

ESTIMATION OF THE FLOODED AREA OVER THE PANTANAL, A SOUTH AMERICAN FLOODPLAIN, USING MODIS DATA

Anthony Schrapffer^{1,2,3}, Lucía María Cappelletti^{1,2,3} y Anna Sörensson^{1,2,3}

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Buenos Aires, Argentina

²CONICET – Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Buenos Aires, Argentina

³CNRS – IRD – CONICET – UBA. Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI 3351 IFAECI). Buenos Aires, Argentina

ABSTRACT

Tropical floodplains, such as Pantanal in Central South America, are important features for land-atmosphere interactions. Schemes to account for floodplains should therefore be included in Earth System Models, but this requires observations of flooded area for validation. Satellite data is a possible solution to estimate the flooded area but it is important to evaluate the different flood detection algorithms available in order to use the most efficient for the region. This work explores different methods to estimate the flooded area from the MODIS MOD09A1 satellite surface reflectance product using spectral indexes (mNDWI, NDMI, NDMI-NDVI) to detect the presence of water. We include the traditional threshold-based methods but also some unsupervised classification methods such as the k-means and the Principal Component Analysis applied on the water-related spectral indexes. The calibration and validation of these methods are based on the hydrological knowledge of the region, coming from land surface models, river discharge observation and from previous satellite estimations of the flooded area. The NDMI index seems too sensible to the vegetation which leads to error in the estimation of the flooded area. The other methods were spatially and temporally consistent with previous studies over the Pantanal.

Keywords: Floodplains, flood detection, remote sensing, Pantanal, MODIS.

RESUMEN

Las llanuras de inundaciones tropicales, como el Pantanal en Suramérica Central, son importantes para las interacciones suelo-atmósfera. Por lo tanto, los esquemas que representan las llanuras de inundación tienen que ser incluidos en los Modelos del Sistema Tierra, pero eso requiere observaciones del área inundada para validación. Los datos satelitales son una posible solución para estimar la superficie inundada, pero es importante evaluar los diferentes algoritmos disponibles para utilizar el más eficiente para cada región de interés. Este trabajo explora diferentes métodos para estimar la superficie inundada con el producto de reflectancia de la superficie MODIS con el uso de índices espectrales (mNDWI, NDMI, NDMI-NDVI) para detectar la presencia de agua sobre Pantanal. Incluimos los métodos más comunes basados en el uso de umbrales y también algunos métodos de supervisión

no clasificada como los k-means y el Análisis de Componentes principales aplicados a los índices espectrales relacionados con la presencia de agua. La calibración y la validación de estos métodos está basado en los conocimientos hidrológicos de la región, proviniendo de modelos de superficie, observaciones de caudal y de estimaciones de la superficie inundada por satélite realizada en trabajos anteriores. El índice NDMI parece demasiado sensible a la vegetación lo que lleva a errores en la estimación de la superficie inundada. Los otros métodos son espacial y temporalmente consistente con estudios previos sobre el Pantanal.

Palabras clave: *Llanuras de inundaciones, Detección de inundaciones, Teledetección, Pantanal, MODIS.*

1. INTRODUCTION

The floodplains are wetlands which are temporarily or permanently flooded and where there are strong interactions between the different terrestrial hydrological processes such as river discharge, the evapotranspiration from plants, the evaporation from open water surfaces and the vertical movement of water between the surface soil and the saturated zone. These large floodplains are places of rich biodiversity and provide important ecosystem services such as water purification, river stream regulation and carbon sequestration. The monitoring and improved comprehension of these regions are vital for their revalorization and conservation. Remote sensing products are powerful tools to monitor the spatiotemporal evolution of these extensive floodplains with a reasonable frequency. Satellite estimations of the flooded areas are also necessary to develop a correct representation of the hydrology of these regions in Land Surface Models and Earth System Models.

The periodic flooding of the floodplains related to the overflow of the river is fundamental for the local ecosystem as it is driving the lateral exchange of water and nutrients in the river floodplains system (cf. flood pulse concept, Junk et al., 1989). These exchanges are one of the reasons why the floodplains are very productive ecosystems and considered as biodiversity hotspots. However, large floodplains are also regions where the in-situ observations are not sufficient to reconstruct their full

dynamics, as opposed to smaller and more homogeneous wetlands and to unvegetated regions which can be more easily monitored and where the estimation can be carried out more directly by spectral indices. Thus it is difficult to estimate the temporal variability and map the spatial variability of the floods over large floodplains.

Large tropical floodplains, such as the Pantanal in central South America, are regions of strong land-atmosphere interactions due to a high level of evaporation in relation with the presence of open-water surfaces and of transpiration in relation with the increased soil moisture (Schrapffer et al., 2020). This induces strong gradient of land-atmosphere fluxes and temperature between the floodplains and the neighbouring regions. This is why the floodplains processes tend to be ever more integrated in Land Surface Models (Schrapffer et al., 2020; Dadson et al., 2010; Getirana et al., 2021) because this improves the representation of the hydrological cycle and it will change the sensible and latent fluxes which may have an impact on atmospheric conditions and, thus on the regional precipitation (Taylor, 2010). These are important advances regarding the growing interest of coupled simulations to study the land-atmosphere interactions. In order to be able to calibrate and evaluate the floodplains scheme in Land Surface Models, the estimates of the temporal and the mapping of the spatial evolution of the flooded surfaces are crucial.

Remote sensing has proven to be a helpful tool

to estimate large-scale land processes and may be helpful to estimate the flooded area over large tropical floodplains (Padovani, 2010; Ogilvie et al., 2015). There are two types of sensors which can be used to estimate the flooded areas: the Optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors. SAR data presents some advantages to detect the flooded area as it is not affected by clouds because it uses the microwave bands and because it can provide data during both day and night (Pereira et al., 2019). Despite this, SAR data may be affected by speckle noise (Inglada et al., 2016) and may be largely impacted by confounding effects associated with the surface conditions. Moreover, the processing of this type of data is more complex compared to optical data (Niedermeier et al., 2005). On the other hand, optical data are relatively easy to manipulate and allow to obtain both the flooded area and the presence of vegetation or other features in a relatively simple way. Therefore, in this work, we chose to employ optical data. There are two major difficulties to handle in this work: (1) the relatively large extension of the region and (2) the issue of the cloud cover over such a large region. The first point can be managed by using a satellite product with a lower resolution such as a MODIS product. For the second point, a post-processed product which uses a lower temporal resolution can be used. Some of these lower temporal resolution products are created by merging the different images available to produce images with the lowest cloudiness possible. There are two similar MODIS products which correspond to this type of post processing: MOD09A1 and MYD09A1.

Traditional methods used to estimate the extension of flooded surfaces rely on spectral indices and thresholds (Ogilvie et al., 2015). Some spectral indices may highlight the presence of water by higher values. However, some other land features may generate noise and make it difficult to directly detect the flooded area using a threshold. For example, the estimation of flooded area over regions containing lush vegetation may be confounded with the vegetation water content due to the

large annual variability of water content related to the flood pulse.

This is why, although the presence of water may be overestimated by higher values in some spectral indices, some land features such as the vegetation might generate noise and make it difficult to directly detect the flooded area using a threshold. Thus more sophisticated methods may lead to an improvement of the estimate. The spectral indices considered in this study contain information about the water content and the status of the vegetation such as the modified Normalized Water Index (mNDWI), the Normalized Difference Moisture Index (NDMI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

This study aims to compare the use of different methods based on spectral indexes to estimate the flooded area and to overcome the difficulties of estimating the flooded surface over large and complex regions such as Pantanal. This is done by comparing different traditional approaches: (1) using the classical approach of applying a threshold over spectral indexes and (2) using unsupervised classification methods such as the k-means and the Principal Component Analysis (PCA). We aim at an optimized method that is both as robust and as simple as possible. The estimates obtained are then validated by a previous satellite estimate made by Padovani (2010) and by the river height at Ladário station.

This paper is organized as follows. Section 2 contains the Methodology and Dataset used. Section 3 contains the results and the evaluation of the temporal and spatial estimation of the flooded area by the different methods considered. Section 4 contains the discussion and conclusion.

2. METHODOLOGY AND DATASETS

2.1. REGION OF INTEREST: THE PANTANAL

The Pantanal, the world's largest floodplains, has an extension of 150.000 km² and is located in the tropical region of southwestern Brazil (see Figure 1). The flat lands of Pantanal range between 80 and 150 m.a.s.l. of altitude while the surrounding mountain ranges of the Cerrados from its north/northeast to its southeast ranges between 200 and 1.400 m.a.s.l. (Alho, 2005). It has a regular annual cycle of flooding driven by the precipitation over the Cerrados during the rainy season (December to February). Due to the flat slopes of the Pantanal, it takes between 3 and 5 months for the water flowing from the Cerrados to cross the Pantanal. This excess of water flowing into Pantanal through the river system and slowed down by the topography generates important floods. The climatological sea-son of floods occurs between February and May (Penatti et al., 2015).

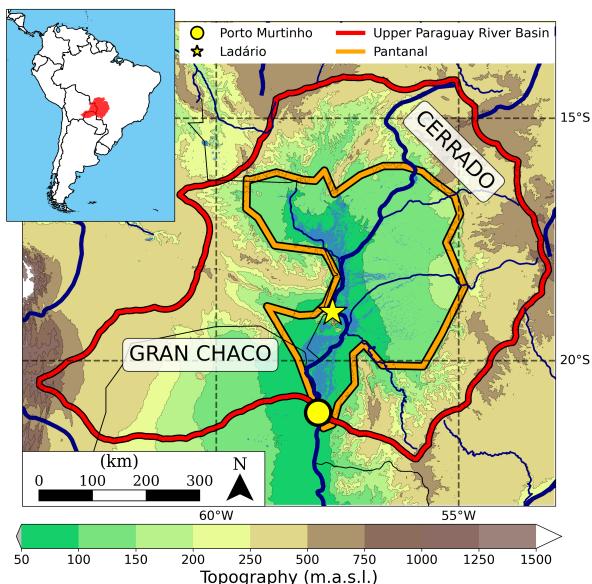


Figure 1: Localization and description of the Pantanal wetlands inside the Upper Paraguay River Basin. The blue layer corresponds to the flood extent from WaterMap (Pekel et al. 2016; Source: EC JRC/Google).

2.2. MODIS data: MOD09A1

The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra MOD09A1

and MYD09A1 products have been chosen to perform this study for various reasons. First, they have a resolution of 500m which is higher than some other surface reflectance products such as Landsat (30 m resolution) but it is sufficient and more manageable as we are dealing with an extensive region. The MOD09A1 (MYD09A1) product is constructed from an 8-day composite period and gives an estimate of the surface spectral reflectance for the 7 first bands of Terra (Aqua) MODIS with corrected atmospheric effects (gases, aerosols, Rayleigh scattering). This correction consists in (1) an adjustment to include the effect of the solar zenith angle in order to obtain the top-of-atmosphere value and (2) the correction of the error related to the atmospheric scattering and absorption due to the presence of gases and aerosols in the atmosphere and to the spherical albedo (Vermote et al., 2006). The MODIS satellites provide data for each location each 1-2 days. This permits creating a composite image, selecting for each 8-days period the highest quality data for each pixel (lower view angle, absence of clouds, clouds shadow and aerosols) to obtain the MOD09A1 and MYD09A1 products. Two tiles were considered to fully include the Pantanal: h12v10 and h12v11. Both products have been retrieved from the NASA Earth Data Search (<https://search.earthdata.nasa.gov>).

The flooding cycle of the Pantanal is annual, thus a temporal resolution from a couple of weeks to a month is acceptable. Thus, both products can be used for this purpose. Although this product intends to avoid clouds and other inconveniences, during the rainy sea-son the images can still be affected by the presence of clouds due to an excessive cloud coverage during the rainy season. The presence of clouds has been assessed in two steps. Firstly, the Quality Bit Flags of the MODIS products over the Pantanal were used to obtain the mask of the Pantanal which is not cloudfree nor covered by clouds shadows. For values of cloud cover fraction over the Pantanal higher than 5 %, the image was discarded. After

that, all the images retained were checked visually to verify that they didn't contain coarse cloud features over the Pantanal that remained undetected by the Quality Bit Flags. Between 2002 and 2021, 54% of the images available were considered cloudless over Pantanal in MOD09A1 and 35% for MYD09A1. The dates available without clouds for MOD09A1 and for MYD09A1 have been compared. It should be highlighted that the major differences between MOD09A1 and MYD09A1 are the availability of data as MOD09A1 was launched in 2000, two years before MYD09A1 (Savchenko et al., 2004). During the period they have in common, MOD09A1 has 140 cloudless dates which are considered as cloudy in MYD09A1 while MYD09A1 only has 7 cloudless images which are considered as cloudy in MOD09A1. These 7 images represent the dry season, a period of lower cloudiness and thus of major availability of images also in MOD09A1. For these reasons, only the product MOD09A1 has been retained although the use of both products MYD09A1 may be considered to complete the data in further studies. All the MOD09A1 cloudless images have been confirmed as such by the visual check, while MYD09A1 was not checked visually since this product was not used for this study.

The different methods of flood detection presented in this study have been calibrated over the 2002-2004 period. Figure 2 represents for each month the total number of MODIS MOD09A1 images available and the quantity of exploitable images, i.e. cloudless. As expected the number of cloudless images is strongly affected by the wet season (November to March).

2.3. SPECTRAL INDEXES

The Spectral Indexes have two main objectives: (1) to isolate some specific land features signals such as signals related to the vegetation (Xue and Su, 2017), the presence of water (Acharya et al., 2018) or the soil composition (van der Meer et al., 2012); while (2) they are insensitive to

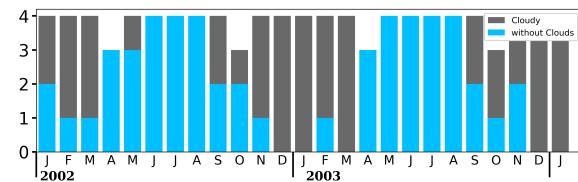


Figure 2: Number of monthly available data for this MODIS product and number of dates available without clouds between 2002 and 2004.

other perturbing signals (Verstraete and Pinty, 1996).

The spectral indices presented here are based on normalized differences between reflectance at different wavelengths. The NDVI emphasizes the presence of vegetation while the rest of the indices try to underline the presence of water bodies. All these indexes are resumed in Table I.

The main spectral indexes are constructed based on some basic processes: the vegetation strongly reflects the Near InfraRed (NIR) and the Green but has a very low reflectance in the Red wavelength. The ShortWave InfraRed (SWIR) is very sensitive to the water content and in particular to the vegetation water content.

These indexes are shown in Figure 3 over the Pantanal region for two different dates: one during the dry season (21st August 2002) and one during the wet season (15th April 2003). The NDMI gives a good indication over the flooded vegetation may be falsely detecting highly vegetated regions as flooded. To combine the information contained in NDMI with NDVI seems a possible solution to better distinguish between these two land covers (cf. NDMI-NDVI index in Figure 3.d and Figure 3.h).

2.4. FLOODED AREA DETECTION

Two methods are tested in this study: (1) a threshold-based method using the indices that seemed to better represent the presence of water (mNDWI; NDMI; NDMI-NDVI) and (2)

Spectral Indexes	References	Specificity
$mNDWI = \frac{Green-SWIR}{Green+SWIR}$	Xu (2006) Ogilvie et al. (2015)	Water detection
$NDMI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$	Ogilvie et al. (2015)	Water detection
$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}$	Rouse et al. (1974)	Vegetation and water detection
NDMI-NDVI	Gond et al. (2004) Boschetti et al. (2014)	Rice flood mapping, water bodies and wetland

Table I: Spectral indexes considered in this study with some reference papers and the specificity of these indexes.

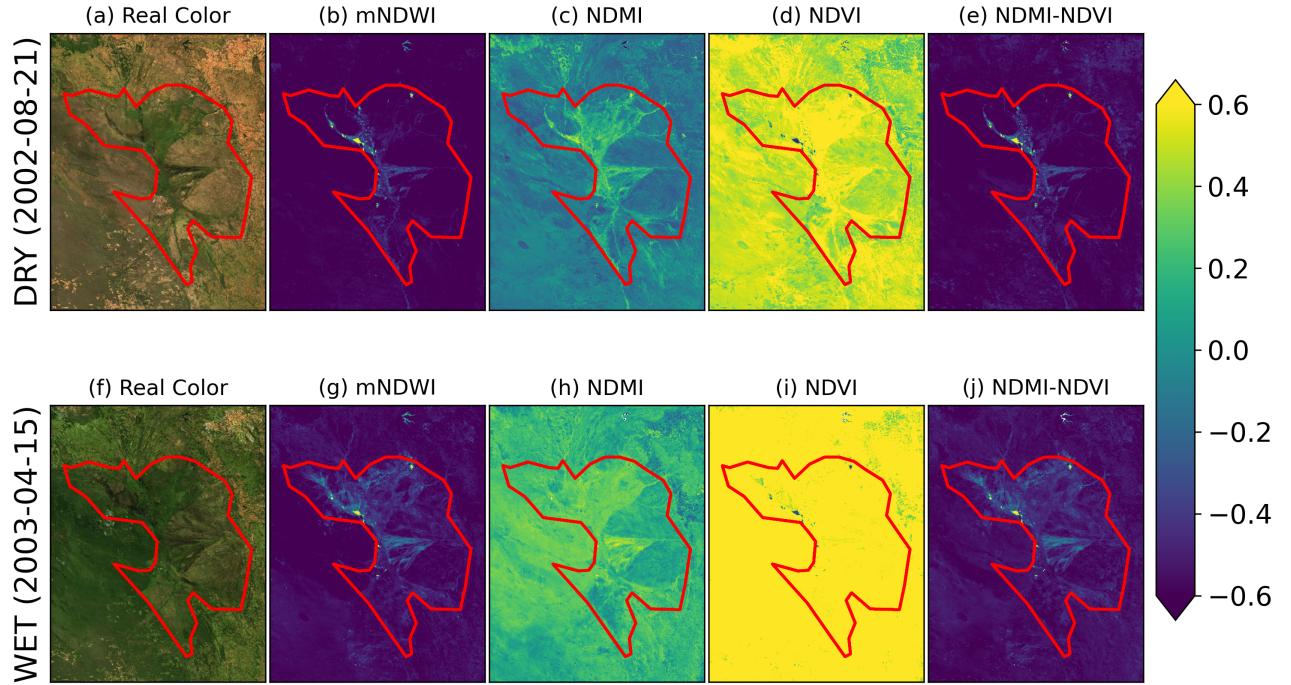


Figure 3: Results of the spectral indexes for two different dates: one during the dry period and one during the wet period.

using two different unsupervised classification methods using 3 indices (mNDWI, NDMI and NDVI).

