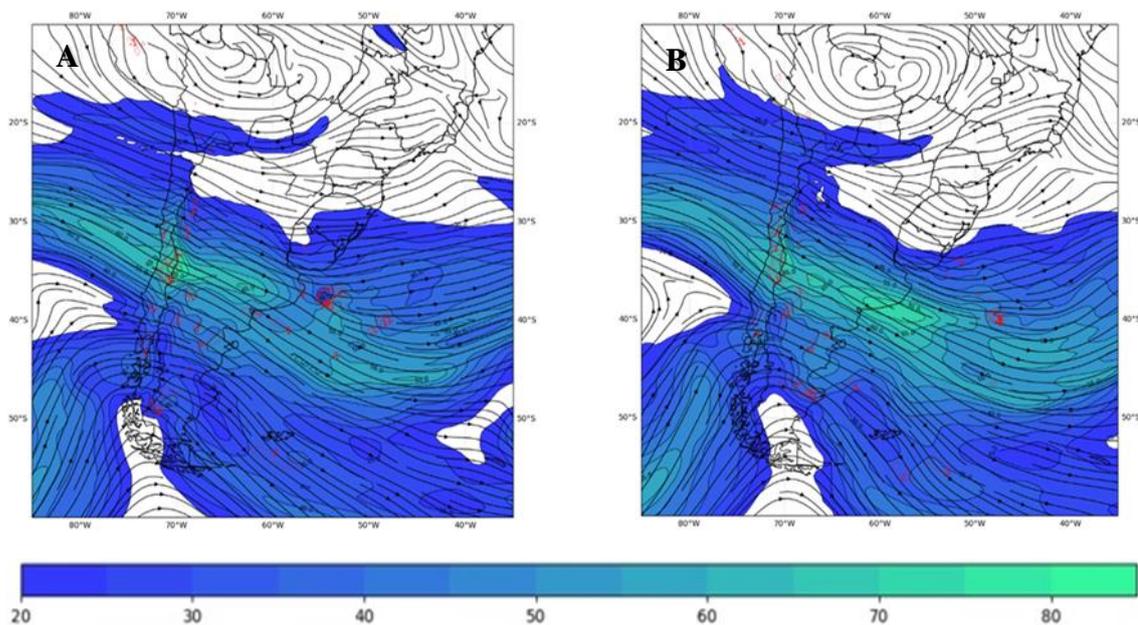
Figura 4.6 Geopotencial en 500 hPa (mvp) y temperatura para el mismo nivel (°C) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B); Geopotencial (mvp) y vorticidad en 500 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (C) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (D).



En niveles altos fue analizado el campo de 250 hPa y se comparó con el campo de Omegas en 500 hPa (Figs. 4.7 A y B). La localización del área de máxima velocidad es al sur de Uruguay, en la región al sur de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) entre los 40°-35° S; el flujo en esta región mostrado con los campos de líneas de corriente tiende a ser divergente en esa zona, los valores de intensidad del viento máximo están entre los 60-70  $\text{m s}^{-1}$  a las 18:00

UTC (Fig. 4.7 A) y entre 70-80  $\text{m s}^{-1}$  a las 00:00 UTC (Fig. 4.7 B). En la zona al sur de Uruguay los valores están entre los 30-40  $\text{m s}^{-1}$ . Esta última región de vientos tiende a acoplarse con la región de salida del SALLJ, y es consistente con los patrones encontrados por Petters y Shumacher (2014). La interacción es observada también con los valores de omegas negativos (Fig. 4.7 A) más en la región oceánica al sur de Uruguay; en la Fig. 4.7 B no son observados valores de omegas negativos. Sin embargo, teniendo presente que se están trabajando con datos de reanálisis de un modelo global, es un indicio de que en la zona de análisis las condiciones sinópticas eran favorables para la convección.

Figura 4.7 Líneas de corriente y magnitud del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) en 250 hPa, y Omegas en 500 hPa ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B).



Para la evaluación del IVT, se utilizará lo descrito en la metodología realizando los cálculos de IVT descrito por Reid y otros (2020) para el Caso 1 en las horas donde la convección estaba presente en la región.

Los valores de IVT reanalizados con los datos de modelado numérico mostraron para el Caso 1 que en la región de Uruguay valores entre 500-750  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$  (Fig. 4.8 B) con un máximo entre 750-1000  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$  (Fig. 4.8 A). Se observa en este análisis que previo a la hora en que la convección es más intensa y organizada (Fig. 4.3) los valores de IVT son más elevados. De todas formas, los valores coinciden en que la región sur de Uruguay estaba siendo influenciada

por un fuerte transporte de humedad (pudiendo ser AR), que luego se vio reflejado en las tasas de precipitaciones registradas por el DCPS de INUMET presentadas en la Tabla 4.3.

Figura 4.8 Transporte de humedad vertical integrado en la capa 1000/300 hPA (IVT  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B).

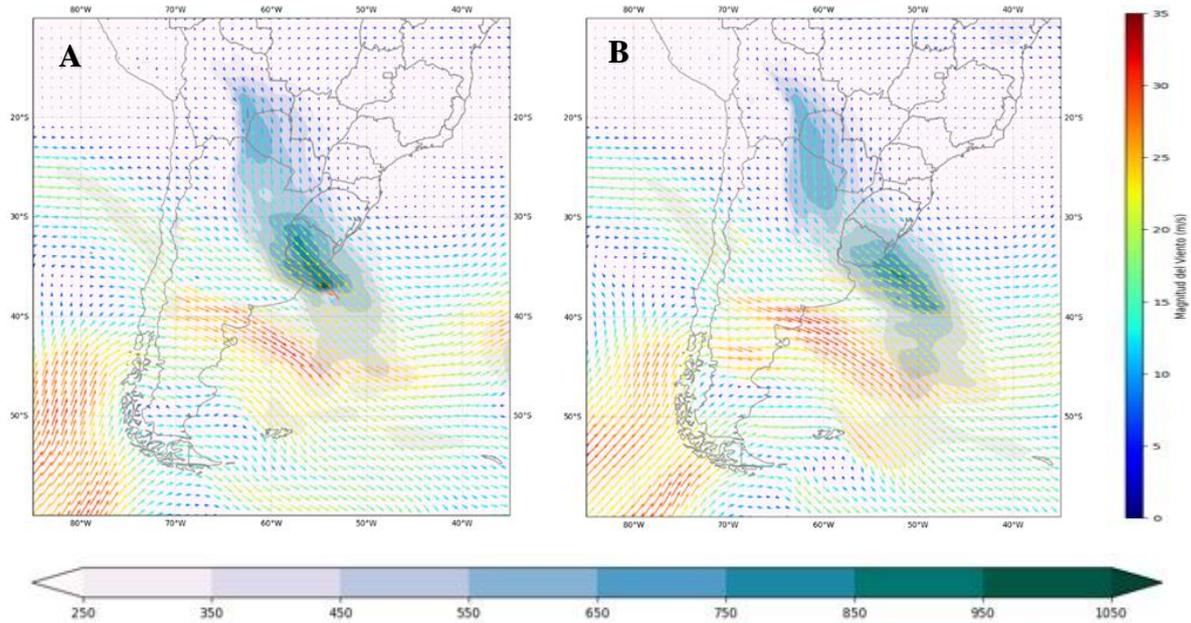
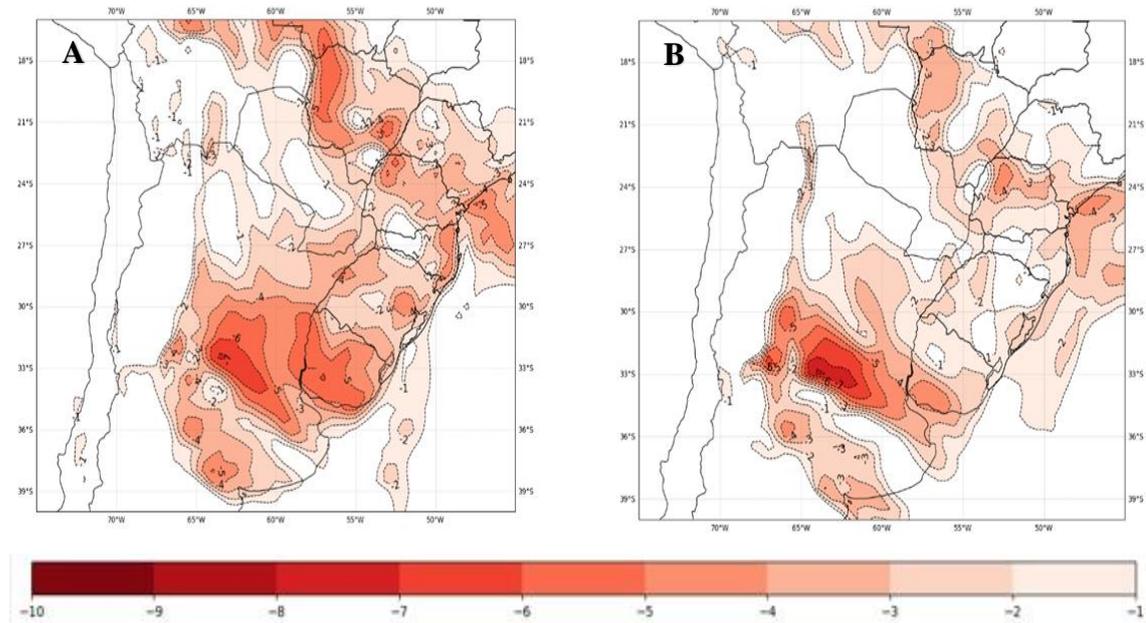


Tabla 4.3 Comparación de IVT con el acumulado de lluvia en 24 hs para el Caso 1 (07:00 hora local del 15/04/2016 a las 07:00 hora local del 16/04/2016).

Día y horario	IVT	Acumulado de lluvia en SUMU
15/04/2016 18:00 UTC	750-1000 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	100 mm
16/04/2016 00:00 UTC	500-750 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	

La inestabilidad del ambiente, fue reanalizada con los datos del índice Lifted (LI) (Fig. 4.9). En la región al sur de Uruguay, los datos obtenidos estuvieron entre -6 y -7 en el horario de las 18:00 UTC (Fig. 4.9 A), y entre -6 y -5 en el horario de las 00:00 UTC (Fig. 4.9 B), observando un comportamiento del LI con valores más negativos en los inicios de la organización de la convección y menos negativos, cuando había mayor organización del sistema de tormentas. Este comportamiento de este índice fue descrito por Anabor (2008), con valores más negativos al inicio de la convección y menos negativos cercanos a la hora de desarrollo de la misma.

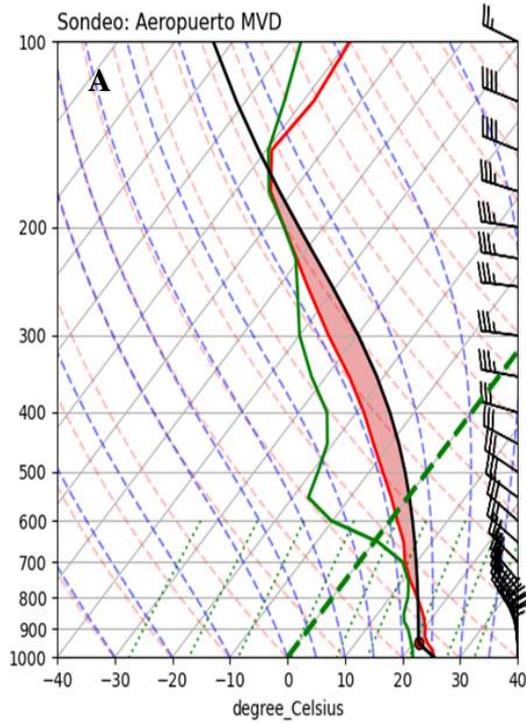
Figura 4.9 Índice Lifted (LI) para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B).



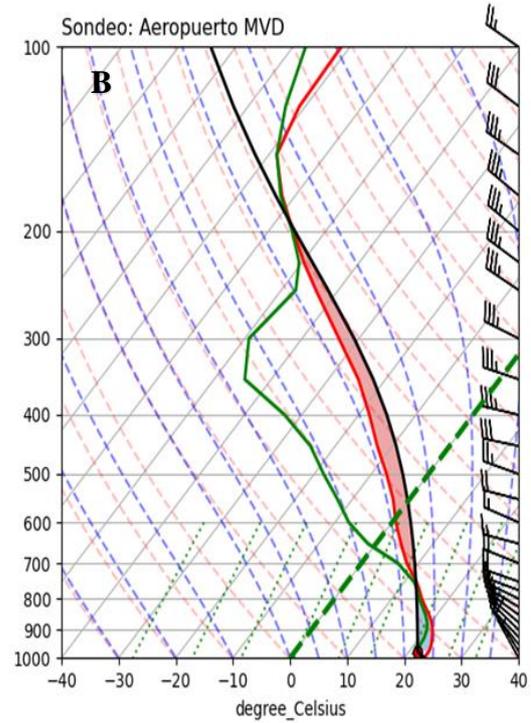
Para el análisis del perfil vertical de la atmósfera, Uruguay no cuenta con radiosondeos, por ello y para hacer una evaluación de las condiciones en el Aeropuerto MVD, se realizaron sondeos con datos de reanálisis, utilizando el punto más cercano de la grilla para el Aeropuerto MVD, descriptos en la metodología para obtener información complementaria a la ya analizada.

Los resultados para el Caso 1 se presentan en la Figura 4.10 (A y B) los valores de Bulk Shear en la capa 0-6 km estuvieron entre 28 y 25  $\text{ms}^{-1}$  pudiendo indicar la presencia de tormentas supercelulares de acuerdo con la literatura, y que la cizalladura está presente en esta capa y que es uno de los indicativos para la formación de SCM. En relación a la energía disponible para la convección (CAPE) en el horario de las 18:00 UTC (Fig. 4.10 A) el valor de CAPE es de  $1616 \text{ j kg}^{-1}$  con una inhibición (CIN) de  $-36.4 \text{ j kg}^{-1}$ ; para las 00:00 UTC (Fig. 4.10 B) el valor se reduce a  $964 \text{ j kg}^{-1}$  con un CIN de  $-126.7 \text{ j kg}^{-1}$ . Los vientos por encima de 700-500 hPa, tienen una componente del oeste en ambos horarios y esto contribuye con la propagación corriente arriba de la convección detectada en las imágenes de satélite; además estos resultados también fueron encontrados por Anabor (2008).

Figura 4.10 Sondeo con datos de reanálisis para el punto más cercano de grilla al Aeropuerto MVD para las 18:00 UTC del 15/04/2016 (A) y para las 00:00 UTC del 16/04/2016 (B).