The first method of unsupervised classification is the k-means (Lloyd, 1982) which is a clustering method to regroup the data into

different categories. The number of categories or clusters is given by the parameter “k”. number of clusters. Each cluster is defined by its centroid and the membership of each data point to a certain cluster will be determined according to the nearest centroid. The algorithm tries to minimize the total distance between the centroids and the data. The election of the k-value depends on the problem that is being clusterized. Different values have been evaluated. For k-value under 6, the output was not stable while k-values higher than 6 added more complexity to the description of the data which wasn't necessary adding value to the discrimination between flooded and not flooded pixels. Thus, the k-value chosen for this study is 6.

The second unsupervised classification method uses the Principal Component Analysis (PCA – Jolliffe and Cadima, 2016) method which finds an orthogonal projection that best fits the data and allows to reduce the number of dimensions. As the data has 3 dimensions (due to the 3 indexes considered), the maximal number of dimensions that can be considered for the PCA is 3. The number of dimensions considered in this study is set at 2. The second dimension refers to the spatial structure of the flooded area. This is not the case for the first dimension of the PCA which seems to be representing other processes such as the vegetation. Higher values in the second dimension of the PCA corresponds with areas with higher values of mNDWI, NDMI and to the spatial structure of the floods (cf. Figure 1). The value of the pixels over this axis resumed the flood related information from the 3 indexes. Then, a threshold has to be established to classify each pixel into the flooded / not flooded categories.

2.5. UNSUPERVISED CLASSIFICATION INPUT

In order to have a single model that would take into account the variability of the vegetation along the year and that would underline the flood processes, the sample input data to

generate the PCA and the k-means model have been randomly selected from two images. As the Pantanal has a very marked wet and dry season, one of these images corresponds to the dry season (from June to September) and the other one at the end of the wet season (From November to March) which also corresponds to the climatological season of floods. The images chosen correspond to the dates that were used to illustrate the spectral indexes in Figure 3: the 21st of August 2002 for the dry season and the 15th of April 2003 for the wet season. A total of 10000 pixels per image has been used.

The PCA and k-means processes are quite sensible to the input. In this case, the objective is to represent the variability of the flooded area. The data is mainly composed of not flooded pixels as demonstrated by the distribution in Figure 4 whose maximum is located in the low-NDMI / low-mNDWI region. For this reason, although the 10000 pixels per image were randomly selected, pixels with higher values of mNDWI have been favored. Another filter has been applied to avoid selecting the outlier which were mainly pixels with extremely low NDMI value (cf. Figure 4).

The k-means clustering with k=6 is shown in Figure 5. In the spatial location of the clusters in the (mNDWI, NDMI) space (Figure 5.c), the cluster number 0 to 3 have a low mNDWI value, reasons why they are considered as not flooded and their NDMI index value is growing from the cluster 0 to the cluster 3. Looking at the difference between the k-means representation of the dry season image (Figure 5.b) and the wet season image (Figure 5.a) maps, we can see that they may represent different conditions of vegetation and that low vegetation regions in the dry season image become high vegetation region during the wet season. Pixels in the clusters 4 and 5 have a higher mNDWI value and can be considered as flooded. The pixels in cluster 5 include the pixels with maximal mNDWI values, thus we can consider that cluster 5 represents the open water pixels and pixel 4 the flooded vegetation.

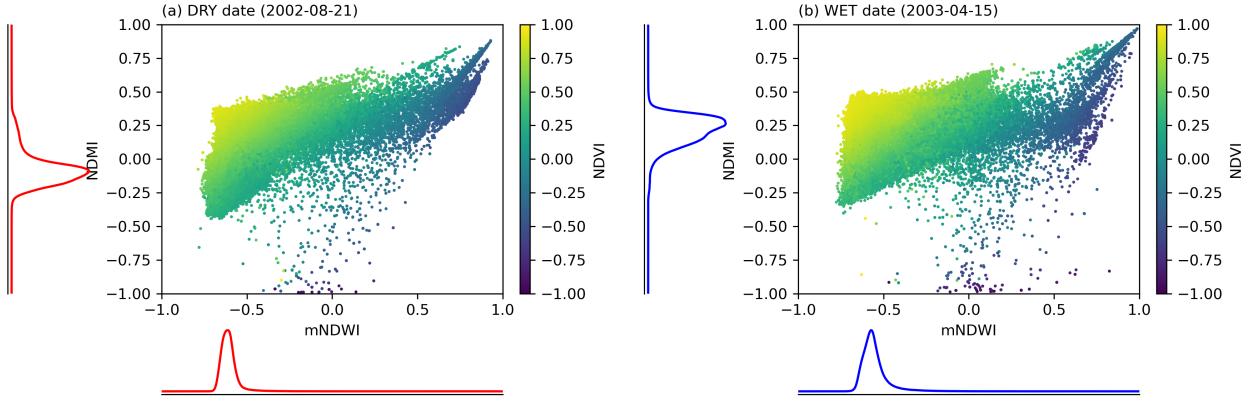


Figure 4: Distribution of the mNDWI / NDMI / NDVI values of the pixels.

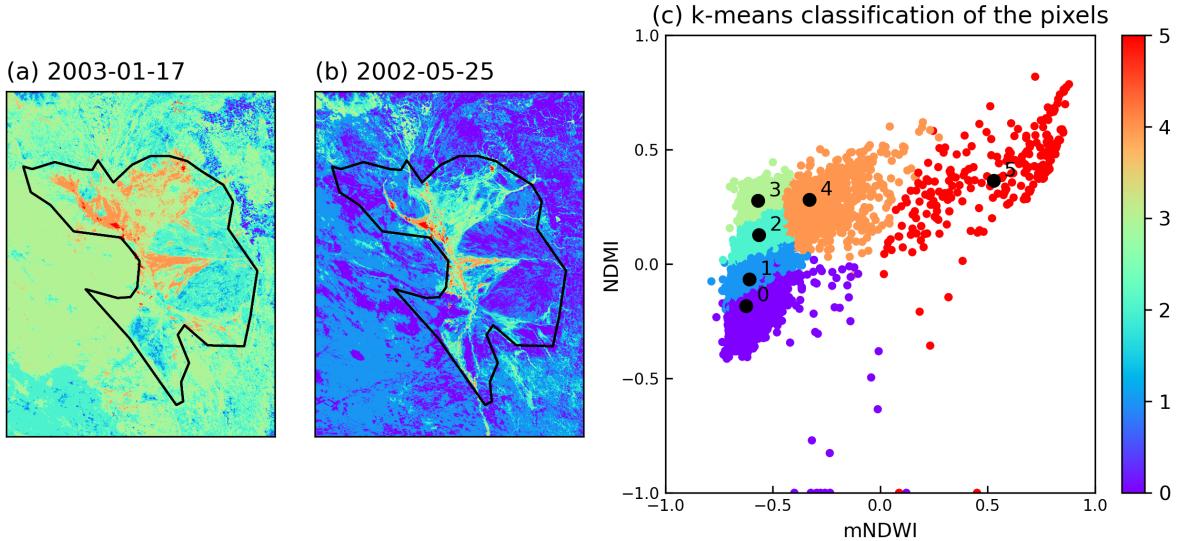


Figure 5: Illustration of k-means model output for $k = 6$ for (a) the wet and (b) the dry reference images and (c) distribution of the cluster in the (mNDWI / NDMI space).

The second dimension of the PCA is shown in Figure 6. We can deduce that higher values along this dimension represent the flooded pixels.

2.6. VALIDATION DATA

Ground-based observations of the flooded area over such a large area as the Pantanal are scarce. The validation of a flood estimate method may rely on two aspects: (1) the knowledge of the local hydrological network and the characteristics of the regions; (2) the comparison with previous satellite estimates.

Hamilton et al. (1996) is a reference for the flooded area estimate over the region. It found a relationship between the flooded area over the Pantanal estimated between 1979 and 1987 and the river gauge at the Ladário station obtained from the Brazilian National Water Agency (Agência Nacional de Águas - ANA). The flooded area has been estimated using the brightness temperature from a satellite passive microwave sensor. Hamilton et al. (2002) further extended this relationship from 1900 to 2000 to obtain an estimation of the evolution of the flooded area. Although these results are not available for the period of availability of MODIS,

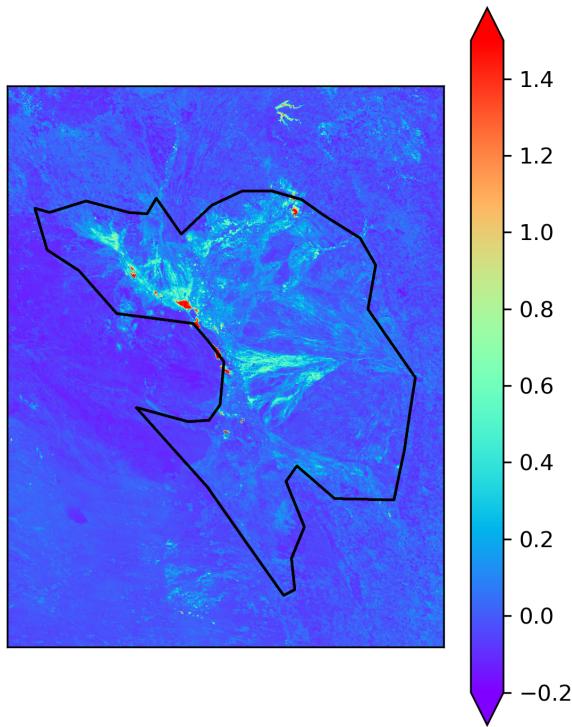


Figure 6: Values for the second dimension of the PCA for the wet reference image.

they point out that the river gauge data from the Ladário station (see Figure 1) can be used to assess the flooded area as these data are strongly correlated.

We will also for comparison use the estimation of (Padovani, 2010) which has been validated in comparison with Hamilton et al. (2002). Padovani (2010) applied a Linear Model of Spectral Mixture (LMSM) to MODIS MOD13Q1 images to estimate the temporal and map the spatial evolution of the flooded area over the Pantanal. The MOD13Q1 product includes vegetation description (NDVI and EVI indexes) and the corresponding Red, Near Infrared, blue and Mid-Infrared bands from MODIS. A 16-days composite image is created by selecting the highest quality data for each pixel (lower view angle, absence of clouds) and by favoring higher values of NDVI/EVI indexes. Thus, although this product is also constructed from MODIS data, it differs from

MOD09A1 because of its focus on vegetation processes and because of the lower temporal resolution (images each 16 days instead of 8). The method developed by Padovani (2010) uses a single image (May 25th 2007) to calibrate by finding a linear relationship between the reflection at different wave-lengths available and the soil, vegetation and water cover. By applying this relationship to the other images, it allows estimating the fraction of soil, vegetation and water cover. The flooded area is then determined by applying a threshold on the water cover fraction.

Other types of datasets have been considered for the spatial validation of the methods presented in this study such as WaterMAP (Pekel et al., 2016) and GFPLAIN250m. Water-MAP is a global dataset available between 1984 and 2015 which contains the monthly estimate of the surface water location constructed from optical sensors (Landsat 5 TM; Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI), regional datasets and from inventories. GFPLAIN250m is a 250m resolution dataset drawing the delimitations of what can be considered as floodplains based on Digital Elevation Model datasets.

The different thresholds required were calibrated with the Padovani (2010) time series for the period 2002-2004. The respective threshold values for the different methods are resumed in Table II.

The mean flood frequency from Padovani (2010) will also be used as a comparison. However, as it improves the readability of the map, the modification of the flood frequency map from Padovani (2010) presented in Fluet-Chouinard et al., (2015) can also be used to assess the spatial representation of the floodplains in the different methods used in this work.

3. RESULTS

The different satellite estimate methods that have been described in Section 2 and calibrated over the 2002-2004 period have been applied

Method	Threshold
Threshold-based mNDWI	-0,465
Threshold-based NDMI	0,32
Threshold-based NDMI-NDVI	-0,45
K-Means	Cluster 4 and 5
PCA	0,09

Table II: Methods and their corresponding threshold values.

to MODIS MOD09A1 between 2002 and 2009. Their temporal evolution and spatial representation are assessed in comparison with Padovani (2010).

3.1. EVALUATION OF THE TEMPORAL EVOLUTION

The temporal evolution of the flooded area estimated over the Pantanal by the threshold-based methods are presented in Figure 7 and Figure 8 shows the evaluation of the results for the unsupervised classification methods. The comparison of the different estimates with Padovani (2010) is summarized through some basic comparative statistical indexes in Table III (correlation, root mean square error - RMSE - and percentage bias – PBIAS).

Except the NDMI index, the different methods are coherent with the study of Padovani (2010). Among them, the PCA and NDMI-NDVI have higher values of flooded area while the mNDWI index and the k-means have lower values of the flooded area.

The NDMI-based estimation is less correlated than the other methods with Padovani but this correlation increases when integrating the information from the NDVI index (Figure 7.c). This difference may be related to the influence of the vegetation in the NDMI index.

The river stage at Ladário is delayed compared to both Padovani (2010) and the methods

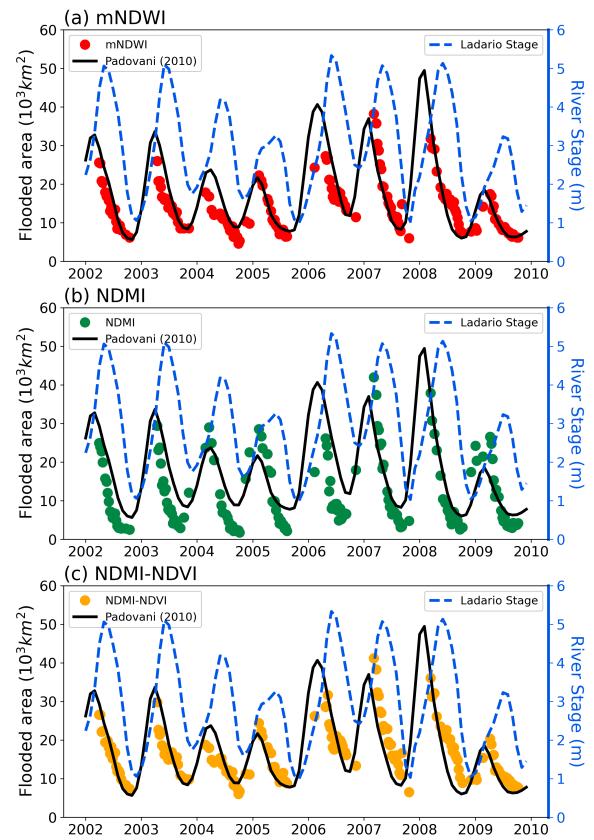


Figure 7: Time series of Padovani (2010), the river height at Ladário and of the results from the threshold-based methods using (a) mNDWI, (b) NDMI and (c) NDMI-NDVI.

evaluated although the amplitude of the river gauge and the estimated flooded area are similar. Following the Hamilton et al. (1996) estimation of the flooded area, the river stage at Ladário should be strongly correlated. Further

Method	PBIAS	RMSE	Correlation
mNDWI	-12,74	4.894	0,8
NDMI	-23,83	6.839	0,81
NDMI-NDVI	9,89	5.243	0,82
K-Means	11,46	5.119	0,77
PCA	-9,83	4.871	0,78

Table III: Resume of the statistics (Percentage bias - PBIAS, Root-Mean Square Error - RMSE, Correlation) comparing Padovani (2010) estimate with the different methods: threshold-based applied to mNDWI, NDMI and NDMI-NDVI, Principal Component Analysis (PCA) method and k-means with $k = 6$. The correlations are significant with a significance level of 99 %.

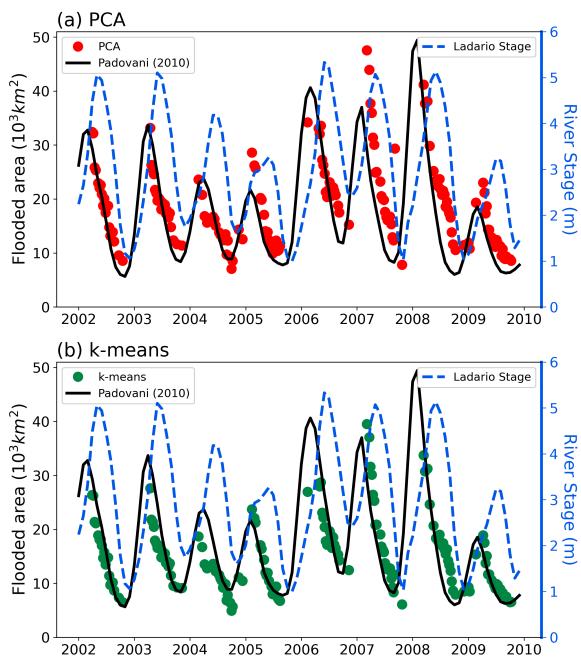


Figure 8: Time series of Padovani (2010), the river height at Ladário and of the results from the threshold-based methods using (a) the Principal Component Analysis (PCA) method and (b) the k-means algorithm with $k = 6$.

analysis should be performed to understand these differences.

3.2. EVALUATION OF THE SPATIAL EVOLUTION

Figure 9 shows the comparison of flood

frequency between 2002 and 2009 in the different methods presented in this study in order to compare them with the flood frequency map from Padovani (2010), WaterMAP and the floodplains delimitations from GFPLAIN250m.

As seen in the first overview of the spectral indexes, the NDMI index is strongly influenced by the vegetation which creates a bias for the detection of flooded areas. For the other estimation methods, the results are more coherent with the flood frequency map from Padovani (2010) and WaterMAP although WaterMAP seems to consider only the most flooded area of the Pantanal. Except for the NDMI-based method, the large rivers such as the Main Paraguay River at the North and South of the Pantanal, the São Lourenço river at the northeast and the Taquari river at the East of the Pantanal are clearly visible in the different flood detection methods. All the results are also coherent with the GFPLAIN250m floodplains delimitation which is based on a DEM. The only exception is the central region of the Pantanal, the Taquari Megafan, which may be related to local changes in the orography (Assine, 2005).

3.3. EXPLORATION OF A CASE STUDY

The simple flood detection methods presented previously may have a large variety of applications. This subsection aims to illustrate

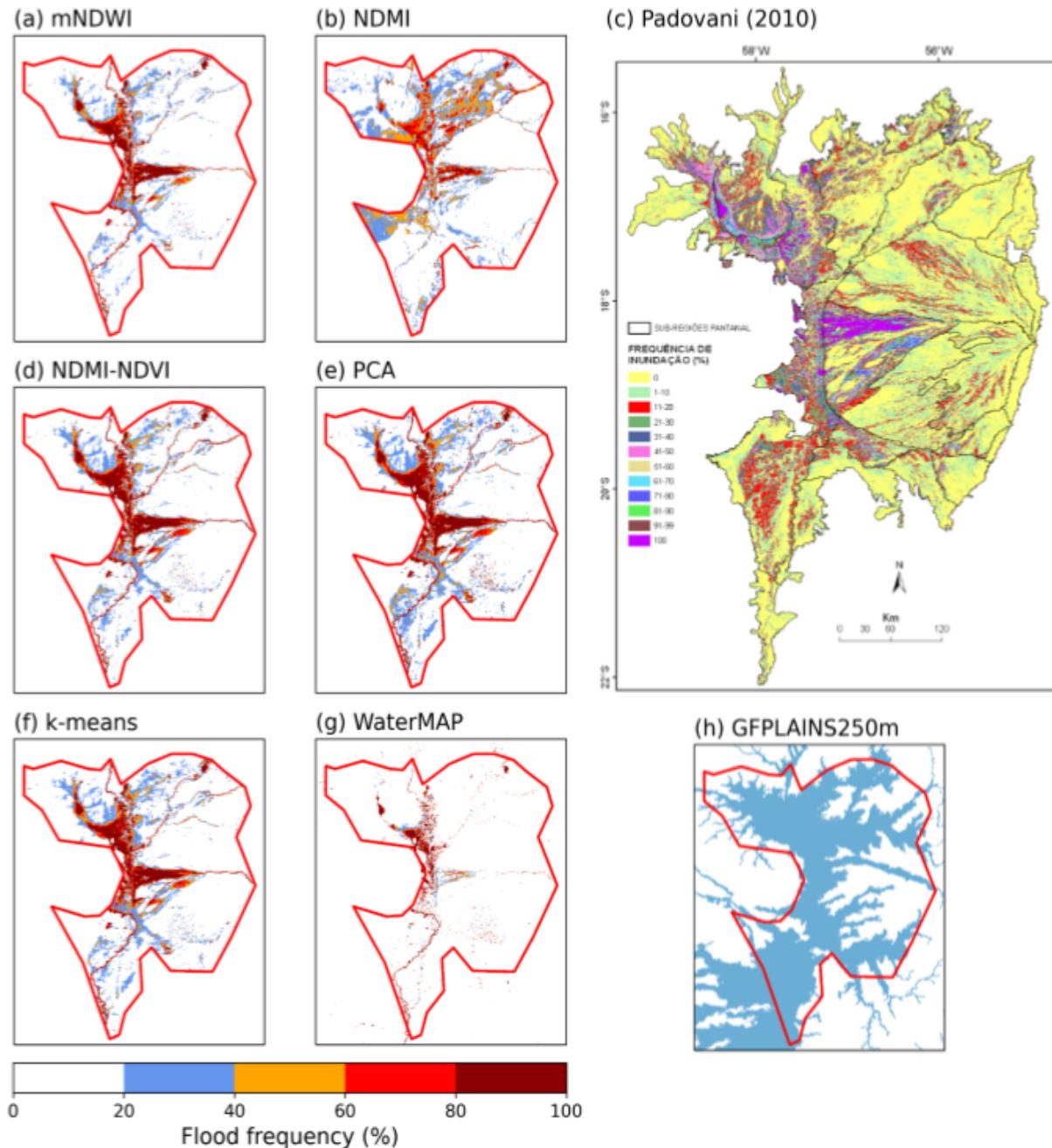


Figure 9: Flood frequency between 2002 and 2009 obtained from the different methods presented: 3 threshold-based methods using the (a) mNDWI, (b) NDMI and (d) NDMI-NDVI index and 2 unsupervised classification methods: (e) Principal Component Analysis and (f) k-means. Occurrence of flood from (c) Padovani (2010) and (g) WaterMAP (Pekel et al. 2016; Source: EC JRC/Google) between 1984 and 2015 and floodplains delimitation from GFPLAIN250m (Nardi et al., 2019).

their potential by using the mNDWI-based flood detection method and the NDVI index to explore the evolution of the extent of the floods along the years. The floods are evaluated during the month of march which is one of the most flooded months for the Pantanal. The images chosen have a cloud cover lower than 2% following the quality flag of MODIS. Three dates have been selected to perform this study: 21/03/2004 (t0), 22/03/2007(t1), 06/03/2021 (t2). t0 (respectively t1) corresponds to the year of lower maximum (respectively higher maximum) flood extent over the 2002 and 2010 period. t2 has been chosen in order to compare the two previous dates to the actual situation which corresponds to drier conditions and with the vegetation cover affected by important wildfires during the 2020 dry season.

Figure 10 shows the NDVI index (Fig. 10.a) for t0 over the Pantanal as well as the difference of NDVI between t1 and t0 (Fig. 10.c) and between t2 and t0 (Fig. 10.c). Figure 10.d-f shows the flooded area estimated with the mNDWI based method for the three dates. Comparing the flooded area in t0 and t1, the floods in t1 are much more extended but they show similar patterns. The regions where the flood became more important in t1 are the northwest and central Pantanal. Some flooded areas also appear in the South of the Pantanal. The vegetation seems to be reduced over some of the flooded area which may be related to the floods replacing the vegetation or at least reducing the NDVI. However, the NDVI increases around the shape of the floodplains in t1 compared to t0. A larger extent of flooded area reduces locally the NDVI while the NDVI increases at its border due to the higher water availability.

In t2, the floods are at their minimal extent and are principally around the Paraguay river and over the Taquari Megafan in the central region of the Pantanal. The northwest region has almost no floods in t2 but has increased NDVI compared to t0. This means that there is water allowing for the development of the vegetation but there is not enough water so it

can be considered as flooded. The NDVI is lower in t2 compared to t0 over the regions with higher values of NDVI in t0 which may be related to the wildfire. It should also be noted that there is an increase of the NDVI values compared to t0 over the NorthEast of the Pantanal. This region is not usually flooded so this may be more related to the impact of the local precipitation on the vegetation during the wet season.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

The estimation of the flooded area over large floodplains is a difficult task. The satellite products may be precious tools. This paper explored different methods to estimate the flooded area using the surface reflection from optical remote sensing products. The water-related information is extracted by using different spectral indexes related to the presence of water content and vegetation. Then, different methods are developed using directly the spectral indexes to determine the presence of water: threshold-based methods and unsupervised classification to use the information from different spectral indexes at the same time. The different methods evaluated were coherent with the previous works although there is some delay between the temporal evolution of the estimated flood area and the river height at Ladário. The NDMI index has an issue to represent the flooded area as it is influenced by the vegetation during the wet period. However, considering the vegetation through the NDMI-NDVI index seems to improve the representation of the flooded area. The spatial map of the flooded area represents well the known hydrological features of the Pantanal. It should be noted that the threshold based methods have lower computational costs for similar results but the unsupervised classification methods can bring extra information.

The methods of flood detection presented in this study are simple methods which are based on spectral index and do not require important

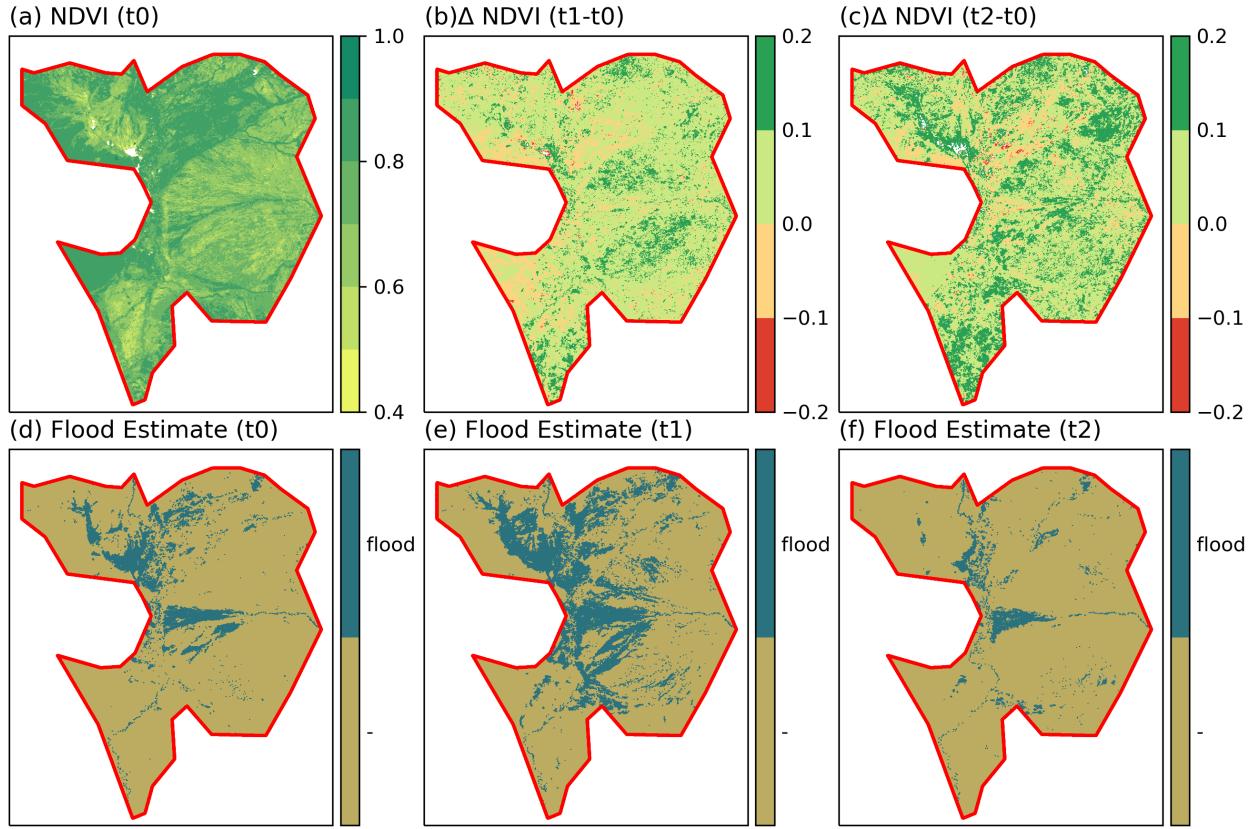


Figure 10: NDVI (a,b,c) and flood estimate (d,e,f) and for t0 (21/03/2004; a and d), t1(22/03/2007; b and e) and t2 (06/03/2021; c and f).

preprocessing. They may be divided into two categories: the threshold based methods on the one hand and the PCA based and k-means methods on the other hand. The threshold based methods consist in applying a threshold to the spectral indexes to detect the flooded area. This threshold can be determined in comparison with other data which gives an indication either on the flooded area or on the spatial extent of the floods. Different thresholds can be determined depending on the sensibility expected for its use. The PCA and k-means methods use unsupervised classification tools applied to a combination of the spectral indexes related to the presence of water. For the PCA method, the method consists in identifying the dimension related to the presence of water to calibrate and apply a threshold to this dimension. For the k-means, it consists in identifying the clusters which correspond to the

flooded area.

The advantage of all the above methods is that they can be easily applicable if the user has some observational data to establish a threshold. Then, it is possible to calculate other spectral indexes corresponding to other processes using the same optical satellite data to obtain a global panorama of the hydrological processes over a certain region quite easily with a reduced pre-processing. Nevertheless, these methods also present some disadvantages. The main disadvantage is related to the presence of cloud cover in optical satellite images which requires the filter of images containing clouds and, thus, may reduce the quantity of images available. Another disadvantage is the fact that the spectral indexes may be affected by other processes which impact the presence of water without being related to floods such as it may

be the case with the presence of lush vegetation.

Different solutions can be considered in order to face the issues presented previously although this may involve more sophisticated methods. Concerning the cloud cover, the combination of optical and SAR satellite data have been proven to improve the flood detection being able to solve both cloud cover issue for the optical satellite and noise from the SAR data (Prigent et al., 2020; Niedermeier et al., 2005; Ingla et al., 2016). Concerning the interaction of other processes with the flood detection when using optical satellite data, there are other methods that can be considered. The simpler process consists of developing customized spectral indexes using a linear combination of the spectral bands in order to better differentiate the vegetation from the flooded water such as it is done in other application such as the Floating Algae Index (FAI) (Dogliotti et al., 2018) used to differentiate the presence of algae in the water. Another option is, instead of evaluating the presence of flood over each pixel individually, to consider the pixels by group of pix-els such as it can be done with the Object Based Image Analysis (Blaschke et al., 2014). This may help to better determine if the pixels in an object are flooded by using (1) the distribution of the reflection of the pixels composing each group and (2) the shape of the object (Louzada et al., 2020). The flood detection can also be improved by using additional ancillary data about the local orography using Digital Elevation Models. Finally, some more advanced methods of machine learning classification can be used but they require more precise information on the pixels which are flooded in order to fit the model. Unfortunately, this type of information is not always available.

Finally, we would like to emphasize that the difficulty to detect the flooded vegetation also lies in the difficulty to define a limit to qualify whether a pixel is flooded or whether it is just a

pixel representing a moist soil.

Agradecimientos: We would like to gratefully acknowledge the support of the Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), Argentina (PICTs 2017-1406, 2018-02511); the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina (PIP 11220200102141CO); the French-Argentina project ECOS-Sud 2018 co-financed by the Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MINCyT), Argentina and the Université Sorbonne Paris Nord, Francia (ECOS-A18D04); and the French National LEFE program (Les Enveloppes Fluides et l'Environnement; LEFE 12962).

REFERENCES

- Acharya, T.D., Subedi, A., Lee, D.H., 2018: Evaluation of Water Indices for Surface Water Extraction in a Landsat 8 Scene of Nepal. Sensors, 18, 2580. doi:10.3390/s18082580
- Alho, C.J.R., 2005: The Pantanal. In L. Fraser P. Keddy (Eds.), The World's Largest Wetlands: Ecology and Conservation, Cambridge University Press, pp. 203-271. doi:10.1017/CBO9780511542091.008
- Assine, M.L., 2005: River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. Geomorphology, 70(3-4), pp. 357-371. doi:10.1016/j.geomorph.2005.02.013
- Blaschke, T., Hay, G.J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E., Feitosa, R.Q., van der Meer, F., van der Werff, H., van Coillie, F., Tiede, D., 2014: Geographic Object-Based Image Analysis - Towards a new paradigm. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87, pp. 180-191. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014
- Boschetti M., Nutini F., Manfron G., Brivio P.A., Nelson A., 2014: Comparative Analysis of Normalised Difference Spectral Indices Derived from MODIS for Detecting Surface Water in Flooded

- Rice Cropping Systems. PLoS ONE 9, 2. doi:10.1371/journal.pone.0088741
- Dadson, S. J., Ashpole, I., Harris, P., Davies, H. N., Clark, D. B., Blyth, E., Taylor, C. M., 2010. Wetland inundation dynamics in a model of land surface climate: Evaluation in the Niger inland delta region. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115, D23114. doi:10.1029/2010JD014474
- Dogliotti, A. I., Gossn, J. I., Vanhellemont, Q., Ruddick, K. G., 2018: Detecting and quantifying a massive invasion of floating aquatic plants in the Río de la Plata turbid waters using high spatial resolution ocean color imagery. *Remote Sensing*, 10, pp. 1140-1154. doi:10.3390/rs10071140
- Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Rebelo, L. M., Papa, F., Hamilton, S. K., 2015: Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 158, pp 348-361. doi:10.1016/j.rse.2014.10.015
- Gao, B. C., 1996: NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 3, pp 257-266. doi: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Getirana, A., Kumar, S. V., Konapala, G., Ndehedehe, C. E., 2021: Impacts of Fully Coupling Land Surface and Flood Models on the Simulation of Large Wetlands' Water Dynamics: The Case of the Inner Niger Delta. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, 3. doi:10.1029/2021MS002463
- Gond, V., Bartholomé, E., Ouattara, F., Nonguierma, A., Bado, L., 2004: Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarqué sur SPOT-4. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 5, pp. 987-1004. doi:10.1080/0143116031000139908
- Hamilton, S. K., Sippel, S. J., Melack, J., 1996: Inundation patterns in the Pantanal Wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. *Archiv für Hydrobiologie*, 137, 1, pp. 1-23.
- doi:10.1127/archiv-hydrobiol/137/1996/1
- Hamilton, S. K., Sippel, S. J., Melack, J. M., 2002: Comparison of inundation patterns among major South American floodplains. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107, D20, pp. LBA 5-1-LBA 5-14. doi:10.1029/2000JD000306
- Hu, C., 2009: A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2118–2129. doi:10.1016/J.RSE.2009.05.012
- Ingla, J., Vincent, A., Arias, M., Marais-Sicre, C., 2016: Improved early crop type identification by joint use of high temporal resolution sar and optical image time series. *Remote Sensing*, 8, pp. 362-382. doi:10.3390/rs8050362
- Jolliffe, I. T., Cadima, J., 2016: Principal component analysis: A review and recent developments, 374, 2065. doi:10.1098/rsta.2015.0202
- Junk, W. J., Bayley, P. B., Sparks, R. E., 1989: The flood pulse concept in river-floodplain systems. D. P. Dodge [ed.] *Proceedings of the International Large River Symposium*. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 106, pp. 110–127.
- Lloyd, S. P., 1982: Least Squares Quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, 28, 2, pp. 129-137.
- Louzada, R. O., Bergier, I., Assine, M. L., 2020: Landscape changes in avulsive river systems: Case study of Taquari River on Brazilian Pantanal wetlands. *Science of the Total Environment*, 723, 138067. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138067
- Nardi, F., Annis, A., Baldassarre, G. Di, Vivoni, E. R., Grimaldi, S., 2019: GFPLAIN250m, a global high-resolution dataset of earth's floodplains. *Scientific Data*, 6, 180309. doi:10.1038/sdata.2018.309
- Niedermeier, A., Hoja, D., Lehner, S., 2005: Topography and morphodynamics in the German Bight using SAR and optical remote sensing data. *Ocean Dynamics*, 55, pp. 100-109. doi:10.1007/s10236-005-0114-2
- Ogilvie, A., Belaud, G., Delenne, C., Bailly, J. S., Bader, J. C., Oleksiak,