CAPE: 1616.1 J kg<sup>-1</sup>  
 CIN: -36 J kg<sup>-1</sup>  
 LI Index: -3.9  
 K Index: 39.6  
 Bulk Shear: 28.3 m s<sup>-1</sup>



CAPE: 964.1 J kg<sup>-1</sup>  
 CIN: -126 J kg<sup>-1</sup>  
 LI Index: -2.8  
 K Index: 42.56  
 Bulk Shear: 25.7 m s<sup>-1</sup>

#### 4.4.3 ANALISIS DE IMÁGENES SATELITALES CASO 2

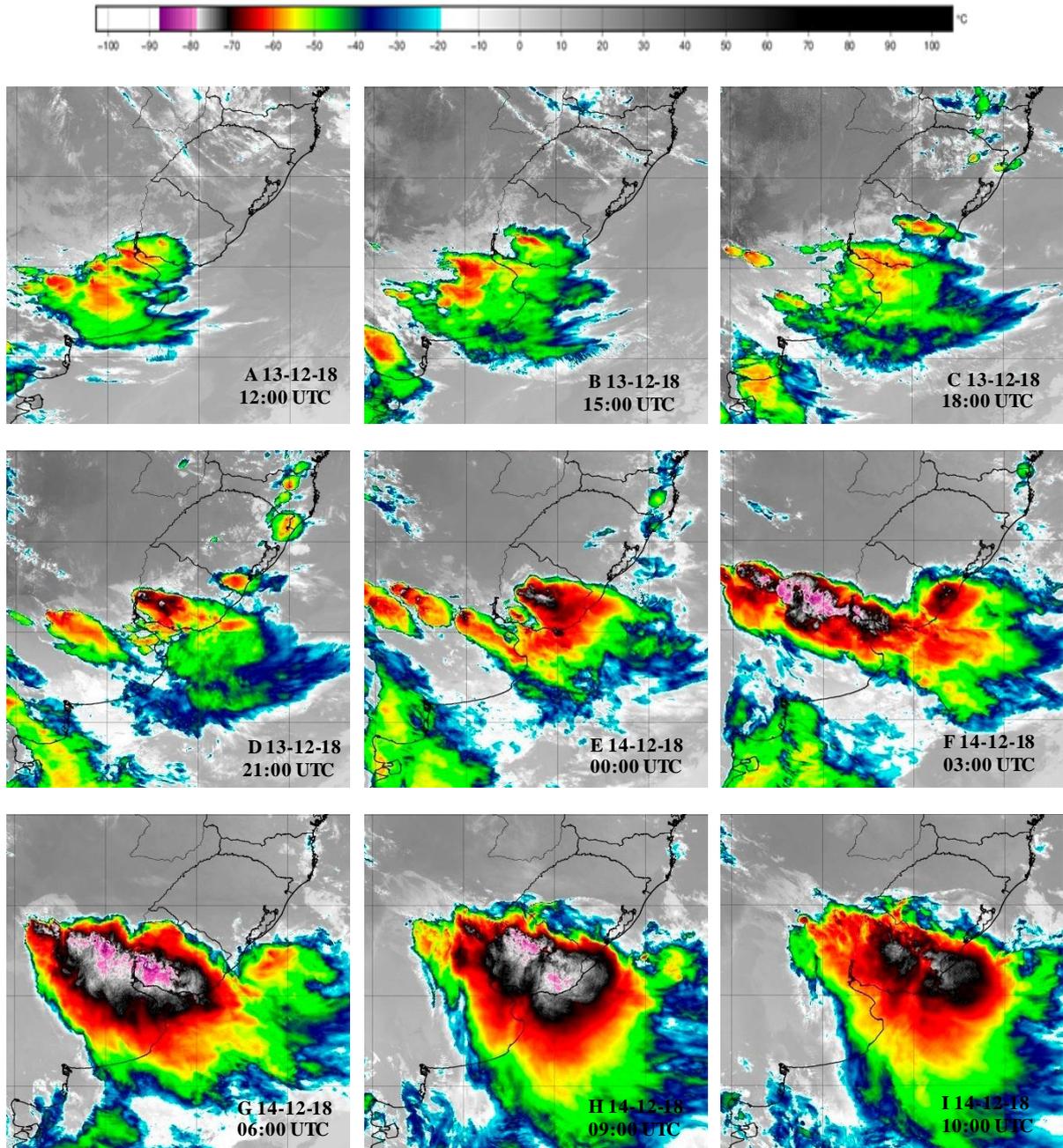
Para este análisis, fueron descargadas del archivo de CPTEC las imágenes infrarrojas realizadas del satélite Goes-16, con el mismo objetivo del Caso 1 que es el de identificar las estructuras en imágenes satelitales que ocasionaron el evento extremo y evaluar si cumple las características de SCM.

En el Caso 2 se seleccionaron Imágenes Infrarrojas del Canal 13 cada 3 horas, debido a la persistencia en horas del evento. El área de estudio aproximada también se extiende entre los 25°S y los 45°S y fue utilizado el mismo criterio de Anabor y otros (2008) en relación a los umbrales de temperatura de tope nuboso: -38°C, -45°C y -50°C utilizados para la identificación de SCM en SESA. Este caso fue seleccionado conociendo el impacto provocado en el Aeropuerto MVD, donde hubo inconvenientes en las comunicaciones, ocasionando acumulados de precipitaciones que alcanzaron los 170 mm en 24 horas; además de haber afectado otras regiones de Uruguay con tiempo severo.

En las imágenes presentadas en la Figura 4.11 la convección más intensa inicia sobre la región de Argentina, más próximo a los 35°S 65 °W con temperaturas de tope de nubes entre -40°C y -80°C. Nuevamente la región convectiva tiene un desplazamiento Sur-Sureste, para luego estacionarse sobre la región sur de Uruguay. Mediante herramientas gráficas, fue realizado el cálculo aproximado del área del escudo nuboso de las tormentas en el horario de máxima actividad, que en este caso se determinó a las 09:00 UTC del día 14/12/2018 (Fig. 4.11 H), encontrando que las zonas con temperaturas de brillo por debajo de -50°C superaron los 500.000 km<sup>2</sup> encontrando también que el área del escudo nuboso es más grande que alguno de los países de SESA, incluyendo Uruguay que tiene un área de 176.215 km<sup>2</sup>. Los sistemas de tormentas organizadas permanecieron varias horas afectando la región de interés; esta persistencia es similar al Caso 1, además de encontrada por Anabor y otros (2008). Los tope más fríos detectados en las imágenes de satélite (Fig. 4.11) permanecen por debajo de los -60°C durante los horarios seleccionados, destacándose nuevamente la persistencia mayor a 18 horas, y entre las 03:00 UTC y las 09:00 UTC del día 14/12/2018 (Figs. 4.11 F-H) la región de temperatura de tope de nubes por debajo -70°C permaneció activa durante esas horas. Al igual que en el Caso 1 se evaluó con la metodología de Houze (2004) la posibilidad de SCM identificando el área de precipitaciones en un radio aproximado de 100 km en al menos una dirección. Analizando los datos de lluvia de DCPS de INUMET e (Anexo I, Fig. A2) se destacan los registros de lluvias de los sistemas de tormentas que ingresaron por el suroeste de

Uruguay, y que afectaron el Aeropuerto MVD, teniendo en cuenta la distancia ya mencionada entre esa región y el Aeropuerto (100-200 km). Por lo tanto, en este Caso 2 fue verificada la metodología de Houze (2004), además de los criterios establecidos por Anabor (2008), por lo que se verifica la presencia del SCM.

Figura 4.11. Secuencia de imágenes satelitales del Canal 13 para el Caso 2 (13/12/2018 y 14/12/2018).



Fuente: (CPTEC/INPE Goes- 16)

#### 4.4.4 PATRONES SINOPTICOS DEL CASO 2

Con el mismo método utilizado para el Caso 1 se analizaron los campos sinópticos del Caso 2. El SCM fue identificado mediante las imágenes de satélite presentadas en la sección 4.4.3, y para evaluar las condiciones sinópticas asociadas a la convección en horarios donde los SCM ya estaban presentes o en las inmediaciones del área de estudio, se utilizaron los horarios siguientes: 18:00 UTC y 00:00 UTC.

En la figuras 4.12 (A y B), es observado el sistema de baja presión a sotavento de los Andes ubicado entre los 25°S a 35°S, al igual que en Caso 1, la configuración es similar a la NAL (Linchestein 1980; Seluchi, Saulo, Satyamurty, 2003); también es observado el Sistema de Alta Presión (SAP) entre los 30°S a 45°S. Esta configuración difiere del Caso 1, donde el SAP estaba ubicado más hacia la región norte del Océano Atlántico Sur. Sin embargo, la interacción de la NAL el SPA contribuyen al flujo de vientos del Norte-Noreste hacia la región de Uruguay. La NAL también contribuye, como ya fue descrito, a la expansión del SALLJ, aportando humedad desde las regiones del norte. Esto se ve reflejado también en 850 hPa, principalmente a las 00:00 UTC (Fig. 4.12 D) y no tanto a las 18:00 UTC (Fig. 4.12 C),

Los valores de humedad específica encontrados en 850 hPa en la Figura 4.12 C no son observados en la región sur de Uruguay, posiblemente por el umbral mínimo utilizado para esta variable. Si se encontraron valores superiores en la Figura 4.12 D cercanos a  $12\text{-}13\text{ g kg}^{-1}$  en esta última hora los valores son los encontrados también en los casos estudiados por Jirak y Cotton (2007), y por Rasera (2017). En la Figura 4.13 A y B, al este de los Andes los valores de magnitud del viento asociados al LLJ al sur de Uruguay se encuentran entre  $15\text{-}22\text{ m s}^{-1}$  (Fig 4.13 A) y entre  $20\text{-}30\text{ m s}^{-1}$  (Fig. 4.13 B) contribuyendo a la advección cálida y húmeda, que se presenta corriente abajo y al sur del LLJ.

En relación a la evaluación de Q, se utilizó el mismo método que para el Caso 1. Los resultados encontrados muestran convergencia de Q se intensificándose a medida que las tormentas se refuerzan en la región de estudio (Fig. 4.13 C y D). En la Tabla 4.4 los valores de Q encontrados se presentan son comparados con el acumulado de precipitación en, destacando de este caso el valor de lluvia acumulada de 170 mm.

De este análisis de niveles bajos para el Caso 2, la configuración sinóptica y el aporte de humedad estaban presentes en la región sur de Uruguay, donde está ubicado el Aeropuerto MVD, con algunas diferencias en relación al Caso 1.

Figura 4.12 Presión atmosférica a nivel medio del mar cada 1 hPa para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2016 (B); Geopotencial en 850 hPa (m<sub>g</sub>p) y humedad específica para el mismo nivel (g kg<sup>-1</sup>) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (C) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (D).

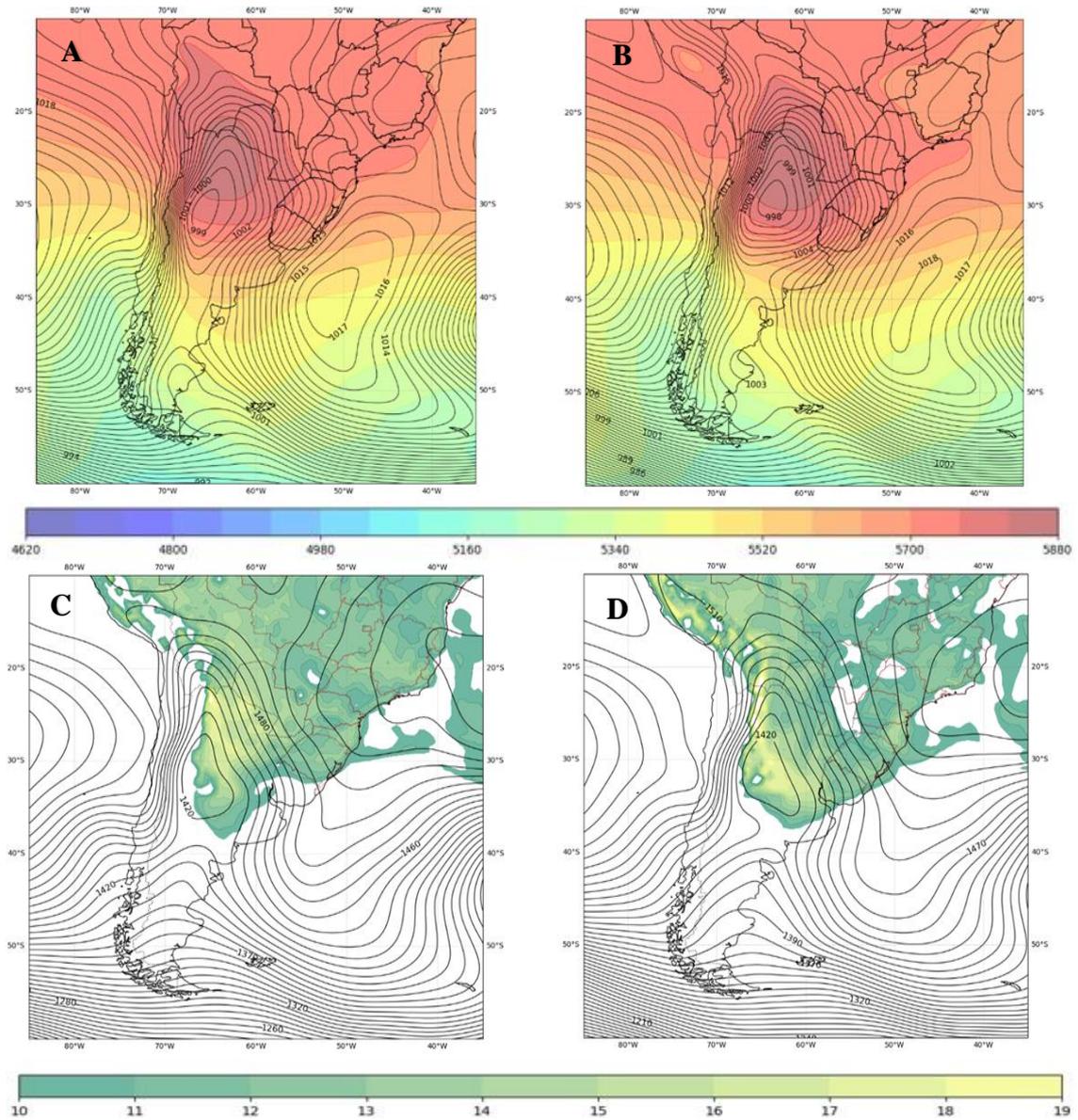


Figura 4.13 Geopotencial en 850 hPa (m<sup>g</sup>) y magnitud del viento para el mismo nivel (m s<sup>-1</sup>) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (B); Flujo vertical integrado Q en la capa 1000/850 hPa (kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (C) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (D).