- A., Ferry, L., Martin, D., 2015: Decadal monitoring of the Niger Inner Delta flood dynamics using MODIS optical data. *Journal of Hydrology*, 523, pp. 368-383. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.036
- Padovani, 2010: PhD thesis "Dinâmica Espaço-Temporal das Inundações do Pantanal". Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, pp. 175. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-14022011-170515/pt-br.php>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A. S., 2016: High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422. doi:10.1038/nature20584
- Pereira, G. H. D. A., Júnior, C. C., Fronza, G., Deppe, F. A. C., 2019: MULTITEMPORAL ANALYSIS OF SAR IMAGES FOR DETECTION OF FLOODED AREAS IN PANTANAL. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, 46(3), 88-100. doi:10.5380/raega.v46i3.66988
- Prigent, C., Jimenez, C., Bousquet, P. (2020). Satellite-Derived Global Surface Water Extent and Dynamics Over the Last 25 Years (GIEMS-2). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(3). doi:doi.org/10.1029/2019JD030711
- Rouse, W., Haas, R. H., Deering, D. W., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium- Volume I: Technical Presentations. NASA SP-351, pp. 309.
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., Nickless, D., 2004: Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research*, 34(4), 710-714. doi:10.1016/j.asr.2004.03.012
- Schrapffer, A., Sörensson, A., Polcher, J., Fita, L., 2020: Benefits of representing floodplains in a Land Surface Model: Pantanal simulated with ORCHIDEE CMIP6 version. *Climate Dynamics*, 55, pp. 1303-1323. doi:10.1007/s00382-020-05324-0
- Taylor, C. M., 2010. Feedbacks on convection from an African wetland. *Geophysical Research Letters*, 37, 5. doi:10.1029/2009GL041652, 2010
- van der Meer, F. D., van der Werff, H. M., van Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., van der Meijde, M., Carranza, E. J. M., de Smeth, J. B., Woldai, T., 2012: Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review, 14, 1, pp. 112-128. doi:10.1016/j.jag.2011.08.002
- Vermote, E. F., Saleous, N. Z., 2006: Operational atmospheric correction of modis visible to middle infrared land surface data in the case of an infinite lambertian target. *Earth Science Satellite Remote Sensing: Science and Instruments*. Springer, pp. 123-153. doi:10.1007/978-3-540-37293-6_8
- Verstraete, M. M., Pinty, B., 1996: Designing optimal spectral indexes for remote sensing applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34, 5, pp. 1254-1265. doi: 10.1109/36.536541
- Xu, H., 2006: Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 14, pp. 3025-3033. doi:10.1080/01431160600589179
- Xue, J., Su, B., 2017: Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017. doi:10.1155/2017/1353691

ANÁLISIS DE REPORTES DE OCURRENCIA DE TIEMPO SEVERO EN SUPERFICIE PARA EL CENTRO-NORTE DE LA ARGENTINA DURANTE LA TEMPORADA 2018-2019

Melissa Natalia Patanella^{1,2} y Henrique Fuchs Bueno Repinaldo³

¹Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

²Servicio Meteorológico Nacional Argentina

³Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru, SP, Brasil

(Manuscrito recibido el 27 de diciembre de 2021, en su versión final el 30 de mayo de 2022)

ABSTRACT

En el centro y norte de la Argentina se dan algunas de las tormentas más intensas del mundo, y su inicio y desarrollo está fuertemente influenciado por la orografía de la cordillera de los Andes y las sierras de Córdoba. Estas tormentas se asocian a la ocurrencia de fenómenos de tiempo severo que generan importantes daños materiales y grandes pérdidas económicas tanto en áreas rurales como en urbanas.

El objetivo de este trabajo fue realizar el estudio observacional de la distribución espacial y temporal de diversos reportes de fenómenos de tiempo severo en superficie, en particular de caída de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas. Se encontró que estos fenómenos tendieron a darse en horas de la tarde y comienzo de la noche, y que la mayoría de los reportes fueron hacia fines de primavera y principios del verano. A su vez, se realizó un análisis especial del granizo, en el cual se determinó que a medida que aumentó su tamaño, disminuyó su densidad de acumulación.

Keywords: *reportes de tiempo severo, Argentina, granizo, viento fuerte, lluvia intensa.*

ANALYSIS OF SURFACE SEVERE WEATHER REPORTS IN CENTRAL-NORTHERN ARGENTINA DURING THE 2018-2019 SEASON

RESUMEN

Some of the most intense thunderstorms in the world take place in central and northern Argentina, and their start and development is strongly influenced by the orography of the Andes and sierras de Córdoba. These thunderstorms are associated with the occurrence of severe weather phenomena that generate important material damages and economic loss in rural and urban areas.

The aim of this paper was to do the observational study of the spatial and temporal distribution of different severe weather phenomena, in particular, hail, intense rain and strong winds with gusts. Most of these events took place between the evening and midnight, and also between late Spring and early Summer. At the same time, while studying the occurrence of hail, it was found that its density of accumulation decreased as its diameter increased.

Palabras clave: severe weather reports, Argentina, hail, strong winds with gusts, intense rain.

1. INTRODUCCIÓN

En el Sudeste de Sudamérica (SESA) y en particular en el centro de la Argentina ocurren algunas de las tormentas más intensas del planeta (eg. Romatschke y Houze, 2010; Cecil y Blankenship, 2012; Houze et al., 2015) que con frecuencia evolucionan en sistemas convectivos de mesoscala (MCSs, Mesoscale Convective Systems). Estas tormentas producen con frecuencia fenómenos de tiempo severo en superficie como fuertes ráfagas de viento, granizo de gran tamaño, inundaciones repentinas e incluso tornados (eg. Matsudo y Salio, 2011; Rasmussen y Houze, 2010; Cecil y Blankenship, 2012; Mezher et al., 2012; Rasmussen et al., 2014; Piersante, 2017; Mulholland et al., 2018). La región de la cordillera de los Andes y las sierras de Córdoba cuenta con diversos mecanismos geográficos de disparo de la convección húmeda profunda, lo cual resulta favorable para el inicio, desarrollo y mantenimiento de los MCSs que se propagan hacia el este sobre la Cuenca del Plata (eg. Romatschke y Houze, 2010; Cecil y Blankenship, 2012; Vidal, 2014; Houze et al., 2015; Repinaldo et al., 2015, 2017; Repinaldo, 2019; Piersante, 2017).

Las influencias combinadas de varios factores atmosféricos, como la corriente en chorro de capas bajas de Sudamérica (SALLJ, South American Low Level Jet) (Nicolini et al., 2006) y la topografía compleja permiten explicar los recurrentes eventos de tiempo severo en la región (Romatschke y Houze, 2010).

Se ha demostrado que la generación de tiempo severo es altamente dependiente del modo convectivo (Dial et al., 2010) y, en particular, las superceldas y bow echoes (Fujita, 1978) se asocian a una alta probabilidad de caída de granizo y hasta tornados (eg. Markowski y Richardson, 2010). Además, en los alrededores

de las sierras de Córdoba, gran parte de las tormentas tienden a iniciarse al comienzo de la tarde y hacia el final del día, en especial durante los meses del verano austral, es decir en diciembre, enero y febrero (Mulholland et al., 2018).

La caída de granizo en Argentina resulta en importantes daños materiales y como consecuencia, grandes pérdidas económicas, en especial en regiones rurales en las cuales se desarrolla la agricultura o en áreas urbanas con gran densidad poblacional (Rasmussen et al., 2014; Farnell et al., 2016; Punge y Kunz, 2016; Piersante, 2017; Prein y Holland, 2018). Kumjian et al. (2020) han estimado que un granizo que precipitó en la ciudad cordobesa de Villa Carlos Paz en el 2018 tuvo una dimensión entre 18.8 y 23.7 cm, la cual está cerca o sobrepasa el récord actual de 20.32 cm registrado en la ciudad de Vivian, Dakota del Sur, Estados Unidos (Pojorlie et al., 2013).

Diversos estudios demostraron que el centro y norte de la Argentina se destaca como una de las regiones a nivel mundial con mayor frecuencia de ocurrencia de tormentas asociadas a la caída de granizo (Matsudo y Salio, 2011; Cecil y Blankenship, 2012) y, en particular, la base de la cordillera de los Andes y las sierras de Córdoba (Rasmussen et al., 2014), con máximos en las provincias de Mendoza y Córdoba (Mezher et al., 2012). Las tormentas generadoras de granizo en el norte del país alcanzan su máximo desarrollo hacia el comienzo de la noche (García-Ortega et al., 2009; Cecil y Blankenship, 2012), con una máxima frecuencia de ocurrencia durante el verano, seguido de la primavera (Mezher et al., 2012).

Otro de los fenómenos que genera graves daños socio-económicos es la ocurrencia de lluvias intensas, que pueden presentarse de forma aislada o como parte de un MCS (Velasco

y Fritsch, 1987). En particular, debido a los importantes acumulados de precipitación en poco tiempo, estos eventos se asocian a un gran potencial de anegamientos e inundaciones. La ocurrencia de inundaciones fue el fenómeno que causó más destrucción en la Argentina entre 1980 y 2010 (Choi, 2016). Trabajos previos han estimado que en el noreste de la Argentina los MCSs son responsables de hasta el 70 % de la precipitación durante el verano (eg. Durkee et al., 2009; Feng et al., 2021). Además, la frecuencia de ocurrencia de lluvias intensas es máxima hacia el comienzo de la noche en el norte de la Argentina (García-Ortega et al., 2009; Cecil y Blankenship, 2012).

Por último, las ráfagas y vientos fuertes son otro de los fenómenos responsables de la generación de considerables daños y pérdidas tanto sociales como económicas en Argentina y en el resto del mundo (Pita y Altlinger de Schwarzkopf, 2016; Lombardo y Zickar, 2019). Se ha demostrado que, en general, las ráfagas de viento más fuertes que resultan destructivas se asocian a la presencia de descendentes de tormentas intensas y, en particular, a la ocurrencia de tornados (Rasmussen et al. 2014, Durañona, 2016). Pita y Altlinger de Schwarzkopf (2016) demostraron que en la Argentina se dieron gran cantidad de eventos de vientos que generaron daños socio-económicos y a partir de ello, los clasificaron a través de la escala Fujita, dando como resultado que la mayoría se ubicaron en las categorías F0 y F1, correspondientes a velocidades entre 64 y 180 km h⁻¹. Según los autores, entre 1971 y 1998 ocurrieron 83 casos de downbursts, y entre 1930 y 1999 se registraron 470 eventos de tornados en el país.

Estudios previos han demostrado que el incremento de las pérdidas por daños asociados a la ocurrencia de tormentas severas es resultado directo de la densidad poblacional (eg. Changnon y Burroughs, 2003; Changnon, 2009), debido a esto, las regiones urbanizadas tienen mayor cantidad de reportes de eventos extremos en comparación a las áreas rurales (eg. Dobur, 2005). Por lo tanto, los estudios sobre

cambios a lo largo del tiempo en la intensidad y frecuencia de ocurrencia de estos fenómenos a partir de reportes de superficie son más inciertos (Changnon, 2009).

Con el fin de profundizar el conocimiento acerca del inicio y desarrollo de las tormentas convectivas que producen eventos de tiempo severo a través de observaciones meteorológicas al pie de la cordillera de los Andes, se desarrolló el Proyecto RELAMPAGO (Remote Sensing of Electrification, Lightning, And Mesoscale/microscale Processes with Adaptive Ground Observations) que permitió la realización de una campaña de medición extensiva en las provincias de Córdoba y Mendoza entre el 1° de junio de 2018 y el 30 de abril de 2019, con un período de observación intensiva comprendido entre el 1° de noviembre y el 18 de diciembre de 2018.

El objetivo de este trabajo es realizar el estudio de la distribución espacio-temporal de distintos tipos de reportes de tiempo severo que tuvieron lugar en la región centro-norte de Argentina entre el 1° de noviembre del 2018 y el 30 de abril del 2019.

En la sección “Datos y Metodología” se describen los diferentes conjuntos de datos utilizados en este trabajo. En la sección “Resultados” se expone el análisis de los reportes de caída de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas a partir de portales de noticias y diarios, publicaciones en diferentes redes sociales y de observaciones meteorológicas de superficie y mensajes aeronáuticos emitidos por la red de observación del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN). Por último, se presentan las conclusiones más relevantes de este trabajo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

En la figura 1 se presenta el dominio espacial, el cual se definió entre las latitudes 37°S y 21°S, y las longitudes 72°O y 52°O, comprendiendo el centro-norte de la Argentina. El dominio se

dividió en cuatro regiones, cada una abarcando las siguientes provincias:

- Centro: Norte de Buenos Aires y La Pampa, Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Córdoba, Entre Ríos y Santa Fe,
- Cuyo: Mendoza, La Rioja, San Juan y San Luis,
- Noreste (NEA): Chaco, Corrientes, Formosa y Misiones,
- Noroeste (NOA): Catamarca, Jujuy, Salta, Santiago del Estero y Tucumán.

La separación del dominio en subregiones toma en cuenta lo dispuesto por el Artículo 124 de la Constitución Nacional, en donde se establecen cuatro regiones según sus características históricas, geográficas y sociales: Centro, Cuyo, Norte y Patagonia. A su vez, la región Norte se dividió en NOA y NEA según un tratado inter provincial en 1999. Según estos lineamientos, la provincia de La Pampa pertenece a la Patagonia y la provincia de Buenos Aires no pertenece a una región en particular, sin embargo ambas fueron tratadas como parte de la región Centro en este trabajo por presentar características similares a las otras provincias que conforman la región.

A pesar de contar con reportes de tiempo severo a lo largo de todo el país, se eligió este dominio debido a que aproximadamente un 80 % de los registros tuvieron lugar en esta región.

El dominio temporal se definió desde el 1° de noviembre del 2018 hasta el 30 de abril del 2019, coincidente con la extensión temporal de los registros de eventos de tiempo severo durante el proyecto RELÁMPAGO.

En este trabajo se utilizaron tres conjuntos de datos conteniendo diferentes reportes de ocurrencia de tiempo severo en superficie dentro del dominio espacial y temporal de interés.

Para comenzar, se contó con un set de datos de 1092 observaciones producto del relevamiento de eventos severos realizado en el marco del proyecto RELÁMPAGO. Si bien los reportes corresponden a toda la superficie de la Argentina, la mayoría se encontraban en la región central y norte del país. Los reportes fueron tomados a partir de publicaciones, fotos y videos de redes sociales; portales de noticias online; contribuciones de los ciudadanos, de participantes de la campaña y propios. Para generar esta base de datos se difundió un formulario (http://bit.ly/eventos_severos) a través de la cuenta educativa de Twitter del Proyecto RELÁMPAGO-CACTI, RELÁMPAGO_edu (@RelampagoEdu). Esto estuvo a cargo de estudiantes de grado y posgrado de la Licenciatura en Meteorología y Ciencias de la Atmósfera de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata y de la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, además de ser auspiciado por diversas instituciones, organizaciones y proyectos con el fin de recolectar información que contribuya a una mejora en el pronóstico meteorológico de eventos severos, en particular en la Argentina.

Se relevaron reportes de granizo, ráfagas y vientos fuertes, rayos o truenos, lluvias intensas, tornados, torbellinos de polvo, trombas o nubes embudo, cada uno acompañado de datos acerca de su localización y horario de ocurrencia. A su vez, se contó con las características asociadas a cada evento en particular. En la figura 2 se muestra un caso de cada uno de los eventos a modo de ejemplo, haciendo referencia a los tres fenómenos de interés, granizo (figura 2, a-g), ráfagas o vientos fuertes (figura 2, h), o lluvia intensa (figura 2, i).

La geolocalización de cada uno de los reportes se hizo a partir de las coordenadas asociadas a cada evento, ya que cada uno contaba con datos acerca del lugar de ocurrencia, por ejemplo la ciudad, pueblo, paraje o incluso la intersección

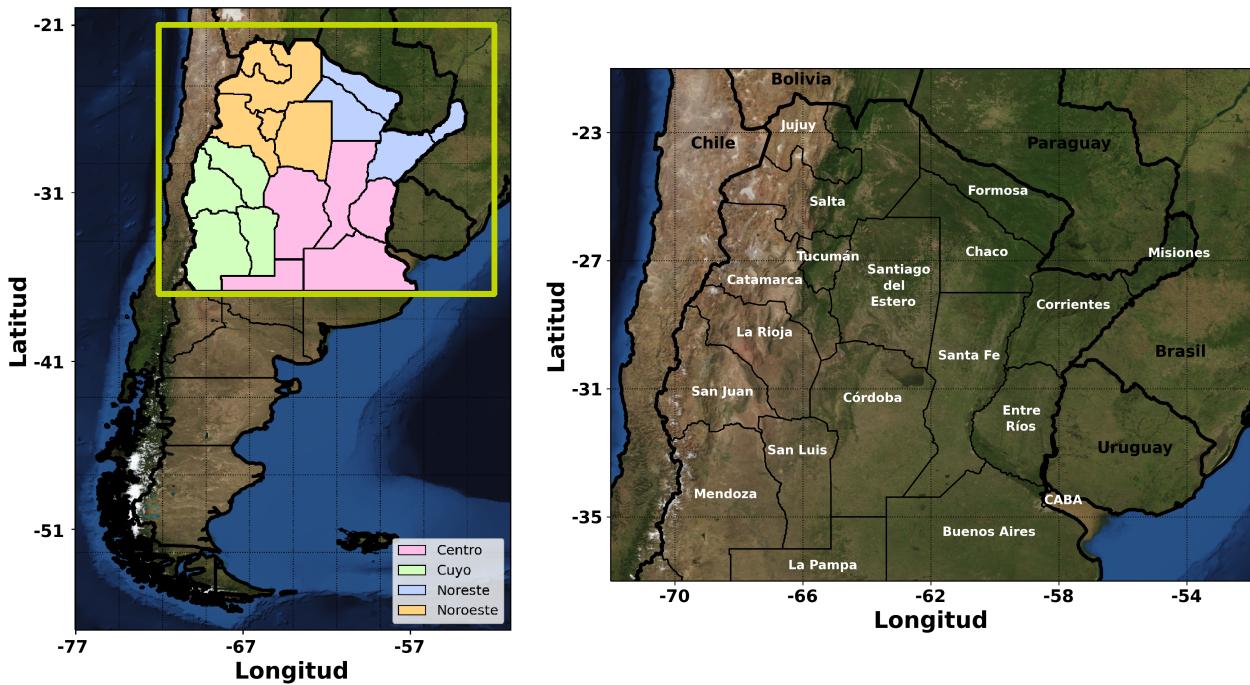


Figura 1: Dominio espacial que abarca el centro y norte de la Argentina, definido entre las latitudes 37°S y 21°S, y las longitudes 72°O y 52°O. Tomado de "Precursores de convección profunda asociada a la ocurrencia de tiempo severo en superficie en el centro-norte de la Argentina", por Patanella (2021).

de calles. Se trabajó con el Tiempo Universal Coordinado (UTC) para las figuras pero en Hora Oficial Argentina (HOA) para el análisis de la distribución horaria de los reportes. Si bien se contaba con la hora aproximada de ocurrencia de cada fenómeno, en este trabajo se agruparon los reportes según la hora entera más cercana.

En cuanto al granizo, se detalló su tamaño a través de la medición de su diámetro o una estimación del mismo mediante la comparación con objetos conocidos (e.g arvejas, monedas, pelotas de golf y naranjas); y su densidad de acumulación con la medición del espesor de la capa o a través de una estimación visual (figura 2 e-g). Tal como se expresa en la figura 2, los eventos de granizo se clasificaron según su tamaño en ≤ 1.5 cm, ≈ 2.5 cm (para granizos entre 1.6 y 3 cm), ≈ 4 cm (para granizos entre 3.1 y 7.9 cm) y ≥ 8 cm; y su densidad de acumulación en poca, moderada y abundante.

Para las ráfagas y/o vientos fuertes, se recolectó información acerca de la magnitud y dirección predominante del viento a través de mediciones con Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), o estimaciones de la velocidad a partir de daños en estructuras, por ejemplo, roturas, pérdidas o colapsos de techos, ventanas, puertas, paredes, columnas, postes de luz, semáforos, torres de comunicación o alta tensión, silos, carteles, alambrados o árboles.

En relación a las lluvias intensas, se buscaron datos de pluviómetros convencionales o EMAs y se tuvo en cuenta la ocurrencia de inundaciones, anegamientos y/o crecidas.

Para los casos de tornados, trombas, remolinos de polvo y/o nubes embudo y rayos o truenos se detalló su ocurrencia sin realizar una caracterización más profunda.

Para complementar la base de datos de



Figura 2: Representación a través de ejemplos de los diferentes tamaños y distribuciones de granizo, daños producidos por ráfagas o vientos fuertes, y lluvias intensas. Granizo de (a) ≤ 1.5 cm, (b) ≈ 2.5 cm, (c) ≈ 4 cm, y (d) ≥ 8 cm de diámetro. (e) Poca, (f) moderada, y (g) abundante caída de granizo. Daños y destrozos producidos por (i) ráfagas y vientos fuertes, y (j) lluvias intensas. La fecha, hora, lugar de ocurrencia y fuente de cada imagen se detallan a continuación: (a) 27/12/2018 17:45 hs, Villa Giardino, Córdoba (nexodiario.com); (b) 08/11/2018 18:00 hs, Napaleofú, Buenos Aires (eleco.com.ar); (c) 11/12/2018 16:40 hs, Miramar, Córdoba (lavoz.com.ar); (d) 23/02/2019 20:00 hs, Barrio de Empalme, Córdoba (cadena3.com); (e) 29/11/2018 15:30 hs, Sampacho, Córdoba (eldoce.tv); (f) 31/12/2018 18:20 hs, Darregueira, Buenos Aires (darregueiranoticias.blogspot.com); (g) 28/12/2018 16:20 hs, Guandacol, La Rioja (riojavirtual.com.ar); (h) 15/04/2019 10.00 hs, Esperanza, Santa Fe (airedesantafe.com.ar); (i) 22/10/2018 21.00hs, Apolinario Saravia, Salta (eltribuno.com).

Mulholland et al. (2018), encontraron que la mayoría de las tormentas en la región de las sierras de Córdoba, incluida en el dominio de este trabajo, tienen un máximo de ocurrencia durante los meses de diciembre, enero y febrero, es decir, durante los meses de verano austral.

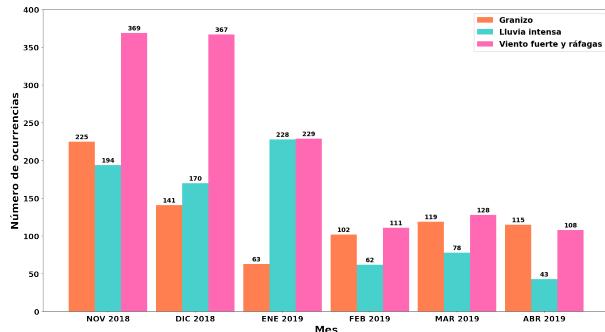


Figura 4: Total de reportes dentro del dominio de estudio por mes.

A continuación se presenta el análisis de las distribuciones mensuales, horarias y espaciales para cada tipo de reporte.

3.1. Granizo

En la figura 5 se expone la distribución mensual y en la figura 6 la horaria de los reportes de granizo mostrando las diferentes combinaciones de tamaños y densidades de acumulación. Según lo exhibido en las figuras 5 y 6, se destaca la ocurrencia de granizos de pequeño tamaño y también los reportes asociados a una abundante acumulación de este hidrometeoro. De todos los registros, la mayoría correspondió a los de pequeño tamaño (≤ 1.5 cm), con una abundante densidad de caída, seguida por poca acumulación. Luego, se evidenció un número mucho menor de reportes asociados a los de diámetro mediano (2.5, 4 cm) y por último, la menor cantidad de registros se asoció a los de gran tamaño (≥ 8 cm). En general los reportes de granizo pequeños se asociaron a la abundante densidad de caída, mientras que los de mayor tamaño, a la poca y moderada acumulación.

La distribución mensual de los reportes de granizo, expuesta en la figura 5, muestra que el mayor número de reportes tuvo lugar durante

noviembre, sin embargo se pudieron observar máximos en los extremos del dominio temporal, ya que la cantidad de reportes disminuyó de manera significativa hasta alcanzar un mínimo en enero y luego aumentó nuevamente hacia abril. Esto se encontró modulado principalmente por los hidrometeoros de pequeño tamaño con una abundante y poca densidad de caída. Sin embargo, el máximo número de reportes asociados a granizos mayores a 1.5 cm tuvo lugar en noviembre y diciembre, disminuyendo a lo largo de los meses, para todos los tipos de acumulación. Mezher et al. (2012) encontraron una mayor frecuencia de eventos de granizo durante el verano, seguido de la primavera en las regiones del Cuyo y del NOA, mientras que en las otras regiones la máxima frecuencia ocurre en la primavera seguido del verano. A la vez, el trabajo de Piersante (2017) indica que la mayor frecuencia de ocurrencia de granizo fue en verano para la región de Cuyo y, en particular, en la primavera para la provincia de Córdoba.

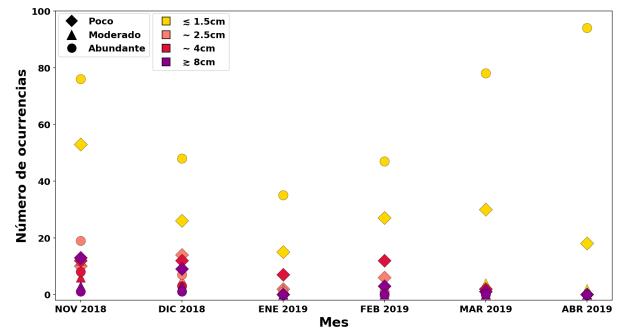


Figura 5: Combinación de tamaños y densidades de acumulación de granizo por mes. Los distintos colores indican los diferentes tamaños de granizo y las formas se corresponden a la densidad de acumulación.

A partir de la distribución horaria de los reportes de granizo, mostrada en la figura 6, se evidenció que la mayor cantidad de todos los tamaños y densidades se registró durante la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), luego de la formación de tormentas en la región de estudio. El inicio de la convección por la tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA) en dicha zona, luego del máximo calentamiento de la superficie,

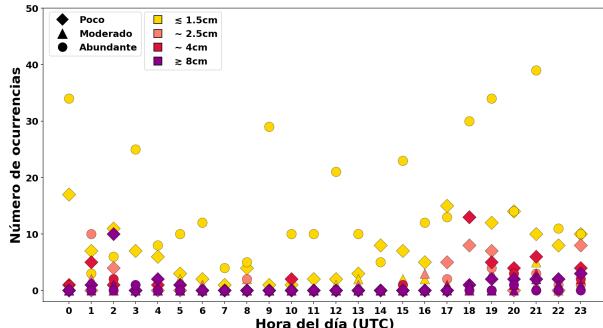


Figura 6: Combinación de tamaños y densidades de acumulación de granizo por hora. Los distintos colores indican los diferentes tamaños de granizo y las formas se corresponden a la densidad de acumulación.

fue estudiado en diversos trabajos, como los de Velasco y Fritsch (1987), Salio y Nicolini (2006), Romatschke y Houze (2010) y Vidal (2014).

Los hidrometeoros mayores a 1.5 cm tuvieron un máximo de frecuencia de ocurrencia por la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), y se asociaron a la poca y moderada densidad de acumulación. Sin embargo, los granizos de pequeño tamaño, si bien coincidieron con los máximos a partir de la tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA), tuvieron un comportamiento más equitativo en cuanto a su distribución horaria y la mayor parte de ellos correspondieron a la abundante caída seguida de poca acumulación.

A partir de los datos provistos en las figuras 5 y 6, se evidenció que los granizos de pequeño diámetro tendieron a precipitar de forma abundante, y a medida que aumentó su tamaño, disminuyó su densidad de acumulación.

En la figura 7 se muestra la distribución espacio-temporal de todos los tipos de reportes. De forma similar, en la 8 se exhibe la correspondiente a los diferentes tamaños y en la 9 a los distintos tipos de acumulación de granizo.

Tal como se observa en la figura 7, la mayor parte de los reportes de todos los tamaños de

granizo se dieron en las regiones Centro y Cuyo, en particular se destacaron las provincias de Córdoba y Mendoza. A partir de lo presentado en la figura 8, el máximo número de reportes de granizos de pequeño tamaño se ubicó en Buenos Aires, Córdoba y Mendoza, y los de gran tamaño en la provincia de Buenos Aires, Córdoba, La Pampa y San Luis, en ambos casos alcanzando un máximo en noviembre. Se observó una disminución de la cantidad de registros de granizo a lo largo de los meses para todas las provincias. En particular para los granizos $\leq 1.5\text{ cm}$, si bien el máximo de ocurrencia fue en noviembre y diciembre en Córdoba y Mendoza, al igual que para el resto de los tamaños, a lo largo de los meses se observó que los reportes tuvieron una distribución más equitativa respecto a las provincias en donde ocurren. En cambio, para los granizos de $\approx 2.5\text{ cm}$ se destacó la ocurrencia en la provincia de Mendoza, para los de $\approx 4\text{ cm}$ en Córdoba y Mendoza, y los $\geq 8\text{ cm}$ en la Provincia de Córdoba, en particular durante noviembre y diciembre. Los reportes mostraron que para los granizos de tamaño pequeño a mediano ($\approx 2.5\text{ cm}$) se destacó la ocurrencia en Mendoza y a medida que aumentó el diámetro el epicentro se corre hacia Córdoba, lugar en el cual se destacó la ocurrencia de granizos de gran tamaño.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la figura 9, se destacó la ocurrencia de poca y moderada caída de granizo en la provincia de Buenos Aires, Mendoza y en particular Córdoba, entre noviembre y diciembre, con una disminución importante hacia abril. La mayor cantidad de registros correspondientes a la abundante caída de granizo se dieron en las provincias de Córdoba y en especial en Mendoza, aunque hubo reportes en todos las regiones y por ende en todas las provincias, durante todos los meses. Se observó que a lo largo del tiempo dentro del dominio temporal, la distribución de los eventos de granizo abundante se distribuyó de manera más equitativa entre las provincias.

La ocurrencia de gran cantidad de reportes de granizo en las regiones de Centro y Cuyo, con

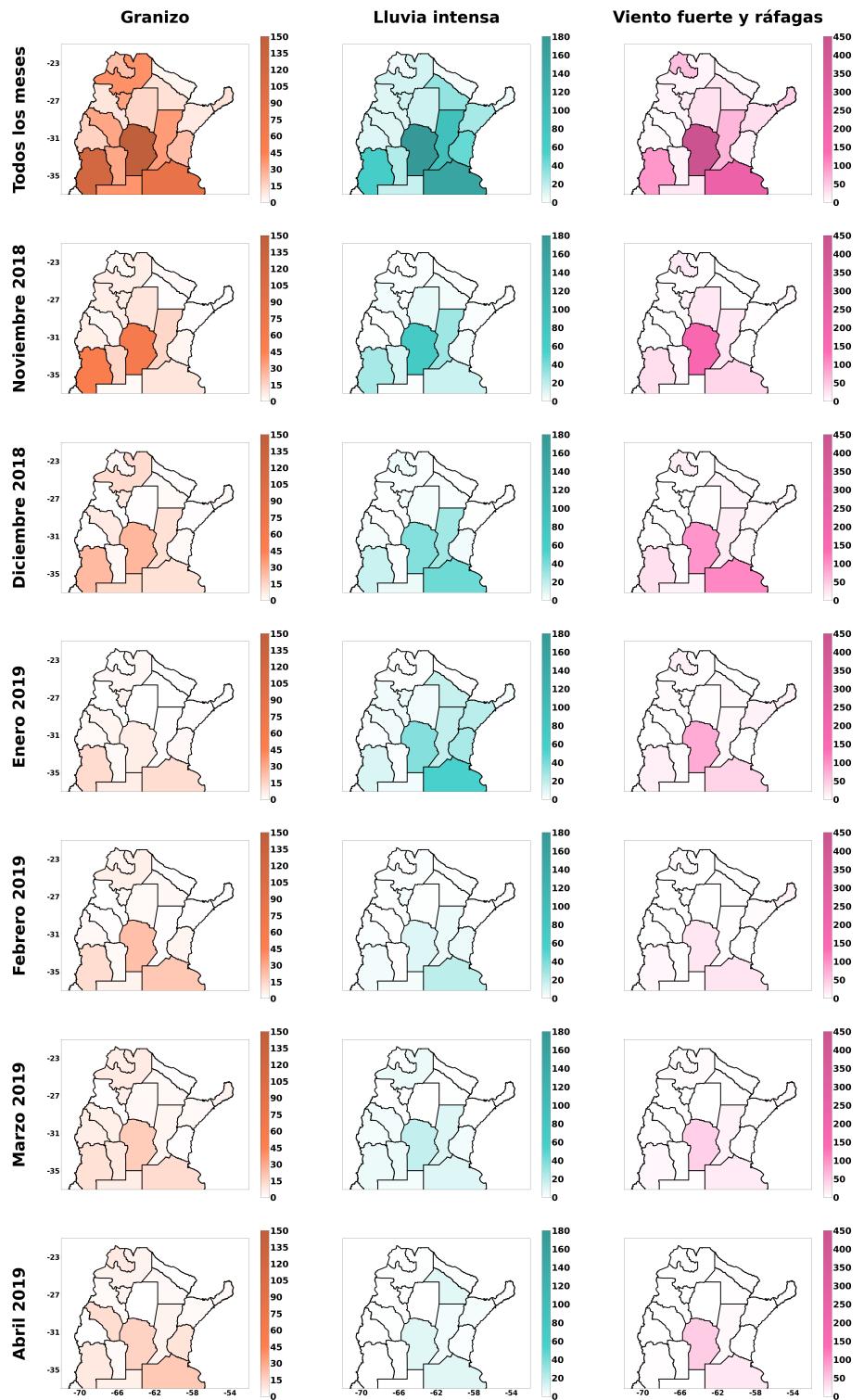


Figura 7: Distribución espacial por provincias de todos los eventos que tuvieron lugar entre los meses de noviembre 2018 y abril 2019 para todos los reportes y por mes (filas), discriminados por tipo de fenómeno - granizo, lluvias intensas y ráfagas (columnas).

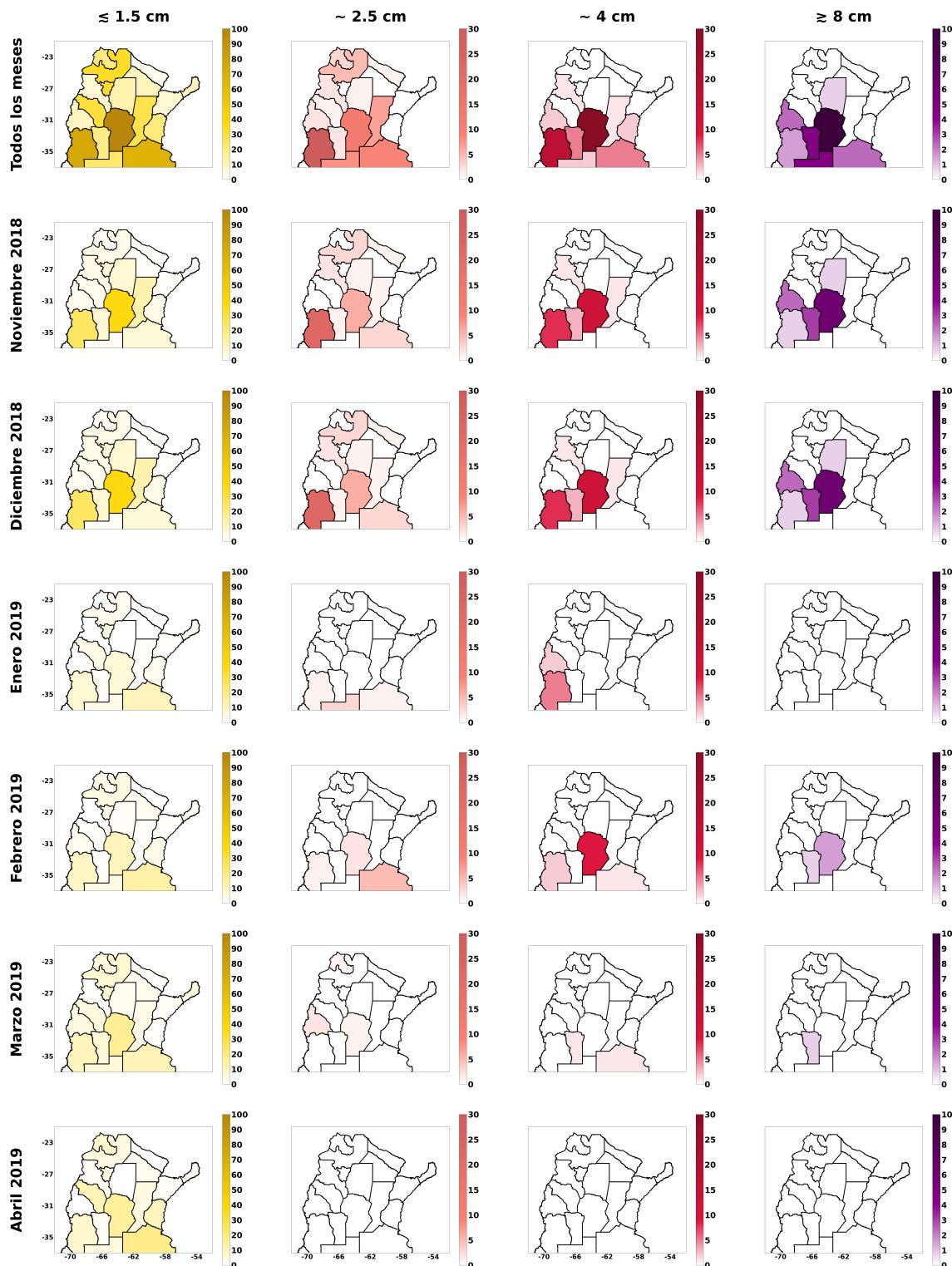


Figura 8: Distribución espacial por provincias de eventos de granizo que tuvieron lugar entre los meses de noviembre 2018 y abril 2019 para todos los reportes y por mes (filas), discriminados por tamaños (columnas).