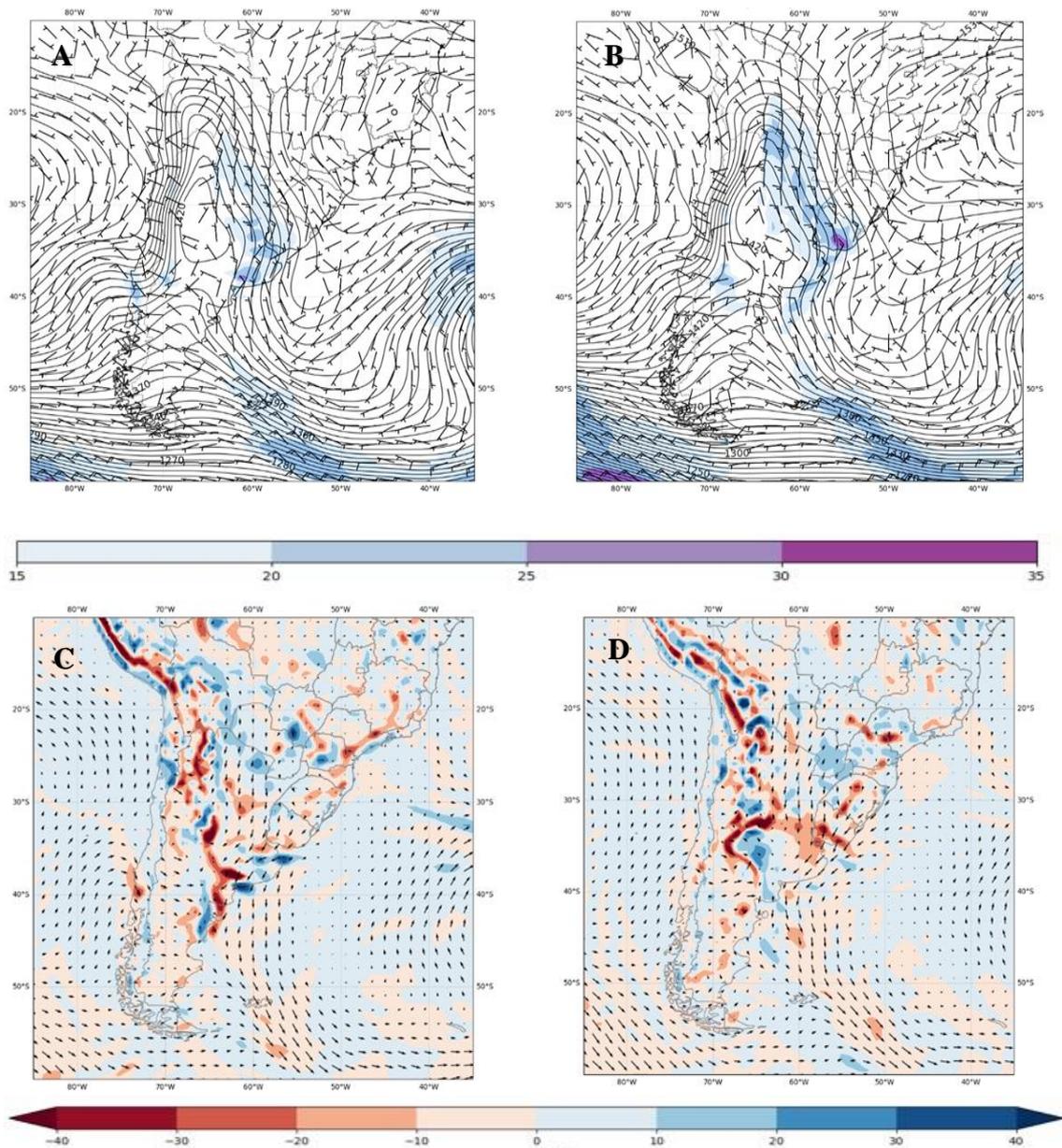
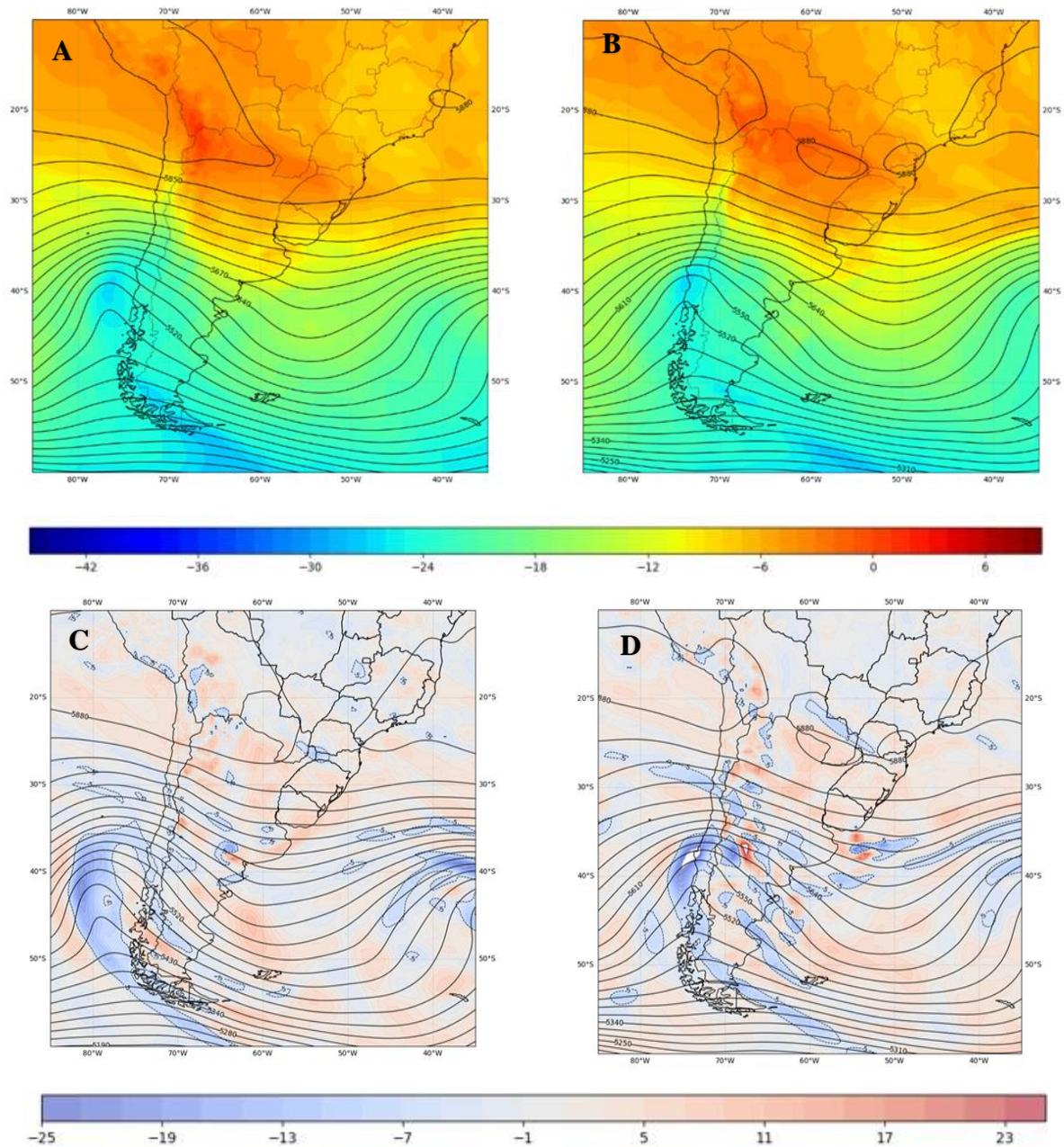


Tabla 4.4 Comparación de Q con el acumulado de lluvia en 24 hs para el Caso 2 (07:00 hora local del 13/12/2018 a las 07:00 hora local del 14/12/2018).

Día y Horario	Q	Lluvia en SUMU
13/12/2018 18:00 UTC	-10 y -20 kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	170 mm
14/12/2018 00:00 UTC	-20 y -30 kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	

En niveles medios, se muestra la presencia del contraste térmico entre los 30°- 40°S marcando la presencia de una fuerte zona baroclínica en la región (Figs. 4.14 A y B). En relación a la vorticidad (Figs. 4.14 C y D) se observan valores menos positiva en la zona de análisis (Fig. 4.6 C y D), en la Figura 4.6 D es donde más se identifica en la región oceánica al sur de Uruguay, y es donde el SCM comienza su intensificación. Al igual que en Caso 1, el patrón de circulación a escala sinóptica concuerda con la teoría quasi-geostrófica, y evaluando las temperaturas en 500 hPa, donde la advección cálida en este nivel está presente sobre Uruguay, contribuye en profundizar la vaguada e intensifica las bajas presiones, provocando valores de vorticidad negativa, que en este caso no es muy marcada específicamente sobre la región del Aeropuerto MVD, pero si en las inmediaciones.

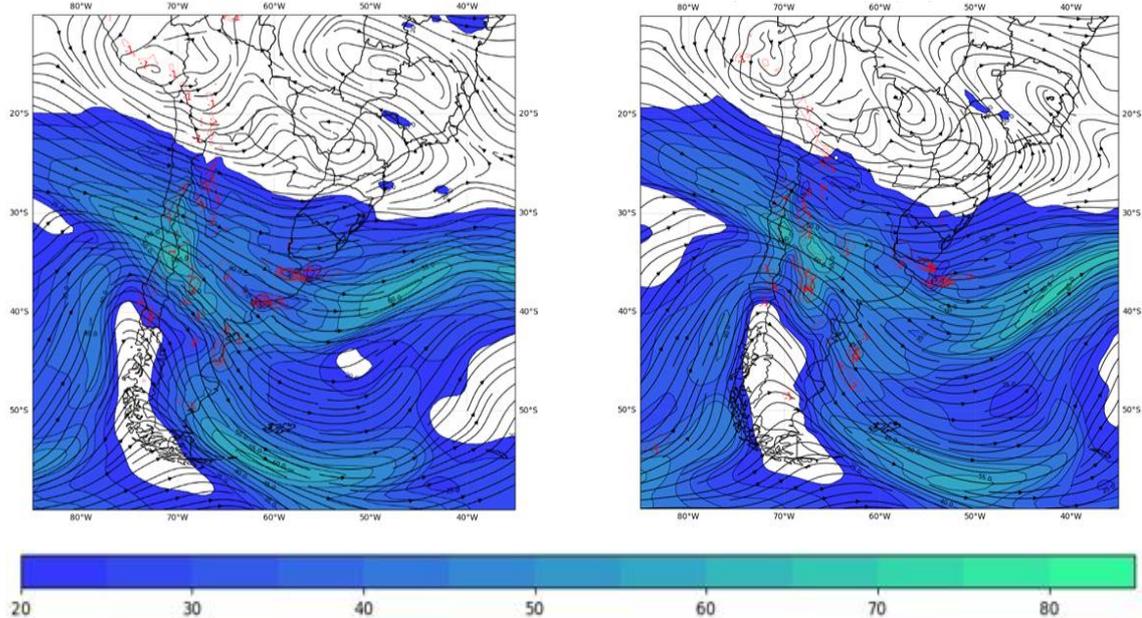
Figura 4.14 Geopotencial en 500 hPa (m<sub>g</sub>p) y temperatura para el mismo nivel (°C) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (B); Geopotencial (m<sub>g</sub>p) y vorticidad en 500 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (C) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (D).



Analizando el campo de 250 hPa y de Omegas en 500 hPa para el Caso 2 (Fig. 4.15 A y B) los valores de magnitud del viento encontrados en la región de análisis al sur de Uruguay son entre  $40\text{-}50 \text{ m s}^{-1}$ ; el flujo presenta una configuración divergente en los campos de líneas de corriente. Comparando la Figura 4.15 con la 4.13, hay una tendencia a que los vientos de niveles altos se acoplen con la región de salida del SALLJ, nuevamente consistente con los patrones encontrados por Petters y Shumacher (2014). La interacción es observada también con los valores de omegas negativos que en este Caso 2 sí son observados en la Fig. 4.15(A y B) lo

cual es un indicador de que en la zona de análisis las condiciones sinópticas eran favorables para la convección.

Figura 4.15 Líneas de corriente y magnitud del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) en 250 hPa, y Omegas en 500 hPa ( $\text{Pa s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (B).



En la Figura 4.16 se presenta en análisis realizado del IVT para el Caso 2, con la misma metodología del Caso 1 descrita por Reid y otros (2020) las horas donde la convección estaba presente en la región.

El IVT encontrado en este evento muestra nuevamente la región de Uruguay con valores entre  $500\text{-}750 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ingresando por el oeste de Uruguay (Fig. 4.16 A), y un máximo entre  $750\text{-}1000 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (Fig. 4.16 B) en la zona de estudio. Se observa en este análisis que previo a la hora en que la convección es más intensa y organizada los valores de IVT son menos elevados que a la hora donde la convección es más organizada, mostrando una diferencia con el Caso 1. De todas formas, los valores coinciden en que la región sur de Uruguay estaba siendo influenciada por un fuerte transporte de humedad (pudiendo ser AR), que luego se vio reflejado en la tasa de precipitación registrada por el DCPS de INUMET presentada en la Tabla 4.5.

Figura 4.16 Transporte de humedad vertical integrado en la capa 1000/300 hPA (IVT  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (B).

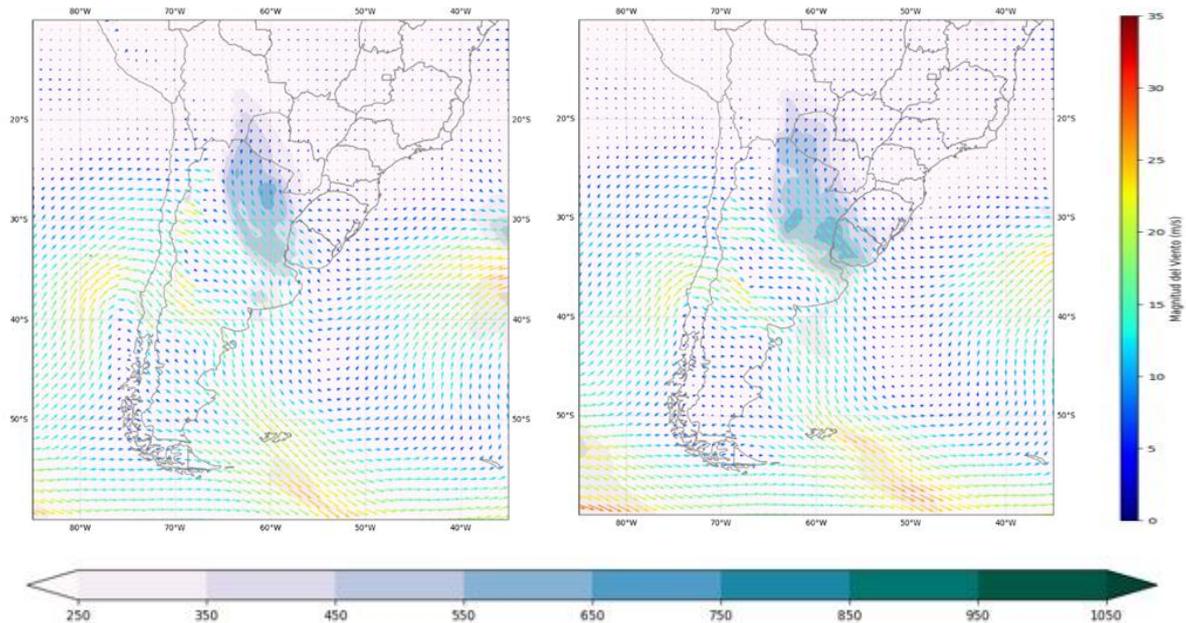
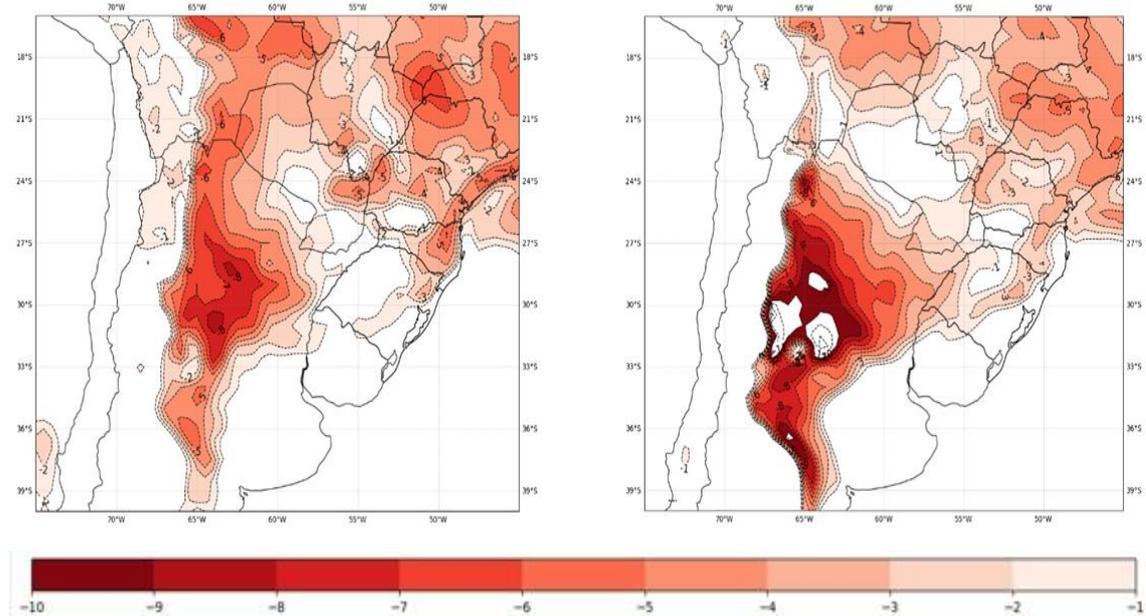


Tabla 4.5 Comparación de IVT con el acumulado de lluvia en 24 hr. para el Caso 2 (07:00 hora local del 13/12/2018 a las 07:00 hora local del 14/12/2018).

Día y horario	IVT	Acumulado de lluvia en SUMU
13/12/2018 18:00 UTC	500-750 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	170 mm
14/12/2018 00:00 UTC	750-1000 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	

Para el análisis de la inestabilidad del ambiente, se analizó el índice Lifted presentado en la Figura 4.17, no encontrándose valores de este índice para ninguno de los horarios seleccionados. Esto puede deberse a que no fue considerado el Lifted más inestable, error en los datos de reanálisis o a que la convección estaba siendo modulada por otros factores.

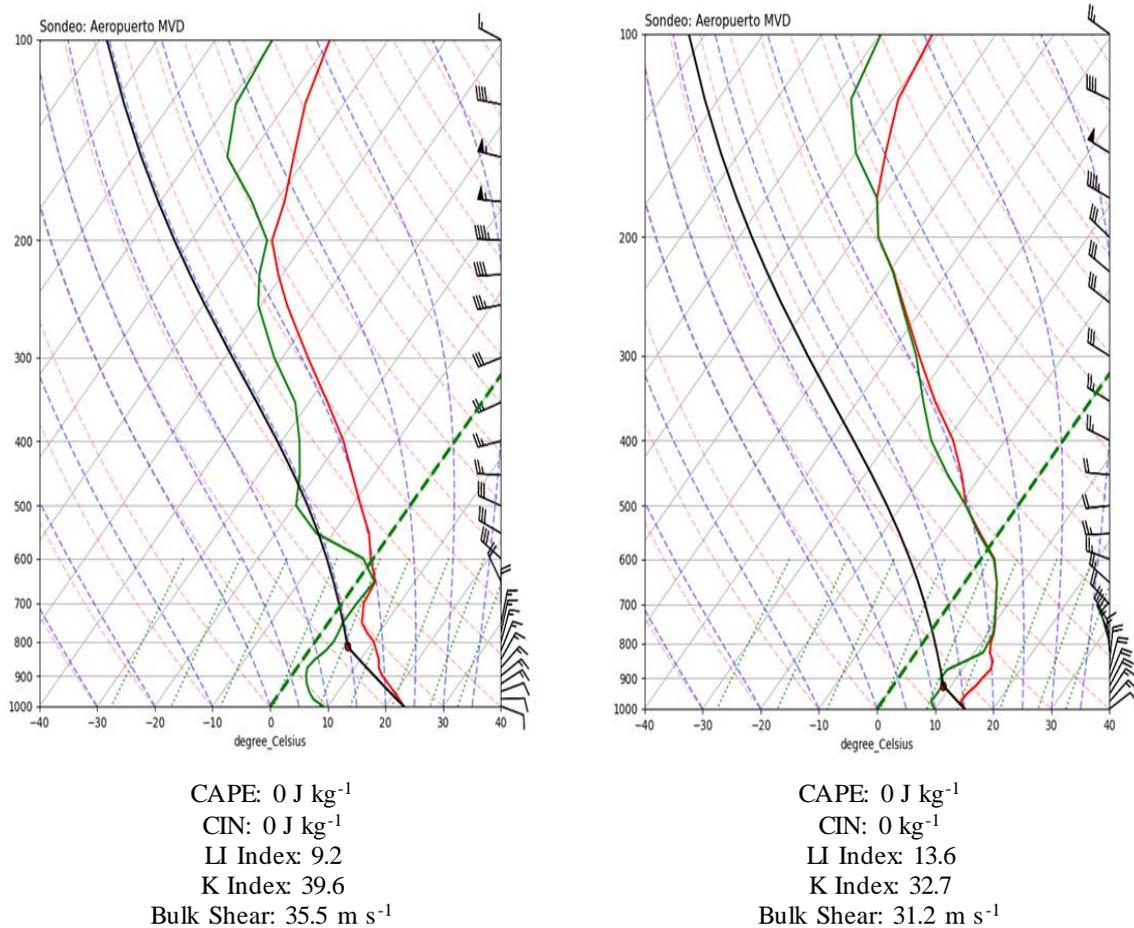
Figura 4.17 Índice Lifted (LI) para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (B).



Para el análisis del perfil vertical de la atmósfera se utilizó para el Caso 2 el mismo método que para el Caso 1, realizando el sondeo para el punto más cercano de la grilla para el Aeropuerto MVD, descritos en la metodología para obtener información complementaria a la ya analizada.

Los resultados del Caso 2 se presentan en la Figura 4.18 (A y B) los valores de Bulk Shear en la capa 0-6 km estuvieron entre 35 y 31  $\text{ms}^{-1}$  pudiendo indicar la presencia de tormentas supercelulares de acuerdo con la literatura, ya que la cizalladura está presente en esta capa y que es uno de los indicativos para la formación de SCM. En relación a la energía disponible para la convección (CAPE) e inhibición (CIN) no se observan en ninguno de los horarios seleccionados, tampoco otros índices de inestabilidad son mostrados. Si nuevamente es observado que los vientos por encima de 700-500 hPa, tienen una componente del oeste en ambos horarios y esto contribuye con la propagación corriente arriba de la convección detectada en las imágenes de satélite para este Caso como los resultados presentados en Anabor (2008) en relación a esta última configuración. Probablemente la convección haya sido modulada por un proceso más dinámico que termodinámico, y posiblemente sea la causa por lo que no se presenta un sondeo inestable termodinámicamente.

Figura 4.18 Sondeo con datos de reanálisis para el punto más cercano de grilla al Aeropuerto MVD para las 18:00 UTC del 13/12/2018 (A) y para las 00:00 UTC del 14/12/2018 (B).



#### 4.4.5 ANALISIS DE IMÁGENES SATELITALES CASO 3

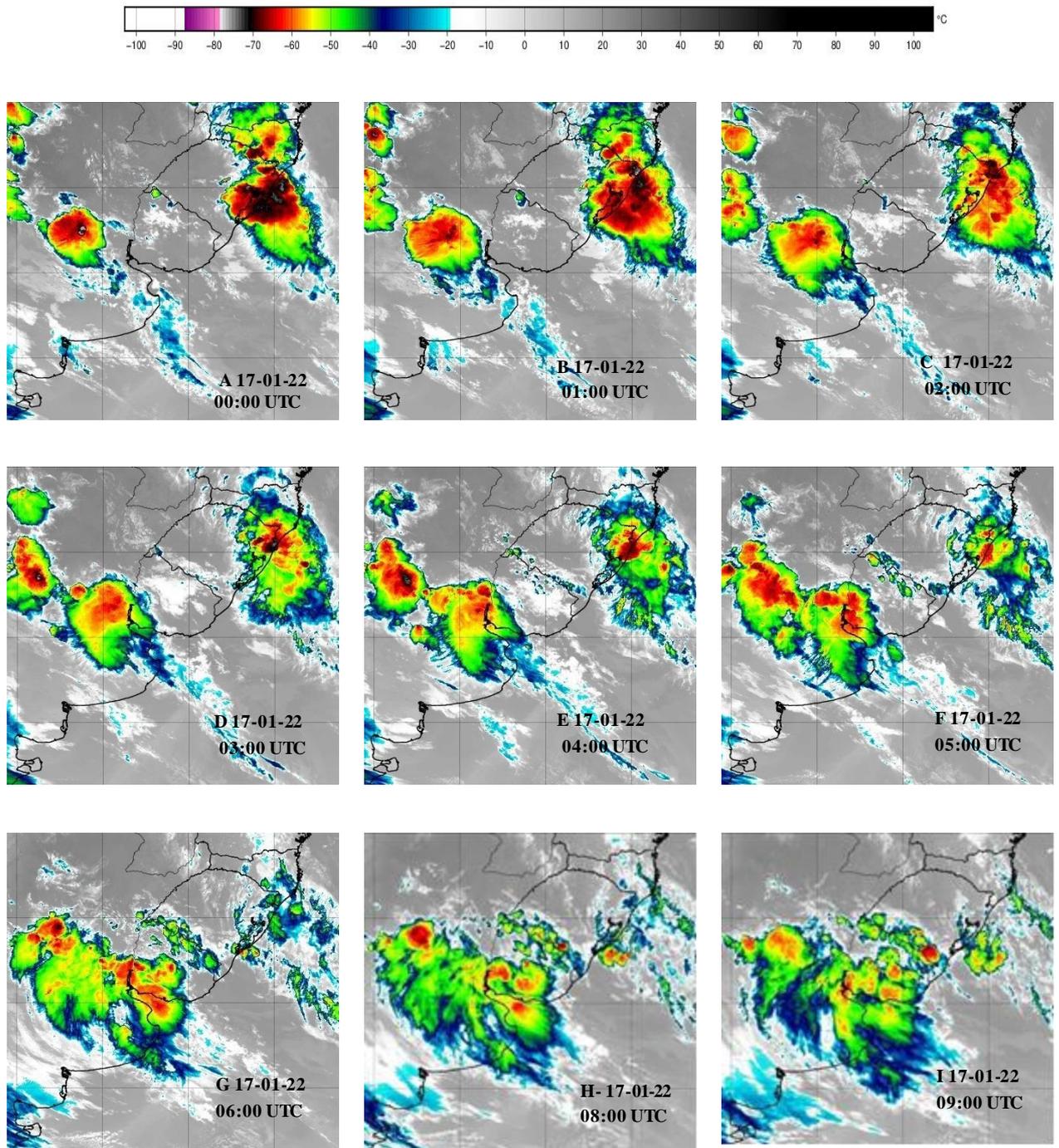
Para ese Caso, fueron descargadas del archivo de CPTEC las imágenes infrarrojas realizadas del satélite Goes-16, con el mismo objetivo del Caso 1 y 2: identificar las estructuras en imágenes satelitales que ocasionaron el evento extremo y evaluar si cumple las características de SCM.

En el Caso 3 se seleccionaron Imágenes Infrarrojas del Canal 13 cada 1 horas, debido a que este evento tuvo una duración menor. El área de estudio aproximada también se extiende entre los  $25^{\circ}\text{S}$  y los  $45^{\circ}\text{S}$  y fue utilizado el mismo criterio de Anabor y otros (2008) en relación a los umbrales de temperatura de topos nubosos:  $-38^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$  y  $-50^{\circ}\text{C}$  utilizados para la identificación de SCM en SESA.

El Caso 3 fue seleccionado conociendo el impacto provocado en el Aeropuerto MVD, donde en menos de una hora llovieron 92 mm provocando demoras en los vuelos y problemas en los accesos al Aeropuerto MVD; además de haber afectado otras regiones del Área Metropolitana de Montevideo, Uruguay con inundaciones repentinas.

En las imágenes presentadas en la Figura 4.19 la convección más intensa inicia nuevamente sobre la región de Argentina, más próximo a los 30-35°S 65-50 °W con temperaturas de tope de nubes entre -40°C y -70°C. Otra vez se observa la región convectiva con un desplazamiento Sur-Sureste, para luego permanecer sobre la región sur de Uruguay algunas horas. En este Caso 3, el cálculo aproximado del área del escudo nuboso de las tormentas en el horario de máxima actividad, determinado a las 05:00 UTC del día 17/01/2022 (Fig. 4.19 H), fue aproximadamente 64.000 km<sup>2</sup>. La convección permaneció más de 9 horas afectando parte de la región de Argentina (ubicada al oeste de Uruguay) y particularmente la zona de interés 6 horas aproximadamente (Figs 4.19 D-I); esta persistencia es diferente a las encontradas en los Casos 1 y 2. Los topes más fríos detectados en las imágenes de satélite (Fig. 4.19) permanecen por debajo de los -60°C durante los horarios seleccionados. Al igual que en los Casos 1 y 2 se evaluó con la metodología de Houze (2004) la posibilidad de SCM identificando el área de precipitaciones en un radio aproximado de 100 km en al menos una dirección. Analizando los datos de lluvia de DCPS de INUMET e (Anexo I, Fig. A3) se destacan los registros de lluvias de los sistemas de tormentas que ingresaron por el suroeste de Uruguay, y que afectaron el Aeropuerto MVD, teniendo en cuenta la distancia ya mencionada entre esa región y el Aeropuerto (100-200 km). Por lo tanto, en este Caso 3 fue verificada la metodología de Houze (2004), además de los criterios establecidos similares a los de Anabor (2008), por lo que puede verificarse la presencia del SCM, algo distinto a los Casos 1 y 2.

Figura 4.19 Secuencia de imágenes satelitales Canal 13 para el Caso 3 (17 de enero de 2022).



Fuente: (CPTEC/INPE Goes-16)

#### 4.4.6 PATRONES SINOPTICOS DEL CASO 3

Para el Caso 3 se utilizó la misma metodología que para los Casos 1 y 2. El SCM fue identificado mediante las imágenes de satélite presentadas en la sección 4.4.5, y para evaluar las condiciones sinópticas asociadas a la convección en horarios donde los SCM ya estaban presentes o en las inmediaciones del área de estudio, se utilizaron los horarios siguientes: :00 UTC y 09:00 UTC (para algunas variables).

En la figuras 4.20 (A), es observado el sistema de baja presión a sotavento de los Andes nuevamente ubicado entre los 25°S a 35°S, al igual que en Caso 1 y 2, la configuración es similar a la NAL (Linchestein 1980; Seluchi, Saulo, Satyamurty, 2003); en este caso en superficie se ve relegado una vaguada en este nivel entre los 30°S a 45°S. Esta configuración difiere del Caso 1 y 2. También en este caso la NAL también contribuye, como ya fue descrito, a la expansión del SALLJ, aportando humedad desde las regiones del norte, lo cual se ve reflejado en 850 hPa, (Fig. 4.20 B), los valores de humedad específica en este nivel en la región sur de Uruguay se encuentran entre 12-14 g kg<sup>-1</sup>; al igual que en los Casos 1 y 2, también son los similares encontrados en los casos estudiados por Jirak y Cotton (2007), y por Rasera (2017). En la Figura 4.20 (C) se representa el campo de magnitud del viento en 850 hPa donde se observa al este de los Andes, entre los 20°S a 30°S y los 60°W a 65°W, magnitud del viento asociados al LLJ entre 20-25 m s<sup>-1</sup> contribuyendo a la advección cálida y húmeda corriente abajo y al sur del LLJ.

En relación a la evaluación de Q en la Figura 4.20 (D) fue utilizada la misma metodología que para los Casos 1 y 2. Los resultados encontrados no muestran convergencia de Q en la región al sur de Uruguay, sí en donde las primeras tormentas comienzan su intensificación entre los 30°S-60°W. De todas formas, se hizo la comparación de Q con el acumulado de precipitación que se presenta en la Tabla 4.4, recordando que este Caso 3 los valores de lluvia ocurrieron en una hora en la Estación SUMU del Aeropuerto MVD.