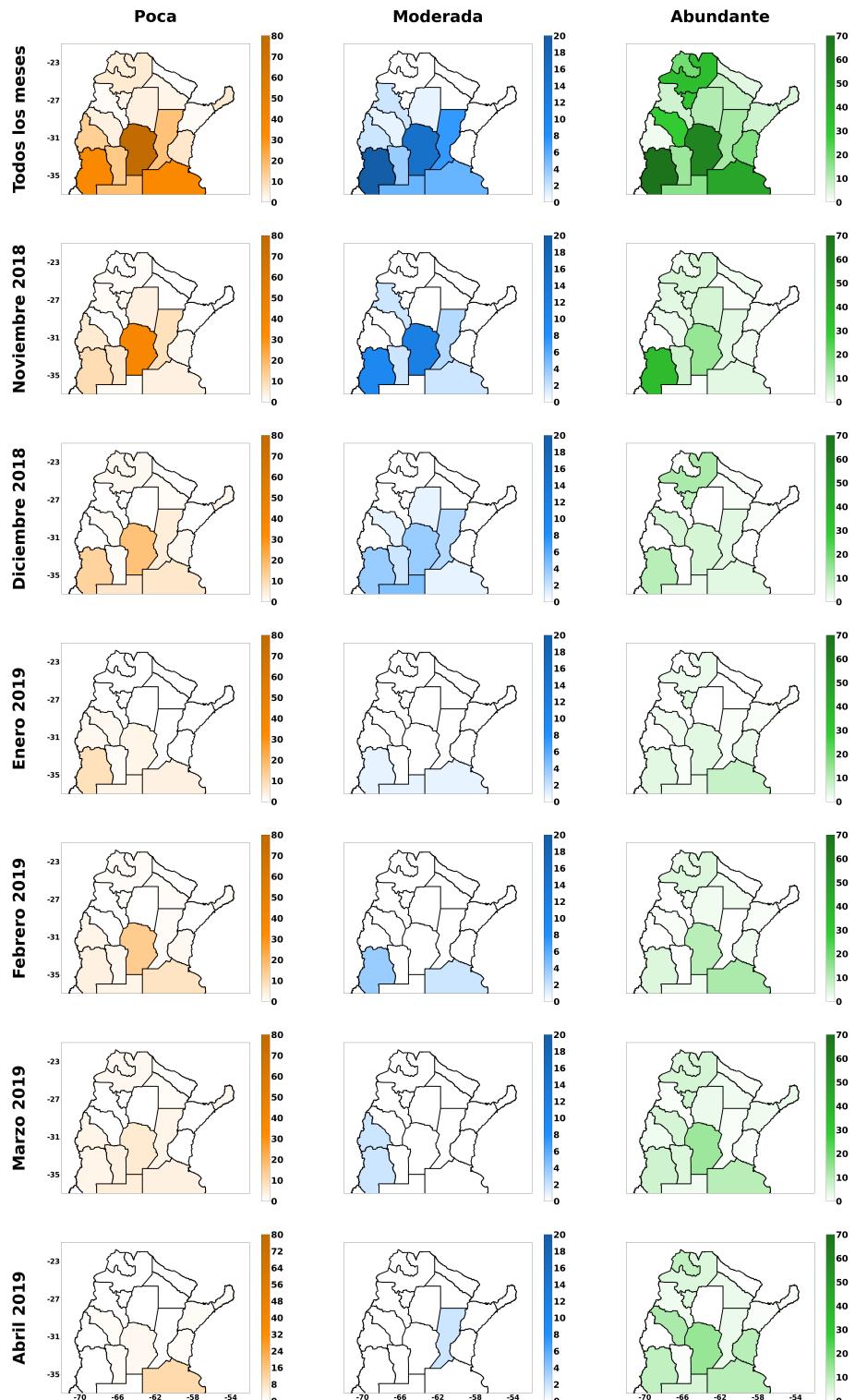


Figura 9: Distribución espacial por provincias de eventos de granizo que tuvieron lugar entre los meses de noviembre 2018 y abril 2019 para todos los reportes y por mes (filas), discriminados por densidad de acumulación (columnas).

máximos durante la primavera y verano estuvo de acuerdo con lo descrito en diferentes trabajos previos. Matsudo y Salio (2011) analizaron los reportes SYNOP desde el 2000 hasta el 2005 y encontraron que los eventos de granizo eran más frecuentes en las regiones de Cuyo y Centro, en especial durante el verano. Cecil y Blankenship (2012) indicaron que en el verano dentro de las zonas Centro y Norte, las tormentas de granizo alcanzaban su máxima frecuencia de ocurrencia, realizando una estimación a través de ocho años de datos del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Mezher y Mercuri (2008), analizando datos de estaciones meteorológicas de superficie, encontraron que Córdoba y Mendoza tenían gran cantidad de eventos de granizo, y a la vez el mayor número de ellos se daba durante la primavera. Según el estudio de reportes en noticias de diarios locales realizado por Rasmussen et al. (2014), la ocurrencia de granizo se concentra en verano a sotavento de la cordillera de los Andes, en particular en la región de Cuyo. Además, si bien Mezher et al. (2012) trabaja con datos anuales, indican que la máxima frecuencia de ocurrencia de tormentas de granizo alcanzan su máximo en el verano para las regiones de Cuyo y NOA, mientras que en el NEA y este de la región Centro se da en la primavera.

Resulta importante destacar que, al igual que se describe en los trabajos de Dobur (2005), Changnon (2009), Cecil y Blankenship (2012), Allen y Tippet (2015), Farnell et al. (2016), y Prein y Holland (2018), existe un nivel de incertidumbre respecto a la distribución espacial de los reportes de tiempo severo en superficie. Esto se debe a la inhomogeneidad en la distribución poblacional, ya que en las regiones más pobladas el número de personas con acceso a internet, telefonía y redes sociales es significativamente mayor.

3.2. Lluvias intensas

A partir de lo expuesto en la figura 3, en todo el dominio espacial y temporal, la mayor cantidad de reportes asociados a la ocurrencia

de lluvias intensas se dieron por la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), luego del inicio de la convección en la zona de estudio.

De manera similar, de acuerdo a lo presentado en la figura 4, la mayor frecuencia de reportes correspondientes a las lluvias intensas tuvo lugar entre noviembre y enero, alcanzando un máximo este último mes. A partir de allí y hasta abril, el número de registros disminuyó de forma abrupta. El gran número de reportes de lluvias intensas durante enero podría encontrarse asociado a una mayor frecuencia de convección organizada (Rasmussen y Houze, 2011)

En relación a la distribución espacial de los reportes de lluvias intensas, tal como lo mostrado en la figura 7, la mayor parte de los registros se centró en las provincias del Centro y sur del NEA. En noviembre los reportes se vieron concentrados en Córdoba, en diciembre en la región Centro y NOA en enero cuando se alcanzó el máximo se concentran en las regiones Centro, Cuyo y NEA. Luego la cantidad de reportes disminuyó de forma abrupta, desde enero hasta abril. Estos resultados fueron coincidentes con los de Matsudo y Salio (2011), que encontraron que la mayor frecuencia de ocurrencia de lluvias intensas corresponde a la región del NEA.

3.3. Ráfagas y vientos fuertes

En relación a la distribución horaria de los registros correspondientes a vientos fuertes y ráfagas, exhibidos en la figura 3, éstos tuvieron un máximo por la tarde (15-21 UTC, 12-18 HOA), seguido de otro máximo por la madrugada (03-09 UTC, 00-06 HOA). El máximo nocturno pudo estar asociado a que durante la madrugada la ocurrencia de MCSs es más frecuente debido a que la convección se encuentra más organizada. Por ejemplo, se ha demostrado que los bow echoes están asociados a daños por vientos fuertes (Cecil y Blankenship, 2012). Además, la convección profunda con fuertes ráfagas de viento que ocurren por la

madrugada (Saulo et al., 2007; dos Santos et al., 2008; Montini et al., 2019), puede ser el resultado de la intensificación del SALLJ por la noche (Stensrud, 1996).

Respecto a la distribución mensual de los reportes, expuestos en la figura 4, hubo un gran número de registros en noviembre, alcanzando un máximo en diciembre y, luego, a partir de enero se observó una disminución significativa en la cantidad a lo largo de los meses. De manera similar a los reportes de lluvias intensas, los registros de vientos fuertes y ráfagas por lo general se encuentran asociados a convección organizada (Rasmussen y Houze, 2011) que alcanzan un máximo de ocurrencia durante los meses de verano en los alrededores de las sierras de Córdoba (Mulholland et al., 2018).

Tomando en cuenta la distribución por provincias de los reportes de vientos fuertes y ráfagas, presentados en la figura 7, la mayor cantidad de registros se dió en la provincia de Córdoba, resaltando durante todos los meses, seguido por la provincia de Buenos Aires. En noviembre se observaron muchos reportes en Córdoba y en diciembre, cuando se alcanzó el máximo de registros de este evento en Córdoba y Mendoza. Durante el resto de los meses, el número de reportes disminuyó significativamente pero la región Centro continuó concentrando la mayoría de ellos. Esto resultó parcialmente coincidente con los resultados presentados por Matsudo y Salio (2011), en los que se expresa que gran cantidad de registros de ráfagas tienen lugar en Mendoza, San Luis y Buenos Aires.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la distribución espacio-temporal de los reportes asociados a la caída de granizo, lluvias intensas, y vientos fuertes y ráfagas que fueron registrados en el centro y norte de la Argentina entre noviembre de 2018 y abril de 2019.

Respecto a la distribución horaria, la mayoría

de los reportes tuvo lugar en horas de la tarde y noche (15-03 UTC, 12-00 HOA), para todos los tipos de eventos. A su vez, los registros asociados a la ocurrencia de ráfagas y vientos fuertes alcanzaron un máximo secundario durante la madrugada (03-09 UTC, 00-06 HOA). En cuanto a la distribución mensual, durante los primeros meses del dominio temporal se concentró la mayor cantidad de reportes asociados a todos los fenómenos, con máximos para la ocurrencia de granizo en noviembre con un segundo máximo en abril, para los vientos fuertes y ráfagas en diciembre, y para las lluvias intensas en enero.

Relativo al granizo, se evidenció una disminución del tamaño pero un aumento en la acumulación a lo largo de todo el período de estudio. En el mes de noviembre tuvo lugar un gran número de eventos asociados a granizos de gran tamaño pero con una menor acumulación, luego la cantidad de reportes disminuyó hacia enero, aumentando nuevamente hasta abril, mes en el cual se dio el mayor número de granizos de pequeño tamaño con una abundante acumulación. De todos los reportes de granizo, el mayor número correspondió a la caída abundante de pequeño tamaño. A la vez, la mayoría de los de gran diámetro se asoció a una baja densidad de acumulación. Por lo que, la cantidad de granizo tendió a disminuir a medida que aumentó el tamaño del mismo.

Teniendo en cuenta la distribución espacial, la mayoría de los reportes de granizo fueron registrados en las regiones de Centro y Cuyo, en específico en Córdoba y Mendoza. Se observó un máximo en las provincias del oeste de la región Centro y en Cuyo en noviembre, en diciembre el mayor número de reportes de granizo tuvo lugar en el sur de la región Centro, y el resto de los meses la distribución espacial resultó más equitativa. En cuanto a la clasificación por tamaños, la máxima cantidad de eventos de granizos pequeños se dio en Córdoba, Buenos Aires y Mendoza, mientras que para los de gran tamaño se dio en Córdoba, San Luis y Buenos

Aires.

Respecto a los reportes asociados a la ocurrencia de lluvias intensas, gran cantidad tuvo lugar entre noviembre y enero. En cuanto a su distribución espacial, al comienzo del período de estudio la mayoría de los eventos se dieron en las regiones del norte, luego en Centro y NOA, y por último en Centro, Cuyo y en el NEA.

En relación a los registros de ráfagas y vientos fuertes, la mayor parte tuvo lugar en los últimos meses del año, durante noviembre y en particular, diciembre. Estos reportes ocurrieron en las provincias del Centro y Cuyo al comienzo del período, luego en Cuyo y en el sur del NOA, y para diciembre el máximo se concentró en el Centro, para luego disminuir de forma abrupta el resto de los meses.

Por último, cabe destacar que los reportes presentan una gran inhomogeneidad en cuanto a su distribución espacial debido a que la población no es uniforme a lo largo del territorio argentino. La falta de reportes no necesariamente implica que el fenómeno no haya ocurrido, sino que nadie ha reportado el evento o los registros no fueron lo suficientemente continuos. Gran cantidad de reportes provinieron de las ciudades más pobladas de cada provincia, en particular de sus capitales, aunque para una mejor visualización, en este trabajo los reportes se agruparon por provincias. Asimismo, ya que los datos corresponden a una sola temporada, estos resultados no permiten establecer una climatología para el centro-norte de la Argentina.

Agradecimientos: A Paola Salio y a mis compañeros de RELAMPAGO por brindarme el acceso a la base de datos para poder realizar su análisis en este trabajo.

REFERENCIAS

Allen, J. T., Tippett, M. K. (2015). The

characteristics of United States hail reports: 1955-2014. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*. 10. 1-31.

Cecil, D. J., Blankenship, C. (2012). Toward a Global Climatology of Severe Hailstorms as Estimated by Satellite Passive Microwave Imagers. *J. Climate*, 25, 687–703, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00130.1>

Changnon, S. A. (2009). Increasing major hail losses in the US. *Climatic Change* 96, 161-166, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9597-z>

Changnon, S. A., Burroughs, J. (2003). The Tristate Hailstorm: The Most Costly on Record, *Monthly Weather Review*, 131(8), 1734-1739, <https://doi.org/10.1175//2549.1>

Choi, S. L. (2016). Integrating social media and rainfall data to understand the impacts of severe weather in Argentina. M.S. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, <http://hdl.handle.net/2142/90667>

Dial, G. L., Racy, J. P., Thompson, R. L. (2010). Short-term convective mode evolution along synoptic boundaries. *Wea. Forecasting*, 25, 1430-1446, <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222315.1>

Dobur, J. C. (2005). A comparison of severe thunderstorm warning verification statistics and population density within the NWS Atlanta county warning area. Preprints, Fourth Annual Severe Storms Symp., Starkville, MS. East Mississippi Chapter National Weather Association and Amer. Meteor. Soc., D2-6.

Dos Santos, J. G. M. D., Campos, C. R. J. D., Lima, K. C. (2008). Análise de jatos de baixos níveis associados a um sistema convectivo de mesoescala na América do Sul: um estudo de caso. *Rev. Brasil. Geofís.* 26, 451–468. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000400006>

Durañona, V. (2015). Extreme wind climate of Uruguay. Tesis de Doctorado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ingeniería. IMFIA, 439 págs. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/8394>

Durkee, J. D., Mote, T. L., Shepherd, J. M. (2009). The Contribution of Mesoscale

- Convective Complexes to Rainfall across Subtropical South America. *Journal of Climate*, 22(17), 4590-4605. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2858.1>
- Farnell, C., Rigo, T., Martin-Vide, J. (2016). Application of cokriging techniques for the estimation of hail size. *Theor Appl Climatol* 131, 133–151 (2018), <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1937-0>
- Feng, Z., Leung, L. R., Liu, N., Wang, J., Houze, R. A., Li, J., et al. (2021). A global high-resolution mesoscale convective system database using satellite-derived cloud tops, surface precipitation, and tracking. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD034202. <https://doi.org/10.1029/2020JD034202>
- Fujita, T. T. (1978). Manual of downburst identification for ProjectNIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104 pp.
- García-Ortega, E., López, L., Sanchez, J. (2009). Diagnosis and sensitivity study of two severe storm events in the Southeastern Andes. *Atmospheric Research*. 93. 161-178, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.030>
- Houze, R. A. Jr., Rasmussen, K. L., Zuluaga, M. D., Brodzik, S. R. (2015). The variable nature of convection in the tropics and subtropics: A legacy of 16 years of the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite. *Rev. Geophys.*, 53, 994-1021, <https://doi.org/10.1002/2015RG000488>
- Lohigorry P., de Elia, R., Russian G. (2018). Pronósticos a muy corto plazo en el Servicio Meteorológico Nacional. Nota Técnica SMN 2018-46, <http://repositorio.smn.gob.ar/handle/20.500.12160/649>
- Lombardo, F. T., Zickar, A. S. (2019). Characteristics of measured extreme thunderstorm near-surface wind gusts in the United States. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 193, 103961, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.103961>
- Kumjian, M. R., Gutierrez, R., Soderholm, J. S., Nesbitt, S. W., Maldonado, P., Luna, L. M., Marquis, J., Bowley, K. A., Imaz, M. A., Salio, P. (2020). Gargantuan Hail in Argentina. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), E1241-E1258. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0012.1>
- Matsudo, C. M., Salio, P. V. (2011). Severe weather reports and proximity to deep convection over Northern Argentina. *Atmos. Res.*, 100, 523–537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.11.004>
- Markowski, P. M., Richardson, Y. P. (2010). Mesoscale meteorology in midlatitudes. WileyBlackwell, Southern Gate, Chichester, West Sussex, UK. Mezher, R. N., Mercuri, P. (2008). Análisis espacial y temporal de la ocurrencia de eventos de granizo sobre Argentina. IXV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, Brasil. <https://www.divulgameteo.es/uploads/Granizo-Argentina.pdf>
- Mezher, R. N., Doyle, M., Barros, V. (2012). Climatology of hail in Argentina. *Atmos. Res.*, 114, p. 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.020>
- Montini, T. L., Jones, C., Carvalho, L. M. (2019). The South American low-level jet: a new climatology, variability, and changes. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 1200–1218. <https://doi.org/10.1029/2018jd029634>
- Mulholland, J. P., Nesbitt, S. W., Trapp, R. J., Rasmussen, K. L., Salio, P. V. (2018). Convective storm life cycle and environments near the sierras de Córdoba, Argentina. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 2541–2557, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0081.1>
- Nicolini, M., Saulo, A. C. (2006). Modeled Chaco low-level jets and related precipitation patterns during the 1997-1998 warm season. *Meteorology and Atmospheric Physics* 94, 129-143, <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0186-7>
- Nicolini, M., García Skabar, Y. (2011). Diurnal cycle in convergence patterns in the boundary layer east of the Andes and convection. *Atmos. Res.*, 100, 377–390, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.09.019>
- Patanella, M. (2021). Precursores de convección profunda asociada a la ocurrencia de tiempo severo en superficie en el centro-norte de la Argentina. Tesis

- de Licenciatura. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, 116 págs. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121983>
- Piersante, J. (2017). Characteristics of hail events near the sierras de Córdoba, Argentina. SOARS Paper, 20 pp., <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/manuscripts%3A955/datastream/PDF/view>
- Pita, G.L., de Schwarzkopf, M.L.A. (2016). Urban downburst vulnerability and damage assessment from a case study in Argentina. *Nat Hazards* 83, 445–463, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2323-z>
- Prein, A., Holland, G. (2018). Global estimates of damaging hail hazard. *Weather and Climate Extremes*. 22. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004>
- Pojorlie, K. L., Doering, S., Fowle, M. A. (2013). The record-breaking Vivian, South Dakota hailstorm of 23 July 2010. *J. Oper. Meteor.*, 1, 3–18, <https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0102>.
- Punge, H. J., Kunz, M. (2016). Hail observations and hailstorms characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*. 176. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>
- Rasmussen, K. L., Houze, R. A. Jr. (2011). Orogenic convection in South America as seen by the TRMM satellite. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 2399–24201 <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05006.1>
- Rasmussen, K. L., Zuluaga, M. D., Houze, R. A. (2014). Severe convection and lightning in subtropical South America. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7359– 7366, <https://doi.org/10.1002/2014GL061767>
- Repinaldo, H. F. B., Nicolini, M., García Skabar, Y. (2015). Characterizing the diurnal cycle of low-level circulation and convergence using CFSR data in southeastern South America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3):671–690, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0114.1>
- Repinaldo, H. F. B., Nicolini, M., García Skabar, Y. (2017). Iniciación de un sistema convectivo sobre las sierras de Córdoba y sensibilidad a modificaciones en el perfil orográfico. *Meteorologica*, Centro Argentino de Meteorólogos, Vol 42 N°2 (2017) 23-42, http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2018/01/Repinaldo_y-otros_Vol42N2.pdf
- Repinaldo, H. F. B. (2019). Estudio de mecanismos de escala sinóptica y/o mesoscala que controlan la iniciación y la regeneración de la convección profunda en el Noroeste Argentino y en la región de las Sierras de Córdoba. Tesis de Doctorado. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 284 pág.
- Romatschke, U., Houze, R. A. Jr. (2010). Extreme summer convection in South America. *J. Clim.*, 23, 3761–3791, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3465.1>
- Salio, P., Nicolini, M. (2006). Seasonal characterization on the diurnal cycle of convection frequency over southeastern South America under different low-level jet conditions. En Proceedings of the 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Foz do Iguacu, Brazil, pp. 1157–1162.
- Saulo, C., Ruiz, J., Skabar, Y. G. (2007). Synergism between the Low-Level Jet and Organized Convection at Its Exit Region, *Monthly Weather Review*, 135(4), 1310–1326. <https://doi.org/10.1175/MWR3317.1>
- Stensrud, D. J. (1996). Importance of Low-Level Jets to Climate: A Review. *Journal of Climate*, 9(8), 1698–1711. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009%3C1698:IOLLJT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009%3C1698:IOLLJT%3E2.0.CO;2)
- Velasco, I., Fritsch, J. M. (1987). Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Research* 92, <https://doi.org/10.1029/JD092iD08p09591>
- Vidal, L. (2014). Convección Extrema sobre Sudamérica: Estructura Interna, Ciclos de Vida e Influencia de la Topografía en la Iniciación. Tesis de Doctorado. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y

Naturales, Universidad de Buenos Aires, 274
págs.

Vila, D., Machado, L., Laurent, H., Velasco, I.
(2008). Forecast and Tracking the Evolution
of Cloud Clusters (ForTraCC) Using
Satellite Infrared Imagery: Methodology and
Validation. *Weather and Forecasting*. 23,
<https://doi.org/10.1175/2007WAF2006121.1>

MODELING THE DISTRIBUTION OF MAXIMUM RAINFALL IN URUGUAY

Juan Kalemkerian¹, Carolina Ábalo², Silvia Carámbula² y Matías Quiñones²

¹Centro de Matemática, Facultad de Ciencias, UdelaR

²Dirección General de Educación Secundaria, ANEP

ABSTRACT

This paper shows, based on daily records, the modeling of maximum precipitations in each quarter of eighteen meteorological stations located in different parts of Uruguay. We compared the performance of the classic likelihood ratio test with one of the truncated Crámer-von Mises type. Most of the stations did adjust under the Gumbel distribution with few Fréchet and Weibull cases, obtaining a most appropriate truncated Crámer-von Mises test performance. From the adjustment in each of the stations and the combination of three statistical techniques (k-means, Kolmogorov-Smirnov test of equality of distributions and test of independence) we concluded that the maximum rainfall throughout the Uruguayan territory is homogeneous with a slight difference between the southern and northern regions.

Keywords: *extreme rainfall, GEV distribution, Gumbel distribution, geostatistics.*

MODELACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN URUGUAY

RESUMEN

En el presente trabajo, a partir de registros diarios, se modelan las precipitaciones máximas en cada trimestre de 18 estaciones meteorológicas ubicadas en distintos puntos de Uruguay. Se comparó la performance del clásico test de la razón de verosimilitud contra uno del tipo de Crámer—von Mises recortado. La mayoría de las estaciones ajustaron según la distribución Gumbel existiendo pocos casos de Fréchet y de Weibull y se obtuvo una performance más apropiada del test de Crámer—von Mises recortado. A partir del ajuste en cada una de las estaciones, combinando tres técnicas estadísticas (k-means, test de igualdad de distribuciones de Kolmogorov—Smirnov y test de independencia) se concluyó que las precipitaciones máximas a lo largo del territorio uruguayo son homogéneas existiendo una leve diferencia entre la región sur y la norte.

Palabras clave: *precipitaciones extremas, distribuciones GEV, distribución Gumbel, geoestadística.*

1. INTRODUCTION

The importance of the study of extreme events is well-known in various areas as food production, economics, energy planning among many others. In the particular case of extreme rainfall events, both floods and severe droughts can bring great economic, resource and human losses. Therefore, governments should have precise models to better understand the phenomenon and use it to estimate both the probability of events not yet observed and the probability of return of the ones occurred already. On the one hand, there are several works about extreme precipitation in South America focused in physical and statistical aspects, see for example Bettolli et al (2021), Calvacanti (2012), Calvacanti et al (2015), Carril et al (2016).

On the other hand, its spatial study is also of vital importance since its both occurrence and modeling can radically change from one region to another. For instance, Hernández et al (2011) extreme rainfalls in different locations in Venezuela were modeled using Bayesian methods. In small and geographically homogeneous countries such as Uruguay, it is expected to have no major changes in modeling the different regions although no previous clustering work has been found with the maximums. Some Brazilian papers (Medeiros et al. 2019) presented a modeling for the maximum daily rainfall in the municipality of Jataí, Goiás, adjusted for Gumbel, to estimate the return levels up to 100 years. In some, (Anderson et al. 2020) the maximum rainfall in 12 municipalities in the northeast of Rio Grande do Sul were modeled by Gumbel with the objective of designing hydraulic structures. In others, (Silva et al. 2019) Gumbel models were adjusted to estimate the maximum intensity of the rains. In Argentina, (Vich et al. 2014) the generalized distributions of extreme values were used in order to find the magnitude of the annual flow for return. In the work of Santiñaque et al. (2021), can be found (through spatial clustering techniques applied to the annual maximums recorded in 20 meteorological

stations distributed throughout the entire Uruguayan territory) the expected homogeneity among the stations considered with an exception (Mercedes). In this article, we will delve into what it has been already found (Santiñaque et al. 2021) by working with quarterly data, that is, quadruple the information by taking four values corresponding to the maximum in each of the quarters of each year and through a precise modeling of each station in each quarter, apply the classic k-means method to deepen the conclusion at the spatial level obtained in it. Section 2 describes the data which the investigation was carried out with and the objectives it pursues. Section 3 describes the mathematical-statistical methods, including references. Section 4 describes the results gathered with their preliminary conclusions. Last but not least, section 5 describes the fundamental conclusions of the investigation as well as possible line of work to be developed within the statistics field both at a theoretical and practical level.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Data description and objectives

The main objective of this investigation is to obtain the distribution of the variable defined as the maximum quarterly precipitation from daily recorded in 18 stations located across Uruguay. On the one hand, we will deep dive into Santiñaque et al (2021), founding since we got the information quadrupled, meaning that we contemplated each quarters maximums for each year considered. Taking into account the 18 stations' geographical distribution and each of their adjustments, on the other hand, we will apply k-means clustering to obtain results at spatial level as well. The data set consist of daily rainfall records from January 1st, 1981 to December 31st, 2013 in millimeters, in each of the 18 meteorological stations shown in Figure 1. Data were provided by INUMET (Instituto uruguayo de meteorología): www.inumet.gub.uy.

18 Estaciones

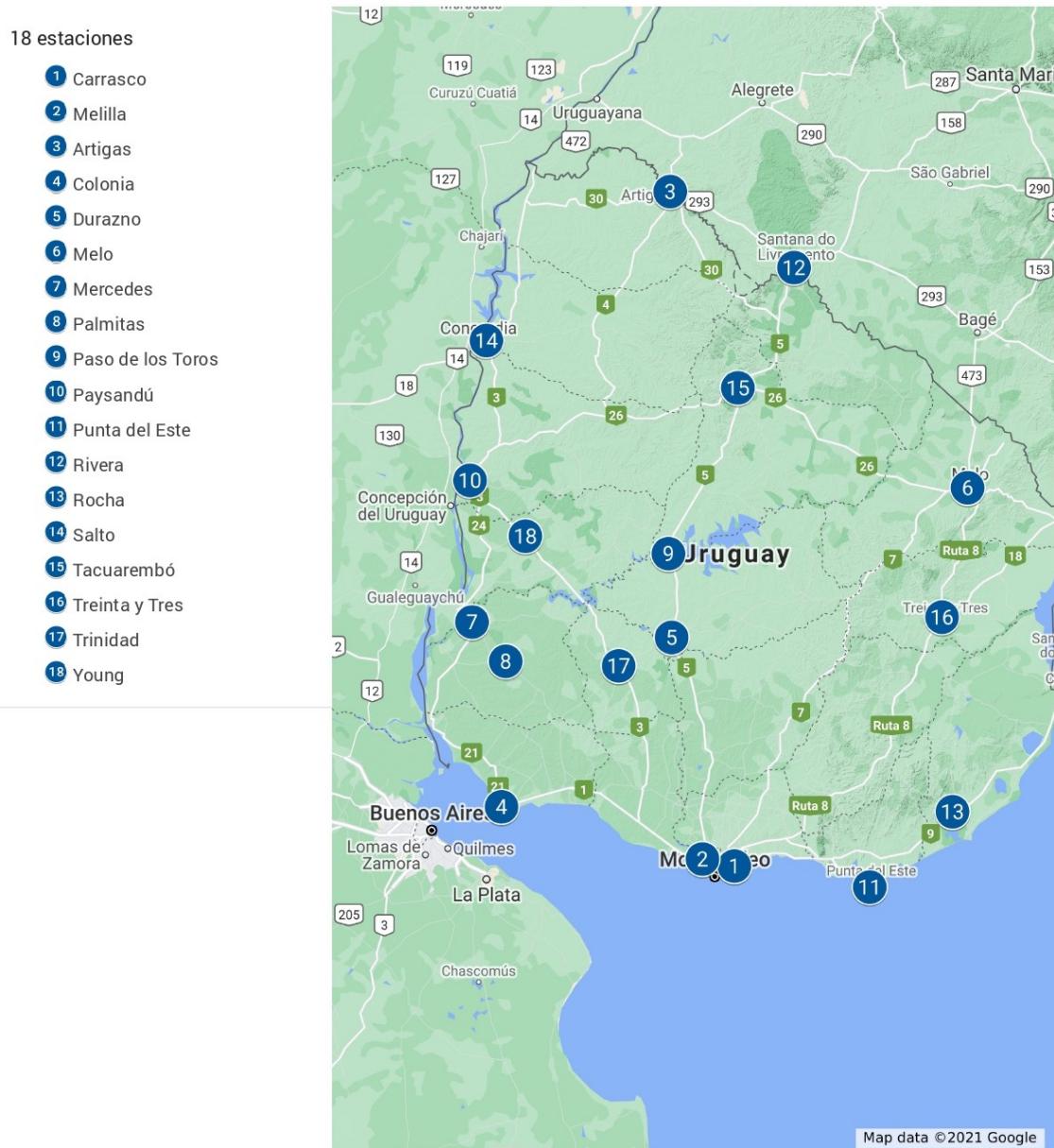


Figure 1: Geographical distribution of the 18 meteorological stations considered in this work. The map was obtained from Google Maps.

Each year was split into four quarters as follows: from January 1st to March 31st (quarter 1), from April 1st to June 30th (quarter 2), from July 1st to September 30th (quarter 3) and from 1st October to December 31st (quarter 4). Due to the goal is modeling the quarterly maximums, only four values were considered per year: the

maximum values of each the quarters, discarding all the rest of the data. Figure 1 shows the geographic distribution of the 18 stations across Uruguay.

2.2. Estimation of the distribution of the quarterly maximums in each station

If D_1, D_2, \dots, D_n are n independent and identically distributed (i.i.d.) observations of certain variable D , the Fisher—Tippett theorem (Fisher and Tippett, 1928; Gnedenko, 1943) assures that as n grows, $M_n = \max\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ approximates to a Gumbel, Fréchet or Weibull distribution defined as $H_1(x; \mu; \sigma) = e^{-(\mu-x)/\sigma}$ where $\sigma > 0$, $H_2(x; \mu; \sigma; \xi) = e^{-(x-\mu)/\sigma} e^{-\xi/(1+\xi)}$ where $x < \mu$, $\sigma, \xi > 0$, and $H_3(x; \mu; \sigma; \xi) = e^{-(\mu-x)/\sigma} e^{-\xi/(1+\xi)}$ where $x < \mu$, $\sigma > 0$, $\xi > 0$ respectively. The three distributions' family can be expressed in a single formula given by $H(x; \mu; \sigma; \xi) = e^{-1+(\xi(x-\mu)/\sigma)^{-1/\xi}}$ where $\sigma > 0$, and where $x > \mu - \sigma/\xi$, for the $\xi > 0$ case, or $x < \mu - \sigma/\xi$ for the $\xi < 0$ case. H is Fréchet when $\xi > 0$, Weibull when $\xi < 0$, and if $\xi \rightarrow 0$, H tends to a Gumbel distribution. μ is called the location parameter, σ the scale parameter and ξ the shape parameter. H is called Generalized Extreme Value Distribution (GEV) and was proposed by Jenkinson (1955) and Von Mises (1936). Considering D_i as the accumulated precipitation on day i , in Santiñaque (2020) the adjustment was applied for the same set of annual maximum data, this means $n = 365$, providing the adjustment was accurate. In our work, we will apply the theorem for $n = 90$ since we will work with the maximums in each quarter. Simultaneously, we also worked with semester data ($n = 183$). Even though these values of n are notoriously lower than the ones used for annual maximums, we can fortunately prove that the theorem still gives us good results. Assuming that the values at each station follow a GEV distribution, the parameter estimation was carried out by applying the weighted moment method (Greenwood et al, 1979) (method specially designed for the study of extreme values) and the maximum likelihood giving similar results. The calculations were made using R's "extRemes" package, as well as the confidence intervals for them.

2.3. Model diagnosis

Once the GEV parameters were estimated for each station, the model was validated using the diagnostic graphs. The diagnostic graphs are a visual tool made up of four graphs where the adjusted distribution (GEV) is compared with the empirical one of the data observed through different measures. The first graph is the so-called PP-plot (represents the values of the adjusted cumulative distribution (GEV) versus the empirical one at different points); the closer to the diagonal, the better the fit of the model. The second graph is the so-called QQ-plot, which represents the quantile function of the adjusted GEV distribution versus the empirical quantile. Again the closer to the diagonal the points of this graph are seen, the better the model is. The third graph shows the empirical density versus the density of the fitted one. In this case, the more similar are the graphs one another, the better the fit. The fourth graph compares the return levels estimated by the adjusted GEV model with its confidence bands. If the values are within these bands, the fit is good. The closer the values to the straight line, the closer the distribution is to the Gumbel, if the points are drawn above (below) the diagonal using a convex (concave) graph, the more the distribution resembles a Fréchet (Weibull). Coles et al (2001) gives a more detailed explanation of the diagnostic graphics while Santiñaque (2020) only gives a synthesis of them. To have a more precise technique diagnostic model, two goodness-of-fit hypothesis tests were applied to the Gumbel distribution, which are the likelihood ratio test (LR) and the truncated Cramér—Von Mises test (TCVM). In this second case, when the Gumbel distribution hypothesis was rejected, the test was performed taking the Fréchet distribution (when the shape parameter estimate was positive) as the null hypothesis, or the Weibull distribution (when the shape parameter estimate was negative). TCVM is a test of the Crámer-von Mises type which truncates the integration region using a similar idea to the one applied in Kalemkerian (2019). Here, $H_0: X^{(i)} \equiv \text{Gumbel}(\mu, \sigma)$ it is posed

versus $H_1:H_0$ does not hold, where $X^{(i)}$ is the maximum precipitation in the i station. If H_0 is rejected, the test is adapted to consider $H_0:X^{(i)} \equiv \text{Fr\'echet}(\mu, \sigma, \xi)$ when the estimation of the shape parameter is positive or $H_0:X^{(i)} \equiv \text{Weibull}(\mu, \sigma, \xi)$ when the estimation of the shape parameter is negative. In Santi\~naque (2020) this adaptation it is explained in detail.

2.4. Clustering of estimated parameters

Once it was obtained a good fit in each of the stations, quarters and semesters, the k-means methodology was applied using the estimated parameters as indicators of the distribution. As it is well known, it is necessary to select the number of groups to apply k-means. In order to find the number of groups to be separated, it was calculated the Silhouette coefficient proposed in Rousseeuw (1986). This coefficient splits into k groups and calculates how well the elements are classified in the k groups, it takes values between -1 and 1 and the higher it is the coefficient, the better its elements are classified. This means that the highest k value the Silhouette coefficient takes it will be the one suggested for applying clustering.