En relación a este caso, la configuración sinóptica se encuentra más asociada a las encontradas por Petters y Shumacher (2014) en la cual marcan la presencia de un frente quasi-estacionario, característico de la estación caliente, el cual el aire húmedo e inestable, asociado al SALLJ interacciona con la corriente en chorro de niveles altos (que se mostrará en las imágenes siguientes), esto proporciona un ambiente favorable para la cizalladura del viento;

estas condiciones son las que posiblemente contribuyeron en los horarios siguientes al desarrollo convectivo en la región donde está ubicado el Aeropuerto MVD.

Figura 4.20 Presión atmosférica a nivel medio del mar cada 1 hPa (A); Geopotencial en 850 hPa (mgp), humedad específica para el mismo nivel ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (B) y magnitud del viento para el mismo nivel (C); Flujo vertical integrado Q en la capa 1000/850 hPa ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) (D) para el día 17/01/2022 a las 00:00 UTC.

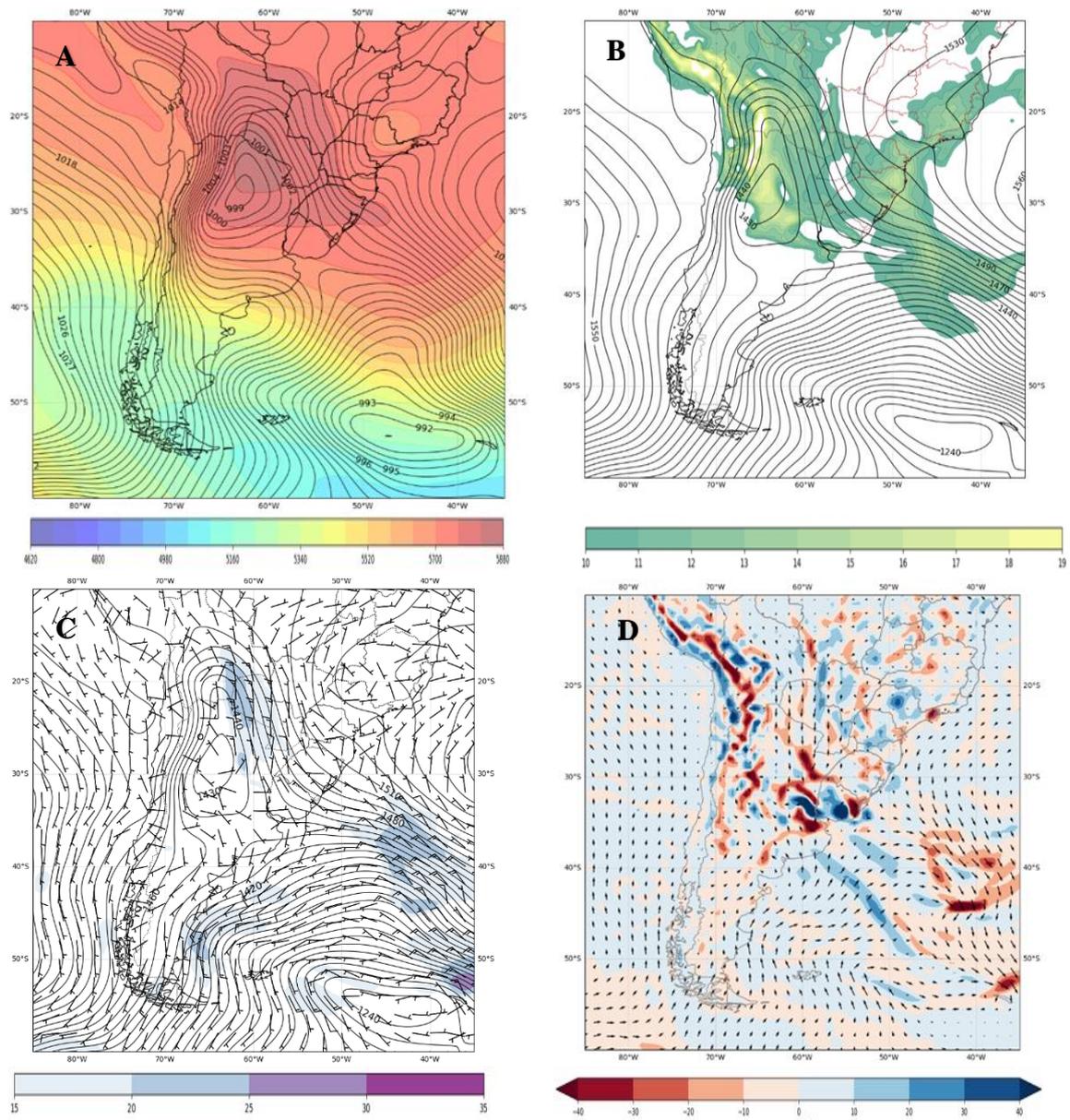


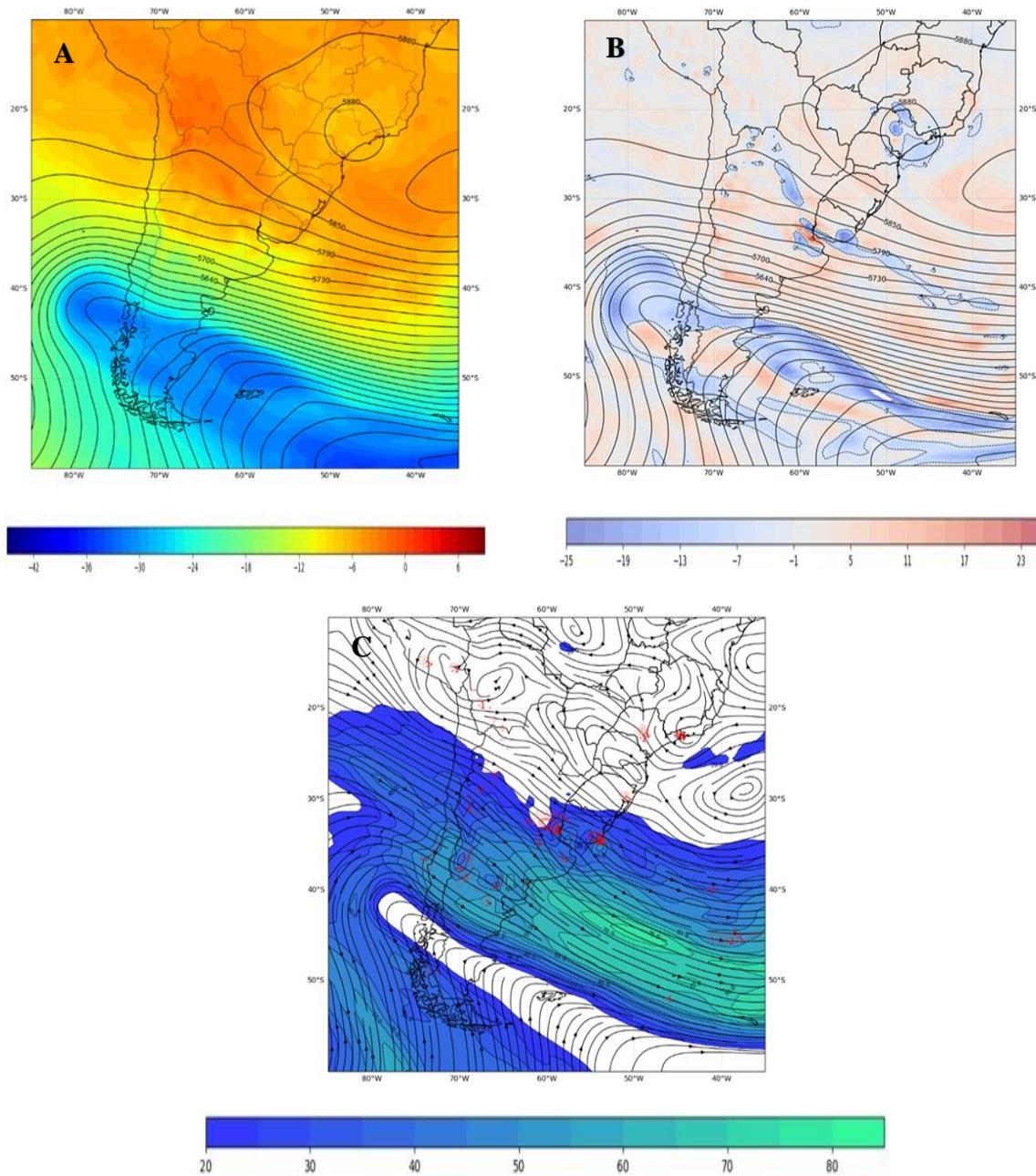
Tabla 4.6 Comparación de Q con el acumulado de lluvia para el Caso 3.

Día y Horario	Q	Lluvia en SUMU (en este caso en una hora)
17/01/2022 00:00 UTC	10-20 kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	92 mm

En niveles medios, el contraste térmico nuevamente entre los 30°- 40°S marcando la presencia de una fuerte zona baroclínica en la región (Figs. 4. 21 A). En relación a la vorticidad (Figs. 4.21 B) se observan valores menos positivos en la zona de análisis entre -7 y -13 Pa s<sup>-1</sup>, esta región es donde la afectación del SCM en las horas posteriores tiene mayor impacto en cuanto a los fenómenos meteorológicos reportados. Al igual que en Caso 1 y 2, el patrón de circulación a escala sinóptica concuerda con la teoría quasi-geostrófica, y evaluando las temperaturas en 500 hPa, donde nuevamente la advección cálida en este nivel está presente sobre Uruguay, contribuye en profundizar la vaguada e intensifica las bajas presiones, provocando valores de vorticidad negativa.

En relación al campo de 250 hPa y de Omegas en 500 hPa para el Caso 3 (Fig. 4.20 C) los valores de magnitud del viento encontrados en la región de análisis al sur de Uruguay son entre 40-50 m s<sup>-1</sup>; también presentando configuración divergente en los campos de líneas de corriente. En este caso no se encuentra tan marcado como en los anteriores la tendencia hacia el acople de vientos de niveles altos con niveles bajos, puede deberse a los horarios elegidos para el análisis de este evento, de todas formas la configuración muestra una tendencia hacia los patrones encontrados por Petters y Shumacher (2014), además observando los omegas en 500 hPa (Fig. 4.20 C) donde indican regiones de ascenso tanto en el suroeste y este de Uruguay, es un indicador de que en la zona de análisis las condiciones sinópticas eran favorables para la convección.

Figura 4.21 Geopotencial en 500 hPa (mgp) y temperatura en el mismo nivel (°C) (A); Geopotencial (mgp) y vorticidad en 500 hPa ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (B); Líneas de corriente y magnitud del viento ( $\text{ms}^{-1}$ ) (C) para el día 17/01/2022 a las 00:00 UTC.



La Figura 4.22 presenta en análisis realizado del IVT para el Caso 3 con la misma metodología del Caso 1 y 2 descrita por Reid y otros (2020) en las horas previas al inicio de la convección en la región analizada.

El IVT encontrado en este evento muestra valores entre  $250\text{-}350 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ingresando por el oeste de Uruguay a las 00:00 UTC (Fig. 4.22), difiere bastante de los otros casos

analizados; posiblemente porque las características de este SCM de acuerdo a las imágenes de satélite presentadas en la sección 4.4.5 no presenta una organización importante en relación a los Casos 1 y 2. De todas formas, y de acuerdo a las investigaciones realizadas, la región sur de Uruguay podría estar siendo influenciada por un transporte de humedad (posiblemente AR) no tan intenso como los Casos 1 y 2, y que luego se vio reflejado en la tasa de precipitación registrada en una hora de acuerdo a los datos presentados en la Tabla 4.7.

Figura 4.22 Transporte de humedad vertical integrado en la capa 1000/300 hPa (IVT  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) para el día 17/01/2022 a las 00:00 UTC.

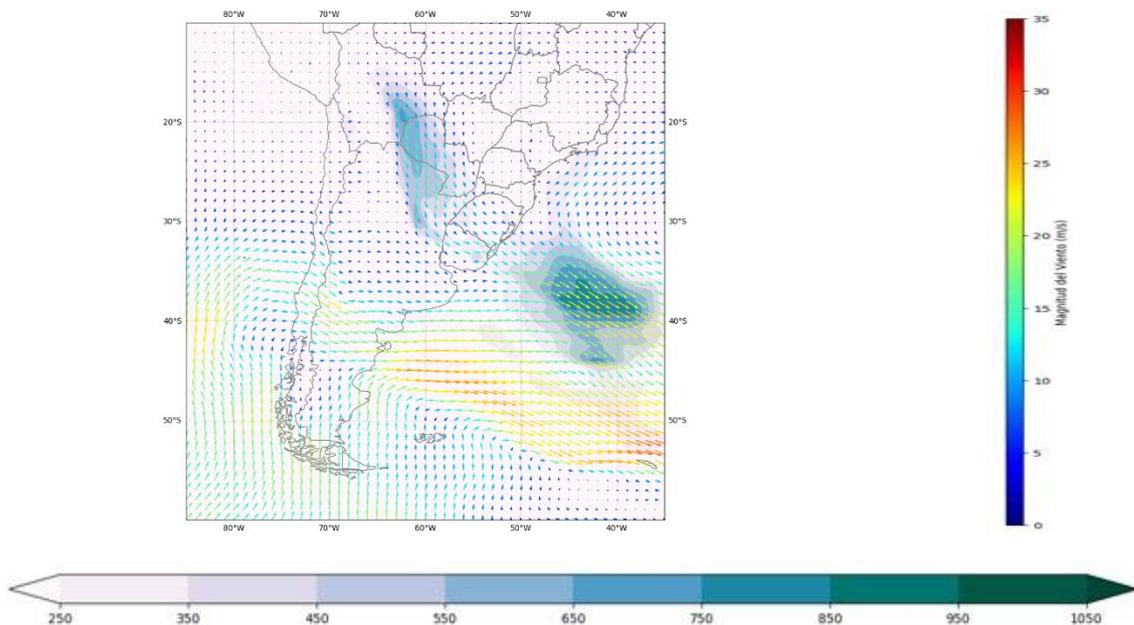


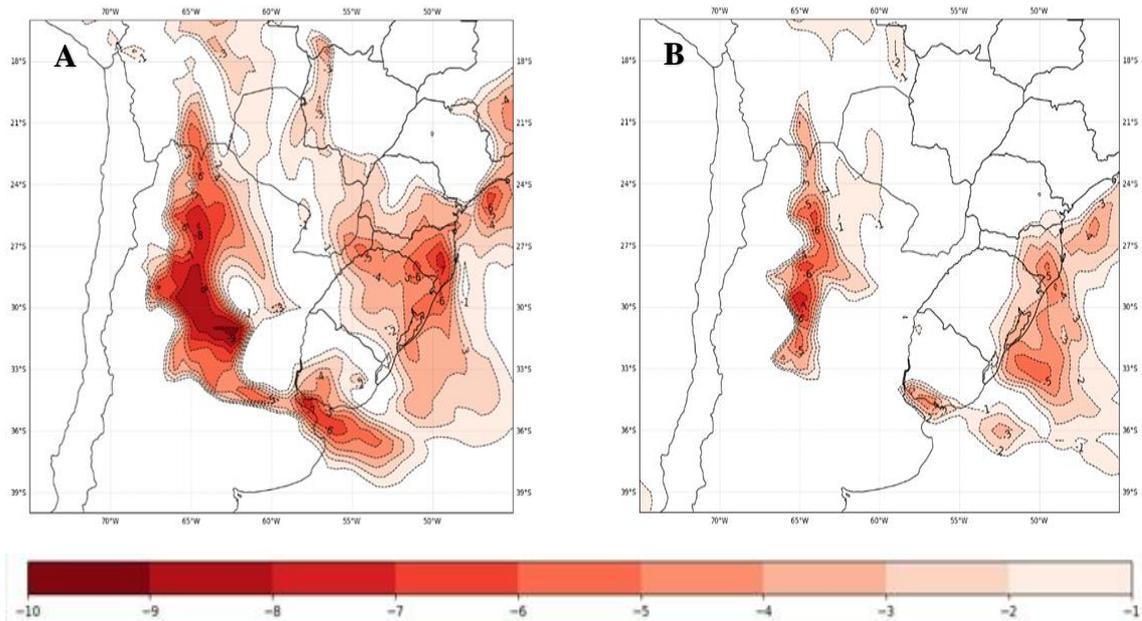
Tabla 4.7 Comparación de IVT con el acumulado para el Caso 3.

Día y horario	IVT	Acumulado de lluvia en SUMU (en una hora)
17/01/2022 00:00 UTC	250-350 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	92 mm

Al igual que en los Casos 1 y 2 la inestabilidad del ambiente fue reanalizada con los datos del índice LI (Fig. 4.23). En la región al sur de Uruguay los valores del LI estuvieron entre -4 y -6 en el horario de las 00:00 UTC (Fig. 4.23 A), y entre -3 y -5 en el horario de las 09:00 UTC (Fig. 4.23 B), observando un comportamiento del LI con valores más negativos en los inicios de la organización de la convección y menos negativos (al igual que en el Caso 1) cuando había mayor organización del sistema de tormentas. Este comportamiento de este índice

fue descrito por Anabor (2008), con valores más negativos al inicio de la convección y menos negativos cercanos a la hora de desarrollo de la misma.

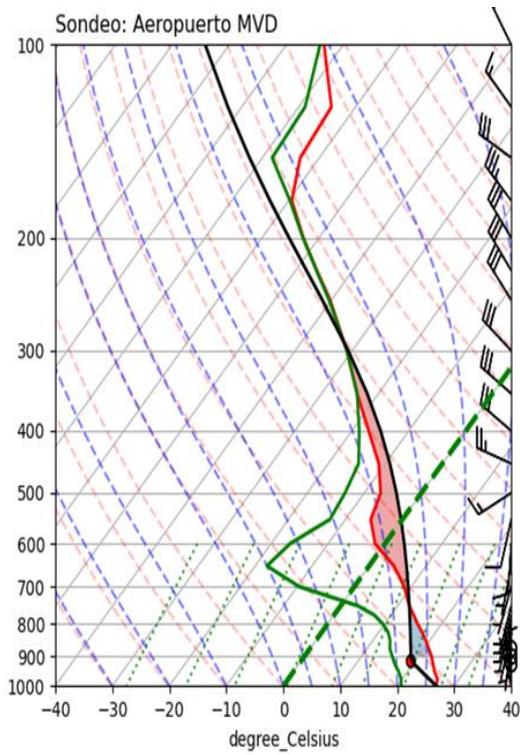
Figura 4.23 Índice LI para las 00:00 UTC del 17/01/2022 (A) y para las 09:00 UTC del 17/01/2022 (B).



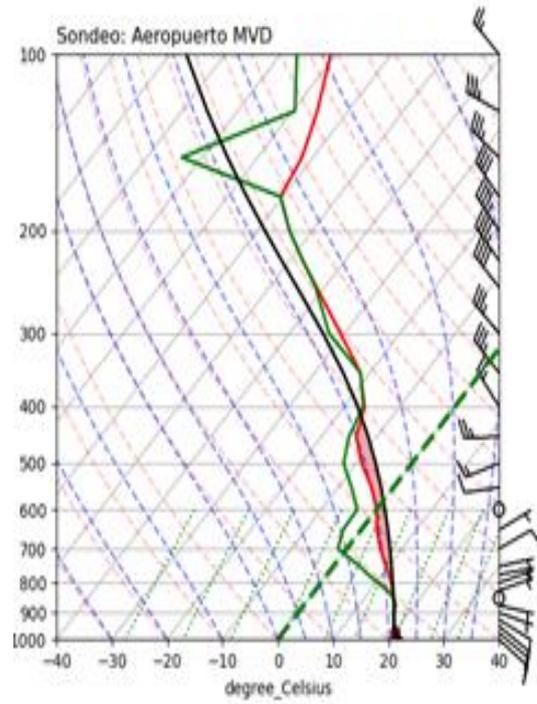
Para el análisis del perfil vertical de la atmósfera fue utilizada la metodología del Caso 1 y 2, realizando los sondeos con datos de reanálisis, utilizando el punto más cercano de la grilla para el Aeropuerto MVD, descritos en la metodología para obtener información complementaria a la ya analizada.

Los resultados para el Caso 3 se presentan en la Figura 4.24(A y B) los valores de Bulk Shear en la capa 0-6 km estuvieron entre  $19.5$  y  $28.8 \text{ ms}^{-1}$  pudiendo indicar la presencia de tormentas supercelulares de acuerdo con la literatura, que como ya fue mencionado, la cizalladura presente en esta capa es uno de los indicativos para la formación de SCM. En relación a la energía disponible para la convección (CAPE) en el horario de las 00:00 UTC (Fig. 4.24 A) el valor de CAPE es de  $728 \text{ j kg}^{-1}$  con una inhibición (CIN) de  $-120.5 \text{ j kg}^{-1}$ ; para las 09:00 UTC (Fig. 4.24 B) el valor se reduce a  $366.7 \text{ j kg}^{-1}$  con un CIN de  $-1.1 \text{ j kg}^{-1}$ . Los vientos por encima de 700-500 hPa, tienen una componente del oeste en el horario de las 00:00 UTC, no así en el de las 09:00 UTC. Por lo que en este Caso 3 no está tan marcada la propagación corriente arriba de la convección encontrada si en los Casos 1 y 2.

Figura 4.24 Sondeo con datos de reanálisis para el punto más cercano de grilla al Aeropuerto MVD para las 00:00 UTC del 17/01/2022.



CAPE: 728 J kg<sup>-1</sup>  
 CIN: -120.5 J kg<sup>-1</sup>  
 LI Index: -2.8  
 K Index: 21.1  
 Bulk Shear: 19.6 m s<sup>-1</sup>



CAPE: 366.7 J kg<sup>-1</sup>  
 CIN: -1.1 J kg<sup>-1</sup>  
 LI Index: -2.5  
 K Index: 32.0  
 Bulk Shear: 29.8 m s<sup>-1</sup>

#### 4.4.7 DESEMPEÑO DEL SA-MCS Index

Utilizando los datos de reanálisis del NCEP NCEP Climate Forecast System CFSv2 (Saha, 2014), se generaron los mapas del SA-MSC Index desarrollado por Rasera (2017) con la diferencia de que para este trabajo se optó por rescribir el script, inicialmente realizado con NCL, para ser utilizado con el lenguaje de programación Python.

El objetivo en esta sección es mostrar los resultados de reanálisis del SA-MCS Index, con énfasis en Uruguay, en la detección potencial de SCM, una vez analizados los ambientes sinópticos, y para colaborar con las OVM-OMA tanto en el pronóstico como en la vigilancia meteorológica de eventos adversos que pueden tener un impacto en la aviación, contar con un indicativo de potencial formación de SCM es de extrema importancia no solamente para la preparación de los avisos y pronósticos específicos, sino también para otorgar a los usuarios (en este caso pilotos, despachantes, y personal del aeropuerto) información con mayor exactitud.

En general, con énfasis en el sur de Uruguay, el SA-MCS Index indicó potencial desarrollo de SCM en la región (Figs. 4.25, 4.26, 4.27) superando en todos los casos seleccionados el límite identificado por Rasera (2017) para el sur de Brasil en relación a la discriminación entre convección organizada y no organizada de  $-1.40$ . En los horarios reanalizados con los datos de modelo para los tres casos, los valores de SA-MCS Index, concretamente en la zona del Aeropuerto MVD, estuvieron dentro del rango  $-0.12$  a  $2.74$ , por lo que la zona donde la convección fue organizada fue bien identificada por el índice. Para poder identificar valores más específicos del SA-MCS Index en esta región es necesario realizar análisis de más casos donde SCM fueran identificados, esto permitiría generar una estadística del desempeño del índice concretamente para esta zona de SESA y obtener los valores más óptimos para la región más al Sur, además serviría a los pronosticadores tener mayor precisión en la previsión de estos SCM que pueden provocar tiempo severo con los impactos que se han visto en este trabajo.

Figura 4.25 SA-MCS Index para el del día 15 de abril de 2016 a las 18:00 UTC (A) y para el 16 de abril de 2016 a las 00:00 UTC (B).

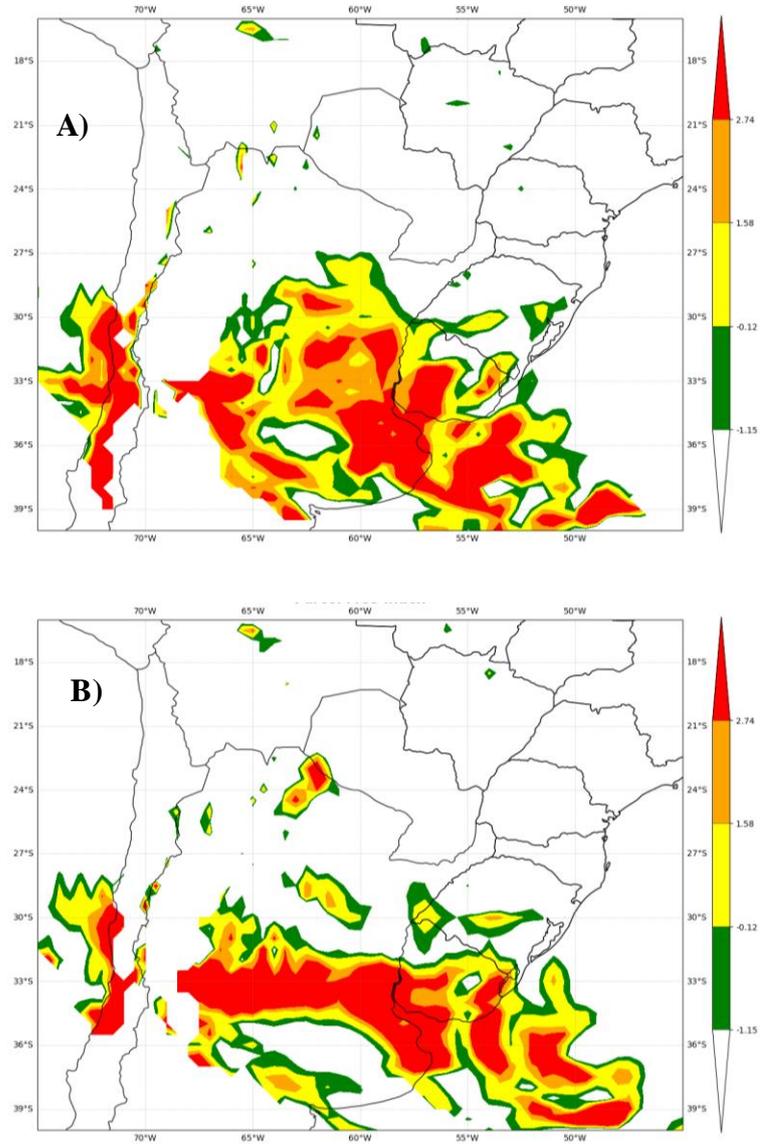


Figura 4.26 Como en 4.25 para el 13/12/2018 (A); y 14/12/2018 00:00 UTC (B).

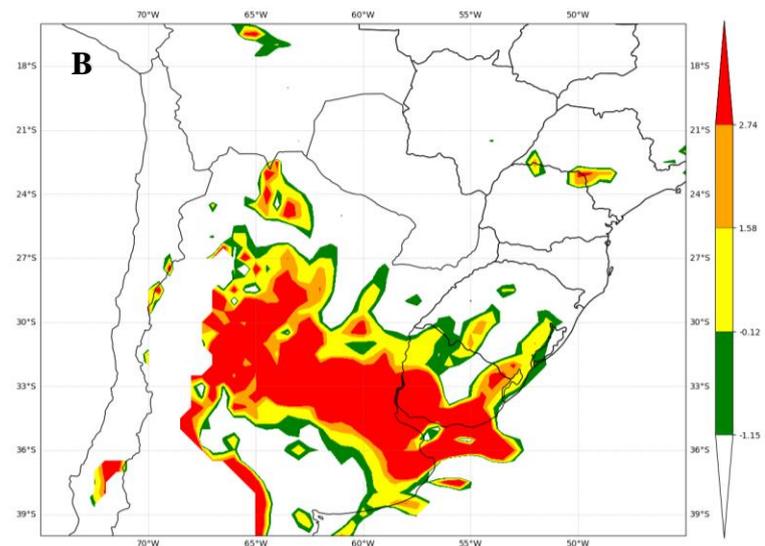
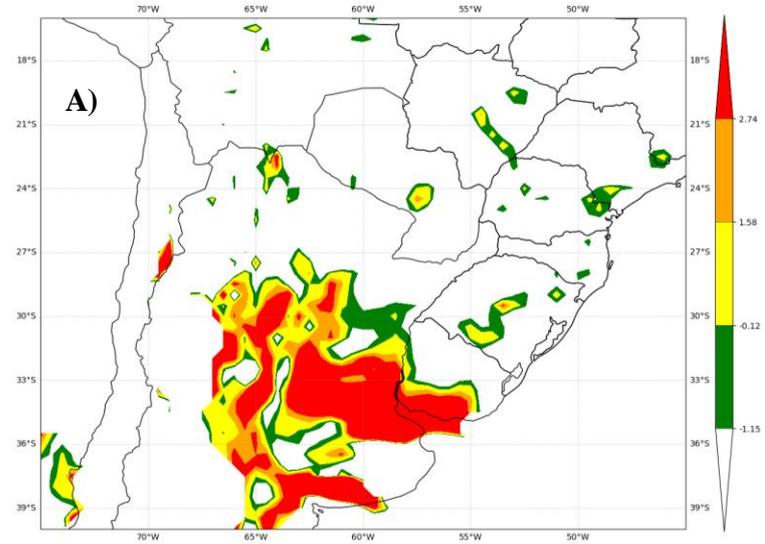
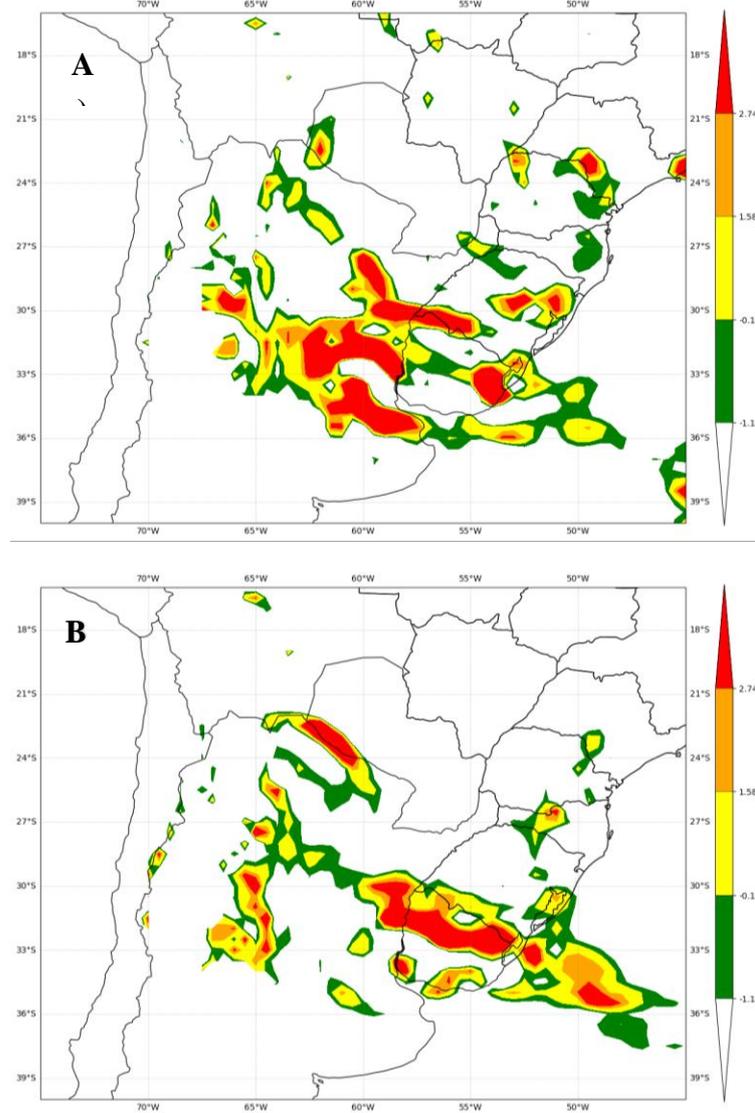


Figura 4.27 Como en 4.25 para el 17/01/2022 a las 00:00 UTC (A) y 09:00 UTC del mismo día (B).



Con el objetivo de evaluar el valor del SA-MCS Index en el punto más cercano de grilla al Aeropuerto MVD utilizando el método de interpolación triangular, dado que este método es uno de los más recomendados para la interpolación espacial (Lobaina Beatón, Fuentes, 2014), se obtuvieron los valores del índice para los casos seleccionados y en horarios detallados en la metodología (Tabla 4.1).

Para el Caso 1, el valor del índice a las 18:00 UTC en las horas previas a la formación del SCM más intenso ya indicaba un valor de 1.40, recordando que este es el límite identificado por Rasera (2017) para la convección organizada de la no organizada, para las 00:00 UTC alcanza un umbral de 1.74, indicando un alto potencial de formación de convección organizada, recordando que en este evento los acumulados de precipitación fueron de 100 mm.

Para el Caso 2, aquí se encuentran algunos detalles. El valor del índice en Aeropuerto MVD para las 18:00 UTC es de 12.89 y para las 00:00 UTC de 5.87. Recordando que este evento provocó un acumulado de lluvias de 170 mm. Una hipótesis de porqué el valor del índice es tan elevado en este caso es que la convección podría estar modulada más por un proceso dinámico que termodinámico, ya que no se visualizan valores de Lifted y CAPE en el sondeo; en el análisis sinóptico se destaca una zona de fuerte levantamiento, y hay presencia de velocidad vertical cercano a Uruguay en 500 hPa (mostrando la componente dinámica) que se encuentra corriente abajo de la vaguada. Por otro lado, analizando las componentes del SA-MCS Index sí se nota una fuerte cizalladura en la capa 0-6 km, con valores que difieren ampliamente de los otros casos analizados. Por lo tanto, es posible que en este caso si bien no se visualiza valores de LI negativos (condición que está contemplada dentro del cálculo del índice) sí existe una fuerte componente dinámica que podría estar influenciando a que el valor sea tan alto. Una recomendación para futuras investigaciones es evaluar una correlación entre valores elevados de índice, sin la presencia de LI, y los eventos de lluvia extrema

Para el Caso 3, se encuentra una relación entre los valores encontrados en los cálculos mapeados (Fig. 4.34 A y B) y los valores hallados en el punto de grilla más cercano, 1.0 a las 00:00 UTC (momento en que la convección en el aeropuerto no había iniciado) y de .078 en el momento de máxima precipitación (recordando que este evento provocó 92 mm en menos de 1 hora alrededor de las 09:00 UTC).

Tabla 4.8. SA-MCS Index en el punto más cercano de grilla al Aeropuerto MVD.

CASOS	15/04/2016 18:00 UTC	16/04/2016 00:00 UTC	13/12/2018 18:00 UTC	14/12/2018 00:00 UTC	17/01/2022 00:00 UTC	17/01/2022 09:00 UTC
SA-MCS Index	1.4	1.74	<b>12.89</b>	<b>5.87</b>	1.0	0.78
Fenómenos reportados	100 mm durante el evento. Tormentas		<b>170 durante el evento. Tormentas, granizo, ráfagas de viento.</b>		92 mm en una hora. Tormentas	

## 5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La estacionalidad y ciclo horario de los eventos de tormentas utilizando los datos de las observaciones meteorológicas convencionales de la estación SUMU, perteneciente al Aeropuerto MVD, durante el período 2015-2020 mostraron una clara tendencia a reportarse en la estación cálida del hemisferio sur, mayormente entre las 20:00 y las 05:00 hora local. Sin embargo, pueden ocurrir eventos en otros horarios, como es el Caso 1 y 2, donde el inicio de la convección comenzó en horas del mañana próximo a las 12:00 UTC (Figs. 4.3 y 4.11), de todas formas, la tendencia es hacia la nocturnidad. Estos resultados son coincidentes, como era de esperarse, con la literatura tanto a nivel mundial (Shumacher; Rasmussen, 2020) como en América del Sur (Rasera y otros, 2018).

Para el análisis sinóptico, la opción de utilizar únicamente datos de reanálisis se debió al hecho de que si bien Uruguay posee una red de observaciones meteorológicas amplia no dispone de datos de radar meteorológico y/o de herramientas para el análisis del perfil vertical de la atmósfera. De este reanálisis de los Casos 1, 2 y 3 se destacan configuraciones sinópticas semejantes: presencia de la NAL, vaguada de onda corta y presencia del LLJ y de la corriente en chorro de niveles altos. Una observación importante es que en los Casos 1 y 2 el tiempo de vida del SCM supero las 18 hs; los vientos del sondeo por encima de 700-500 hPa mostraron una componente del oeste, esto contribuyo a la propagación corriente arriba de la convección que fue detectada en las imágenes de satélite. Esta propagación ha sido encontrada en otros casos analizados en SESA por Anabor (2008) y es semejante a los resultados encontrados por Porter y otros (1955) Stensrud y Fritsch (1993) en Estados Unidos. Este tipo de SCM seriales ya han sido documentado en SESA en los resultados encontrados por Anabor (2008), pudiéndolos relacionar con SCM en serie los cuales comienzan a formarse en la región de la Cuenca del Plata, iniciando como convección individual y, generalmente, desplazando se hacia el este con el flujo de niveles medios (Anabor; Stensrud; Moraes, 2008).

En relación al desempeño del SA-MCS Index, es importante resaltar que el índice fue readaptado para América del Sur, y que si bien Uruguay se encuentra comprendido dentro de esta región, y dentro de la climatología realizada por Rasera (2017), como el Área Metropolitana de Montevideo se encuentra en la región costera (y también el Aeropuerto MVD), se encontró interesante testear si había un buen desempeño del índice, ya que en esta región de SESA también se ha evidenciado la ocurrencia de SCM.

En estos tres casos seleccionados, la performance del índice fue óptima en la zona de análisis detectando, con datos de modelado numérico, que con valores superiores a  $-0.12$  SCM fueron identificados. Sin embargo, es importante resaltar que también se detectaron valores del índice elevados en zonas donde no se visualizaron SCM en las horas seleccionadas, aunque si en las posteriores. Otro detalle importante a resaltar es que los valores más elevados del SA-MCS Index se encuentran en el lado oeste de la ubicación de los máximos de viento del LLJ, así como también en las áreas donde hay mayor convergencia de Q y valores de IVT. Otra información relevante es que en todos los casos los SCM ocasionaron tiempo severo, ya sea por altas tasas de precipitación: 100 mm en el Caso 1, 170 mm en el Caso 2 y 92 mm en el Caso 3, superando lo esperable para los meses en que ocurrieron los eventos en la estación SUMU de acuerdo a la Climatología 1991-2020 (INUMET, <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/graficas-estadisticas-pluviometricas>) además de haber ocasionado granizo, rachas de vientos. Por lo tanto, teniendo en cuenta que además de las condiciones sinópticas si existe un valor de SA-MCS Index que alcanza un umbral 1,56-2.74, o lo supera, puede ser un indicador de tiempo severo y alertar a los pronosticadores de las OVM y OMA a preparar pronósticos y avisos con mayor eficiencia.

## 6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se analizaron los campos sinópticos de tres eventos meteorológicos provocados por SCM encontrando patrones sinópticos similares: presencia de la NAL, vaguada de onda corta en los niveles atmosféricos seleccionados, presencia del LLJ y de la corriente en chorro de niveles altos. Los campos de Q e IVT calculados para los casos estudiados dieron como resultado que con valores de IVT  $750-1000 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  y de Q entre  $-20$  y  $-30 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  las tasas de precipitaciones en la Estación SUMU superaron los 100 mm.

Los SCM de los Casos 1 y 2 presentaron características muy similares a los SCM en serie encontrados para SESA, estos sistemas tuvieron una propagación hacia el este con el flujo de nivel medio.

Los resultados del desempeño del SA-MCS Index calculado para los Casos 1, 2 y 3 indicaron que con valores mayores a  $-0.12$  SCM fueron identificados en la zona analizada.

Otro resultado a destacar es que los cálculos del SA-MCS Index para el punto más próximo de grilla al Aeropuerto MVD estuvieron por encima de 1.0, y los tres SCM provocaron tiempo severo. Se destaca también que cuando el SCM fue modulado por un proceso mayormente dinámico el SA-MCS Index tuvo su máximo valor (12.8) siendo el Caso 2 el que genero mayor tasa de precipitación.

Con los resultados presentados en esta tesis se reafirma la importancia de la verificación de índices que permitan pronosticar con antelación los eventos provocados por SCM. De esta forma es posible otorgar a las oficinas de pronóstico herramientas para mitigar los riesgos ocasionados por SCM para garantizar la Seguridad de las Operaciones Aéreas.

## **7. RECOMENDACIONES**

Continuar con los análisis de los otros datos presentados en la Tabla 3.2, evaluar las condiciones sinópticas, de inestabilidad y el desempeño del SA-MSC Index, puede ser un trabajo a futuro por varias razones, una de ellas es la de lograr atribuir grados de probabilidad a los umbrales del índice y poder identificar eventos de SCM con altas tasas de precipitación, teniendo presente los resultados encontrados en este trabajo; por otra parte realizar una evaluación con mayor profundidad de los SCM con propagación en serie en la región más al sur de SESA; realizar mayores estudios de los campos de Q e IVT para evaluar umbrales más específicos para esta región y realizando una comparación más profunda con las tasas de precipitaciones asociadas a SCM, más aun teniendo presente el contexto actual de Cambio Climático, y que los análisis recientes muestran tendencias positivas al incremento e intensificación de los SCM, aumentando también su tiempo de vida (Shumacher, 2020) y enfocando en el transporte en general, que es afectado por las condiciones del tiempo y eventos severos, el cambio climático muestra una tendencia al incremento de estos eventos en lo que refiere a parámetros, frecuencia e intensidad (Gössling y otros, 2023), por lo que una buena previsión de estos sistemas, enfocado en la seguridad de las operaciones aéreas seria de gran utilidad, no solamente para minimizar el riesgo y salvaguardar las vidas humanas sino también para minimizar los costos operacionales.

## ANEXO – DATOS Y FIGURAS ADICIONALES

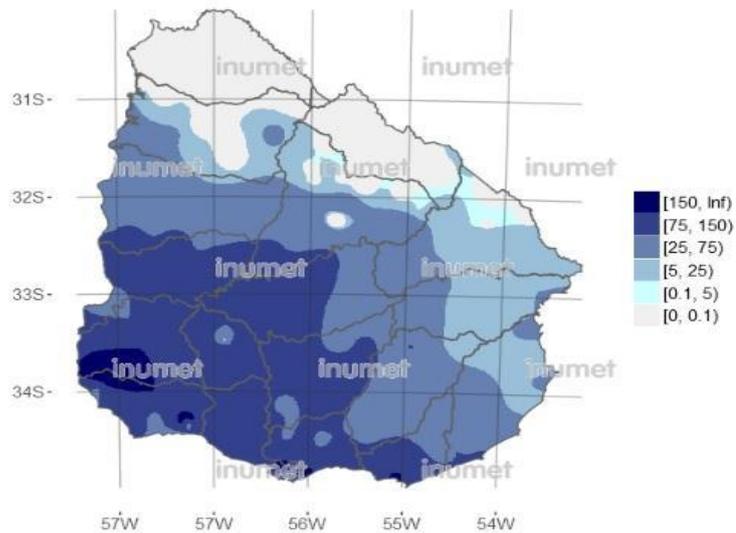
Figura A1 Análisis de precipitaciones del Caso 1

**Precipitación Diaria Acumulada analizada por Día y acumulados**

Principales localidades afectadas		15/04/2016	16/04/2016	17/04/2016	18/04/2016	19/04/2016	20/04/2016	21/04/2016	22/04/2016	23/04/2016	Total
Baltasar Brum	Artigas	0,0	0,0	43,0	42,0	239,0	100,0	24,0	0,0	6,0	454,0
San Jorge	Durazno	0,0	190,0	109,0	13,0	39,0	56,0	0,0	0,0	0,0	407,0
Sequeira	Artigas	0,0	0,0	50,0	65,0	178,0	47,0	12,0	0,0	55,0	407,0
Ismael Cortinas	Flores	230,0	72,0	70,0	3,0	21,0	4,0	0,0	0,0	0,0	400,0
Manuel Artigas Mal Abrigo	San José	215,0	112,0	40,0	5,0	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	394,0
Rocha	Rocha	186,6	112,7	40,2	11,8	1,9	10,3	0,0	0,0	0,0	364,0
Cerro Chato	Durazno	0,0	85,0	152,0	25,0	35,5	66,0	0,0	0,0	0,0	362,5
Mataojo	Maldonado	130,0	150,0	47,0	17,0	5,0	8,0	0,0	0,0	0,0	357,0
La Paloma	Durazno	0,0	88,0	126,0	15,0	46,0	72,0	0,0	0,0	0,0	347,0
Rocha Valsala	Rocha	166,0	109,2	41,6	13,0	1,8	11,3	0,2	0,0	0,8	343,9
Charqueada	Artigas	0,0	0,0	30,0	15,0	175,0	72,0	8,0	0,0	42,0	342,0
Mansavilagra	Florida	7,0	111,0	162,0	14,0	22,0	21,0	0,0	0,0	0,0	337,0
Garzon	Maldonado	217,0	52,0	50,0	3,0	3,0	10,0	0,0	0,0	0,0	335,0
Cap. del Sauce	Florida	100,0	72,0	101,0	17,0	20,0	24,0	0,0	0,0	0,0	334,0
Tranqueras	Rivera	0,0	0,0	21,0	32,0	153,0	60,0	14,0	0,0	53,0	333,0
Coronilla	Maldonado	140,0	120,0	42,0	15,0	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	332,0
Colonia Miguelete	Colonia	250,0	24,0	40,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	324,0
Cuaró	Artigas	0,0	0,0	73,0	22,0	52,0	41,0	21,0	0,0	114,0	323,0
Rosell y Rius	Durazno	0,0	10,0	225,0	10,0	44,0	31,0	0,0	0,0	0,0	320,0
Paso Campamento	Artigas	0,0	0,0	60,0	40,0	143,0	38,0	18,0	0,0	21,0	320,0
Chileno	Colonia	240,0	14,0	32,0	4,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	315,0
Conchillas	Colonia	200,0	70,0	30,0	2,0	10,0	1,0	0,0	0,0	0,0	313,0
Estacion Ataques	Rivera	0,0	0,0	31,0	20,0	145,0	40,0	31,0	0,0	45,0	312,0
Pintado Grande	Artigas	0,0	0,0	73,0	83,0	49,0	33,0	7,0	0,0	65,0	310,0

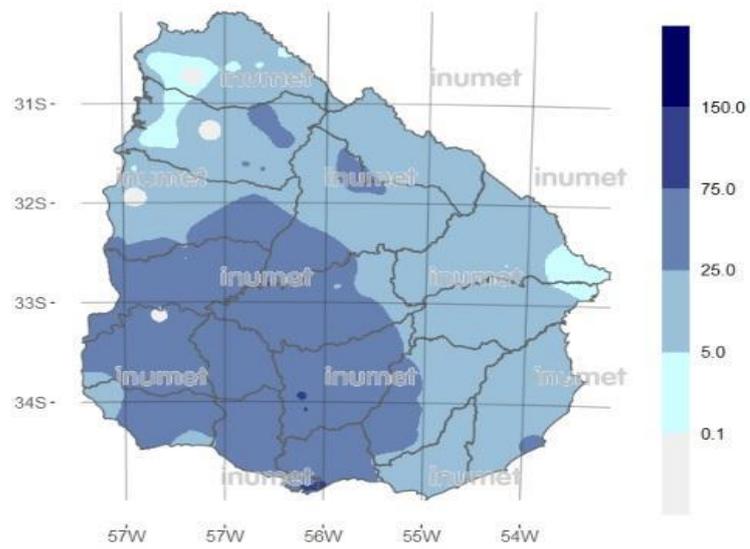
Fuente: ([https://inuket.gub.uy/reportes/noticias/docs/pdf/rpp/210\\_63893.pdf](https://inuket.gub.uy/reportes/noticias/docs/pdf/rpp/210_63893.pdf))

Figura A2 Análisis de precipitaciones del Caso 2: acumulado de lluvia a las 07:00 hora local del 14/12/2018.



Fuente: <https://www.inuket.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>

Figura A3 Análisis de precipitaciones Caso 3: acumulado de lluvia a las 07:00 hora local del 17/01/2022.



Fuente: ( <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>)

## BIBLIOGRAFIA

ABBAS, I. I., OJO, J. K., & IGBRU, P. A. 2012: **The impacts of extreme weather and climate events for the aviation environment**. *Ecology & Management*, 1(1), 12-20.

ALLEN, J. **Climate Change and Severe Thunderstorms**. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Retrieved 8 Dec. 2018, from <https://oxfordre.com/climatescience/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-62>

ALTINGER de Schwarzkopf, M. L. (1988). *Climatologia de los efectos de la conveccion severa en la Republica Argentina (Doctoral dissertation*, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).

ANABOR, V. 2008: **Sistemas Convectivos de Mesoescala no Sul da America do Sul-propagação em série contra o escoamento em baixos niveis**. Tese de Doutorado.

ANABOR, V., STENRSURD, D. J., & De MORAES, O. L. (2008). **Serial upstream-propagating mesoscale convective system events over southeastern South America**. *Monthly weather review*, 136(8), 3087-3105

ANDERSON, C. J., and R. W. ARRIT, 1998: **Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993**. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 578–599

ARIZMENDI, F., TRINCHIN, R., & BARREIRO, M. (2022). **Weather regimes in subtropical South America and their impacts over Uruguay**. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9253– 9270. <https://doi.org/10.1002/joc.7816>

BOEING: **Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents**, Worldwide operations 1959-2020. Seattle, September 2021.

BYERLE, L. A., and J. PAEGLE, 2002: **Description of the seasonal cycle of low-level flows flanking the Andes and their interannual variability**. *Meteorologica*, 27, 71–88

BERBERRY, E. H., and E. COLLINI, 2000: **Springtime precipitation and water vapor flux convergence over Southeastern South America**. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1328–1346

BERBERRY, E.H., and V. BARROS, 2002: **The hydrological cycle of the La Plata Basin in South America.** *J. Hydrometeor.*, 3, 630-645

CAMPETELLA, C. M., C.S. VERA, 2002: **The influence of the Andes Mountain on the South American low-level-jet flow-** *Geophys. Res. Lett.*, 29,1826, doi: 10.1029/2002GL01451

CAZES-BOEZIO, G. H., A. W. ROBERTSON, and C. R. MECHOSO, 2003: **Seasonal dependence of ENSO teleconnections over South America and relations with precipitation in Uruguay.** *J. Climate*, 16 , 1159–1176  
<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>

DINACIA: **Reglamento Aeronáutico Latinoamericano (LAR 203). Servicio Meteorológico para la navegación aérea internacional.** Montevideo, Uruguay. Segunda edición, 2020. [https://www.dinacia.gub.uy/sites/default/files/2021-08/LAR\\_203\\_2daEd.pdf](https://www.dinacia.gub.uy/sites/default/files/2021-08/LAR_203_2daEd.pdf)

FERREIRA, V., & de LIMA Nascimento, E. (2016). **DISCRIMINATION BETWEEN CONVECTIVE AND NON-CONVECTIVE WIND GUSTS.** *Ciência e Natura*, 38(IX WORKSHOP), 225.

FRITSCH, J. M., KANE, R. J., & CHELIUS, C. R. (1986). **The contribution of mesoscale convective weather systems to the warm-season precipitation in the United States.** *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 25(10), 1333-1345.

FUJITA, T. T., & Caracena, F. (1977). **An analysis of three weather-related aircraft accidents.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, 58(11), 1164-1181.

FUJITA, T. T.: **Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales.** *Journal of Atmospheric Sciences* 38.8 (1981): 1511-1534. 1981.

FUJITA, T. T., & MCCARTHY, J. (1990). 1990: **The application of weather radar to aviation meteorology/Radar in meteorology,** D. Atlas (Ed.).

GARREAUD, R., & WALLACE, J. M. (1998). **Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South America.** *Monthly Weather Review*, 126(10), 2713-2733.

GÖSSLING, S., NEGER, C., STEIGER, R., & BELL, R. (2023). **Weather, climate change, and transport: a review.** *Natural Hazards*, 1-20.

HEIDEMAN, K. F., & MICHAEL FRITSCH, J. (1988). **Forcing mechanisms and other characteristics of significant summertime precipitation.** *Weather and forecasting*, 3(2), 115-130. Feng, Z. et al. More frequent intense and long-lived storms dominate the springtime trend in central US rainfall. *Nat. Commun.* 7, 13429 (2016).

HOUZE, Jr, R. A.: **Mesoscale convective systems.** *Reviews of Geophysics* 42.4, 2004.  
<https://doi.org/10.1029/2004RG000150>

JIRAK, I. L., COTTON, W. R., & McAnelly, R. L. (2003). **Satellite and radar survey of mesoscale convective system development.** *Monthly weather review*, 131(10), 2428-2449.

JIRAK, I.L.; COTTON, W. R.: **Observational analysis of the predictability of mesoscale convective systems.** *Weather Forecasting*, v.2, 813-838. 2007.

HAROLD. E Brooks, JAMES W Lee, Jeffrey P Craven, **The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data,** *Atmospheric Research*, Volumes 67–68, 2003, Pages 73-94, ISSN 0169-8095,  
[https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(03\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(03)00045-0)

HU, H., LEUNG, L. R. & FENG, Z. **Observed warm-season characteristics of MCS and non-MCS rainfall and their recent changes in the central United States.** *Geophys. Res. Lett.* 47, e2019GL086783 (2020)

LIU, C., & ZIPSER, E. J. (2015). **The global distribution of largest, deepest, and most intense precipitation systems.** *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3591-3595.

LINCHESTEIN, E. R., 1980: **La depresión del noroeste Argentino (The northwestern Argentina low).** Ph.D. dissertation, University of Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, 223 p

LOBAINA, A. A. L., BEATÓN, D. M. A., & FUENTES, C. G. (2014). **Contribución al método de interpolación lineal con triangulación de Delaunay.** *Minería y Geología*, 30(2), 58-72.

MADDOX, R. A. (1980). **Mesoscale Convective Complexes.** *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(11), 1374–1387. <http://www.jstor.org/stable/26221473>

MADDOX, R. A., RODGERS, D. M., & Howard, K. W. (1982). Mesoscale convective complexes over the United States during 1981—Annual summary. *Monthly Weather Review*, 110(10), 1501-1514

MARENGO J. A, SOARES W. R, SAULO C., NICOLINI, M. 2004: **Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability**. *Journal of climate*, Vol.17. No 12.

MO, K. C., and J. N. PAEGLE, 2001: **The Pacific–South American modes and their downstream effects**. *Int. J. Climatol*, 21, 1211–1229.

NESBITT, S. W., and E. J. ZIPSER, 2003: **The diurnal cycle of rainfall and convective intensity to three years of TRMM measurements**. *J. Climate*, 16, 1456–1475.

NICOLINI, A.; SAULO, C.; TORRES, J., SALIO, P.: **Enhanced precipitation over southeastern America related to strong low-level-jet events during austral warm season**. *Meteorologica*, 27, 59-59. 2002

SAULO, A. C.; NICOLINI, M.; CHOU, Sin Chan. **Model characterization of the South American low-level flow during the 1997–1998 spring–summer season**. *Climate Dynamics*, 2000, vol. 16, p. 867-881.

SELUCHI, M. E., A. C. SAULO, M. NICOLINI, and P. SATYAMURTY, 2003: **The northwestern Argentinean low: A study of two typical events**. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2361–2378.

NOGUÉS-PEAGLE, J., and K-C. MO, 1997: **Alternating wet and dry conditions over South America during summer**. *Mon. Wea. Rev.*, 125 , 279–291.

NOGUÉS-PEAGLE, J., and Coauthors, 2002: **Progress in pan American CLIVAR research: Understanding the South American monsoon**. *Meteorologica*, 27 , 3–32.

OACI. **Anexo 3 al convenio sobre aviación civil internacional. Servicio Meteorológico para la navegación aérea internacional**. Montreal, Quebec, Canadá. Vigésima edición, julio 2018.

ORGANIZACIÓN METEOROLOGICA MUNDIAL, **Manual de Claves Internacionales, OMM-N°306, Vol.II, Anexo II al Reglamento Técnico de la OMM, Parte A- Claves alfanuméricas**. Ed. 2019

ORGANIZACIÓN METEOROLOGICA MUNDIAL, **Reglamento Técnico, Documentos Fundamentales N°2, Vol. II- Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea internacional**, Ed. 2018, Actualización 2021.

ORLANSKI, I. (1975). **A rational subdivision of scales for atmospheric processes**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 527-530.

PETERS, J. M; SCHUMAHER, R. S: **Objective categorization of heavy-rain-producing MCS synoptictypes by rotated principal component analysis**. *Mon. Weather Rev.* 142, 1716–1737. Examines the meteorological regimes for heavy-rain-producing MCSs using objective analysis Methods. 2014.

PORTER, J. M., MEANS, L. L., HOVDE, J. E., & CHAPPELL, W. B. (1955). **A synoptic study on the formation of squall lines in the north central United States**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 36(8), 390-396

RASERA, G. **Determinação do potencial de ocorrência de Sistemas Convectivos de Mesoescala para América do Sul**. 2017 Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

RASERA, G., ANABOR, V., SSCREMIN Puhales, F., & DAI PIVA, E. (2018). **Developing an MCS index using the climatology of South America**. *Meteorological Applications*, 25(3), 394-405.

RASMUSSEN, K. L., CHAPLIN, M. M., ZULUAGA, M. D., & HOUZE, R. A. (2016). **Contribution of extreme convective storms to rainfall in South America**. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 353-367.

REID, K. J., KING, A. D., LANE, T. P., & SHORT, E. (2020). **The sensitivity of atmospheric river identification to integrated water vapor transport threshold, resolution, and regriding method**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(20), e2020JD032897.

RODGERS, D. M., MAGNANO, M. J., & ARNS, J. H. (1985). **Mesoscale convective complexes over the United States during 1983**. *Monthly Weather Review*, 113(5), 888-901.

ROPELEWSKI, C. F., & HALPERT, M. S. (1987). **Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation**. *Monthly Weather Review*, 115(8), 1606–1626. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:garspp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:garspp>2.0.co;2)

RUTZ, J. J., STEENBURGH, W. J., & RALPH, F. M. (2014). **Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the western United States**. *Monthly Weather Review*, 142(2), 905-921.

SAHA, S., and coauthors, 2014: **The NCEP Climate Forecast System Version 2**. *J. Climate*, 27,2185-2208, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>

SALIO, P., NICOLINI, M., & SAULO, A. C. (2002). **Chaco low-level jet events characterization during the austral summer season**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D24), ACL-32.

SALIO, P., NICOLINI, E., ZIPSER J.: **Mesoscale convective system over southeastern South America and their relationship with the South American low-level-jet**. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1290-1309. 2007.

SAULO, A. C, SELUCHI, M. E, NICOLINI, M.: **A case of study of chaco low-level-jet event**. *Mon. Wea. Rev.* , 132, 2669-2683. 2004.

SELUCHI, M., and J. MARENGO, 2000: **Tropical–midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: Climatic aspects and extreme events**. *Int. J. Climatol*, 20 , 1167–1190.

SIERRA Giraldo, I: **Análisis de tormentas eléctricas en el área de influencia del Aeropuerto Internacional Eldorado con fines de pronóstico 2018**. Tesis (Maestría en Meteorología). Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias, 2018.

SCHUMACHER, R.S., RASMUSSEN, K.L. **The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems**. *Nat Rev Earth Environ* 1, 300–314 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0057-7>

SORONDO COSIO, M. (2014). *Área Metropolitana de Montevideo nodo estratégico en las dinámicas logísticas regionales*.

STENSRUD, D. J., & FRITSH, J. M. (1993). **Mesoscale convective systems in weakly forced large-scale environments**. Part I: Observations. *Monthly weather review*, 121(12), 3326-3344.

TORRES, Juan Carlos. (2003). **Sistemas convectivos en mesoescala altamente precipitantes en el norte y centro de Argentina**. (Tesis Doctoral. Universidad de Buenos

Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.). Recuperado de [https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis\\_n3656\\_Torres](https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n3656_Torres)

ROPELEWSKI, C. F., & HALPERT, M. S. (1987). **Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation**. *Monthly weather review*, 115(8), 1606-1626.

VELASCO, I., & FRITSCH, J. M. (1987). **Mesoscale convective complexes in the Americas**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(D8), 9591-9613.

VERA, C., BAEZ, J., DOUGLAS, M., Emmanuel, C. B., MARENGO, J., MEITIN J., ... & ZIPSER, E. (2006). **The South American low-level jet experiment**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(1), 63-78

WETZEL, P. J., COTTON, W. R., & MC ANELLY, R. L. (1983). **A long-lived mesoscale convective complex. Part II: Evolution and structure of the mature complex**. *Monthly weather review*, 111(10), 1919-1937.