2.5. Kolmogorov—Smirnov test for equality of distributions

The classic Kolmogorov-Smirnov test was applied to test the equality or difference between the distributions of the maximum in the different stations. It is more explicitly stated $H_0:X^{(i)}, X^{(j)}$ have the same distribution versus $H_1:H_0$ does not hold, where $X^{(i)}, X^{(j)}$ are the maximum precipitations in the stations i and j respectively.

2.6. Independence test based on recurrence rates

Regarding the existence of associations or dependencies between the observations corresponding to the data observed in the stations, it was applied the recently proposed independence test based on recurrence

percentages (Kalemkerian and Fern\'andez, 2020a). This test aims to investigate if two variables X and Y are independent in a probabilistic sense. Then, starting from $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ sample of (X, Y) where X and Y can take values in any metric space (for example), we stated that $H_0: X$ and Y are independent versus $H_1:H_0$ does not hold. We used this test where X and Y are the maximum values of all the pairs of stations considered in this work.

The theoretical details of the test are developed in Kalemkerian and Fern\'andez (2020a) as well as its implementation and application to economic and meteorological data in Kalemkerian and Fern\'andez (2020b).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Estimation of the distribution parameters

Figures 2 and Figure 3 show the point estimates together with their 95 % confidence intervals for the parameters μ and σ respectively. Recall that μ and σ are not the mean and the deviation of a GEV distribution, but are called the location and scale parameters of the GEV distribution. In this investigation we are interested in the comparison between the distributions in each station. Except for Rocha station, a small difference can be observed between the stations in the south of the country (the 5 stations to the left of the graphs). Similarly, a small difference can be observed between the northern stations (the 4 stations to the right of the graphs). The differences are a little clearer with respect to the parameter μ than with respect to σ . Figure 4 and Figure 5 show the estimates of the shape parameter (ξ) for the 18 stations in each of the quarters and semesters respectively. It is observed that almost all the 95 % confidence intervals includes the zero value, so it is to be expected that most of the stations have a good fit to the Gumbel distribution, as will be seen in the next subsection. In addition to the comparison of the behavior of different stations,

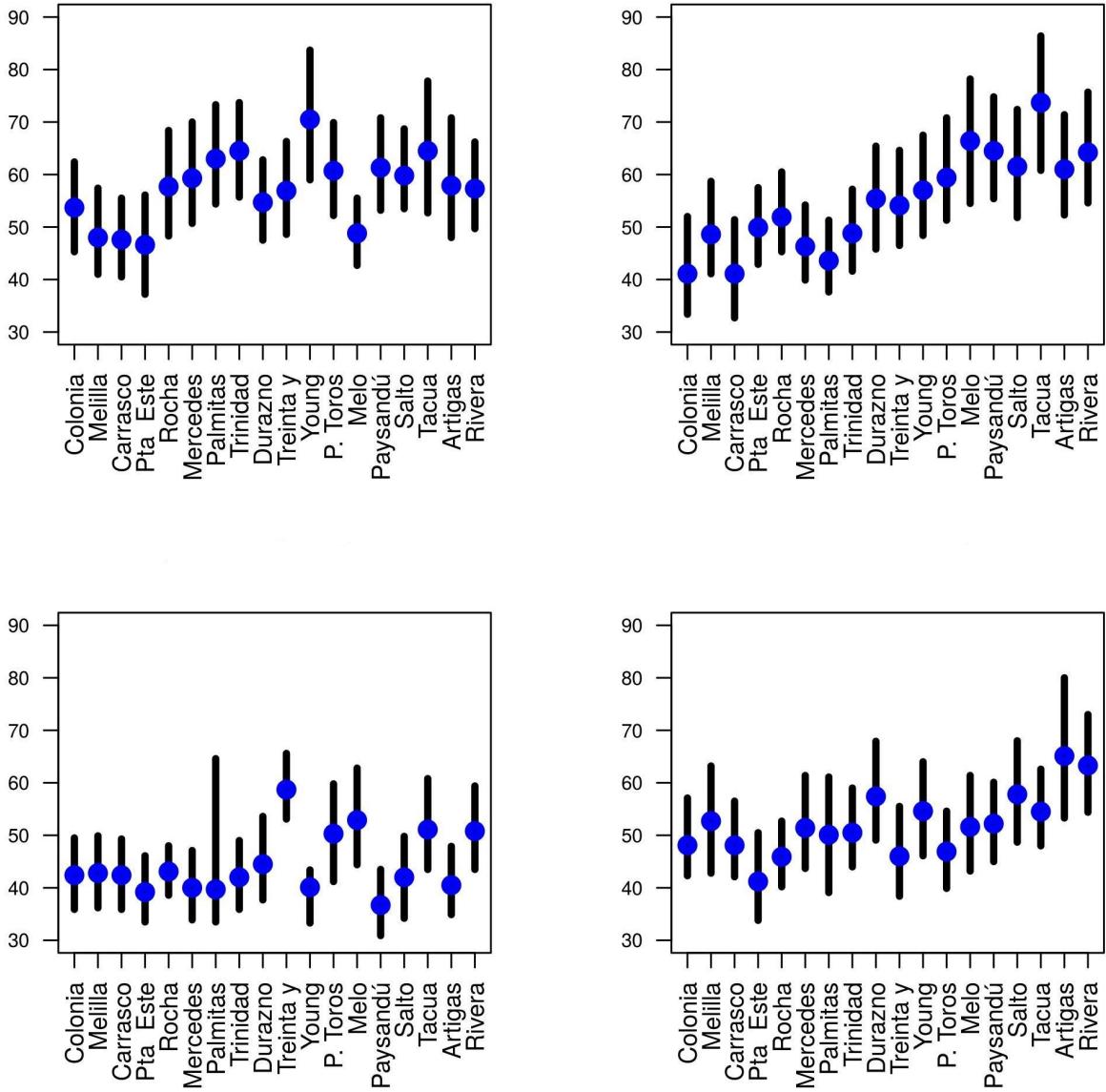


Figure 2: Estimation of the localization parameter (μ) in blue and confidence intervals at 95 % for each one of the stations. Quarter 1 (top left), quarter 2 (top right), quarter 3 (bottom left) and quarter 4 (bottom right).

figures 2 to 4 show that the extreme rainfalls are greater in quarters 2 and 4 than in quarters 1 and 3.

3.2. Model diagnosis and goodness of fit

Both quarterly and semi-annually, the adjustment obtained in the 18 stations through the diagnostic graphs was good, so it can be deduced that the applicability of the Fisher-Tippett theorem even for moderate

values such as those of the data set worked ($n = 90$) continues to lead to good results. As an example, Figure 6 shows the four diagnostic charts for the Colonia station in the second quarter. As can be seen from Figure 4 and Figure 6, it is reasonable to test the Gumbel distribution hypothesis for each of the stations. In most cases, the TCVM and LR goodness-of-fit tests led to the same conclusion about the distribution of the different stations. When both tests led to different conclusions, in

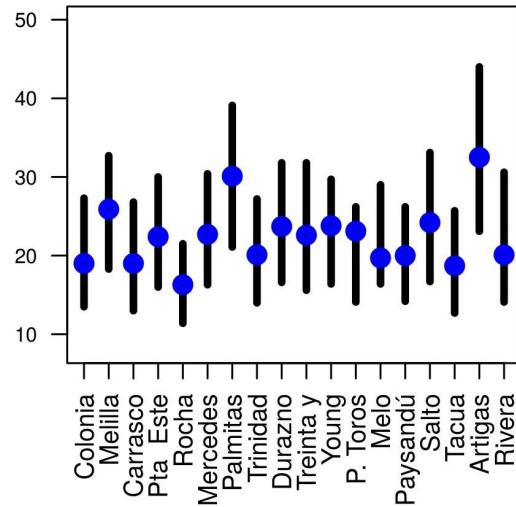
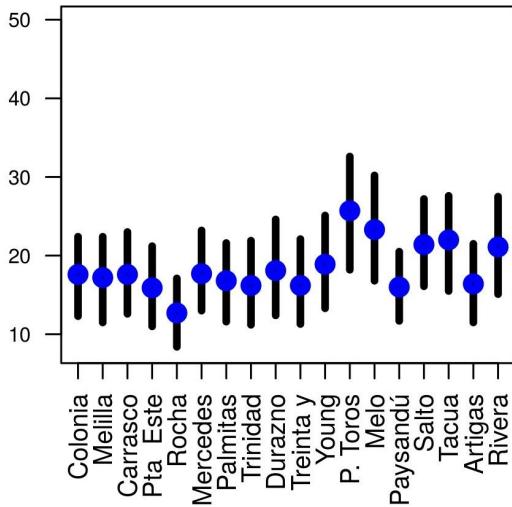
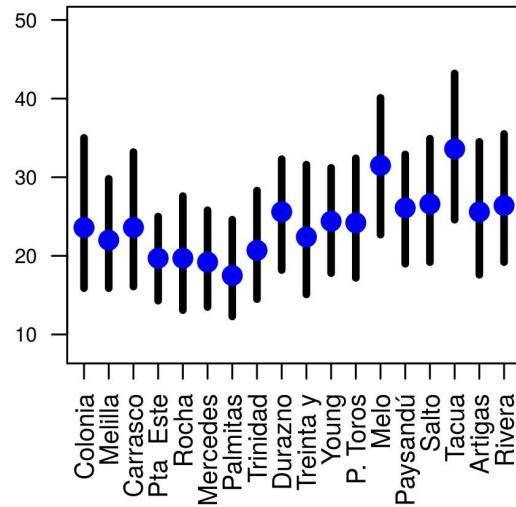
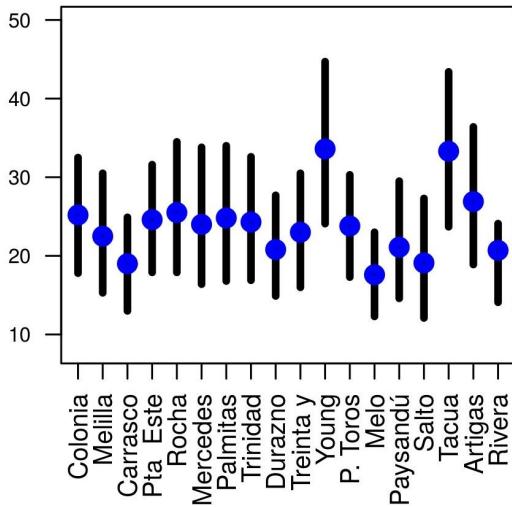


Figure 3: Point and interval estimation at 95 % for the scale parameter (σ) in blue for each station. Quarter 1 (top left), quarter 2 (top right), quarter 3 (bottom left) and quarter 4 (bottom right).

general TCVM seem to performed better, at least in the sense that your results looks more suitable with the results showed in Figure 4 and Figure 6 than the results obtained by the LR test. In particular at the Young and Melo, the estimated value of the shape parameter is far from zero, so it is to be expected that the Gumbel distribution hypothesis test will be rejected. This fact was detected by TCVM test but not by LR as shown in Table 1. Similarly, it can be seen that TCVM seem to perform better

than LR at least in the following cases: Colonia (second quarter), Rocha (first semester) and Salto (third quarter). The only case of difference between the TCVM and LR test decision where LR apparently better detects behavior is at the Trinidad station in the third quarter. Table 1 includes for each quarter and semester the distribution of each of the stations according to the joint application of the TCVM test for both Gumbel and Fréchet and Weibull.

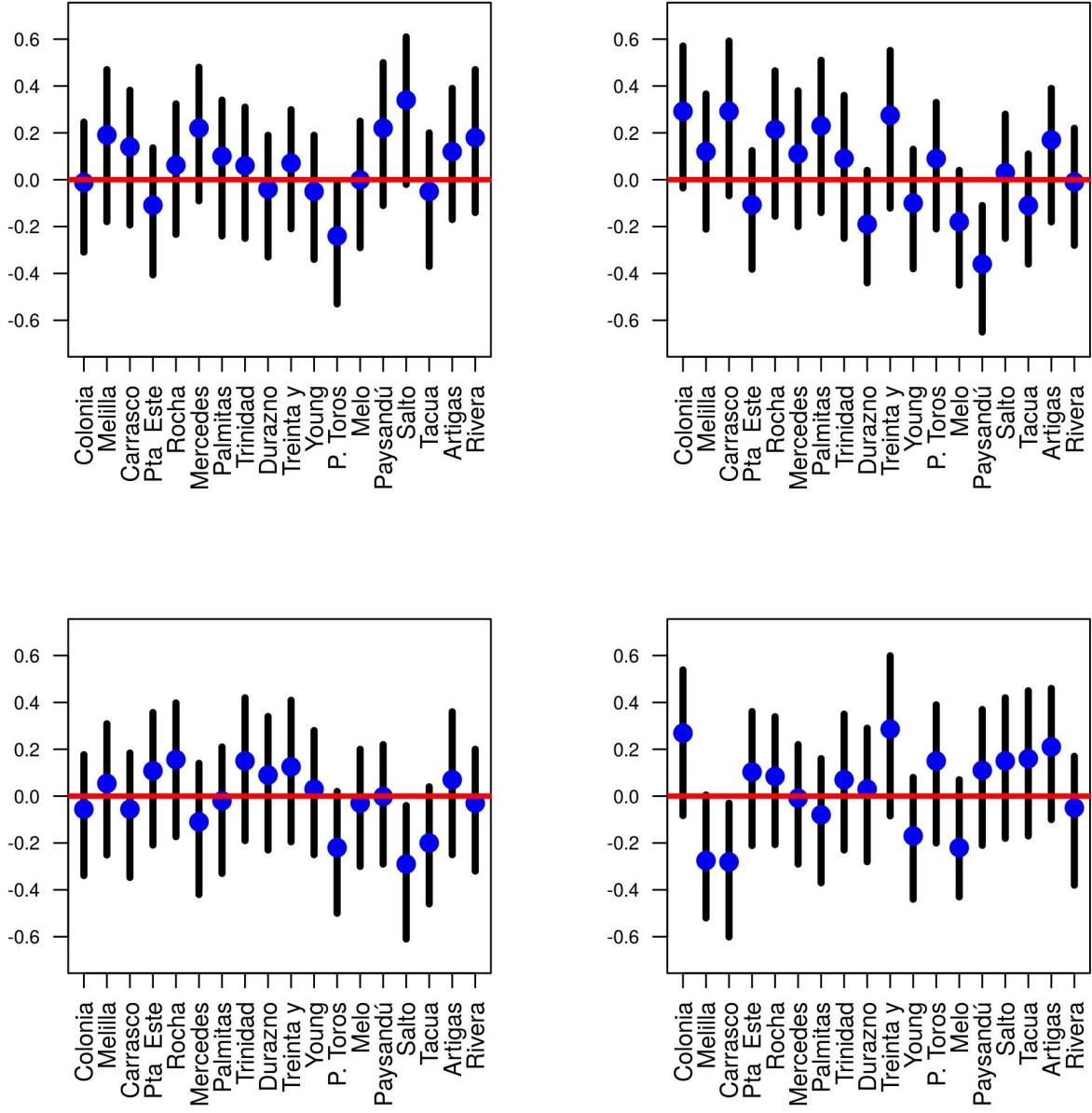


Figure 4: Point and interval estimation at 95 % for ξ . Quarter 1 (top left), quarter 2 (top right), quarter 3 (bottom left) and quarter 4 (bottom right). The red line helps to see the position between the estimation of ξ with respect to zero (Gumbel distribution).

It appears from Table 1 that in the vast majority of cases, there was a good fit to the Gumbel distribution with a few specific cases of Fréchet or Weibull distributions. It is noteworthy that Paysandú is the only station where the three types of distributions (Fréchet, Gumbel and Weibull) were correctly adjusted.

3.3. Clustering of estimated parameters

According to Kaufman (1990), when the Silhouette coefficient takes values between 0.25 and 0.50, it is interpreted as the weak group structure. For both semester data and quarterly, the Silhouette coefficient showed very little heterogeneity in the data. Except in the fourth quarter, the coefficient obtained its maximum for $k = 2$ groups. In quarter 2, we observed that

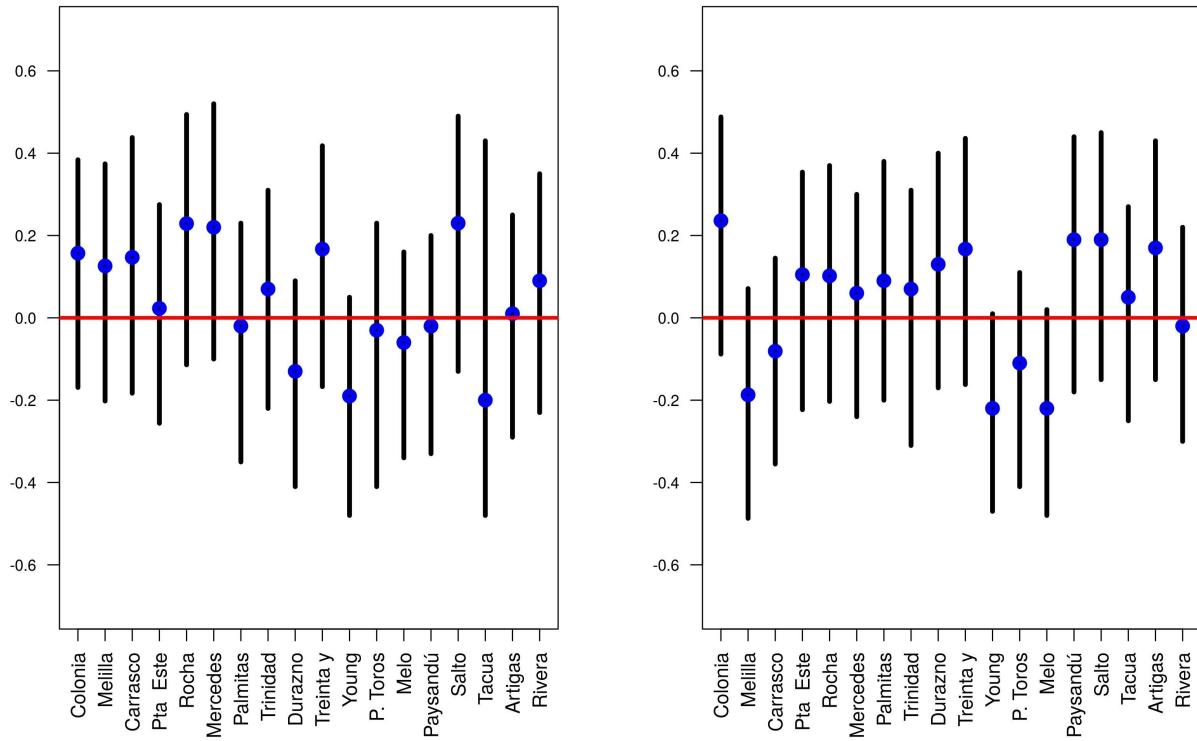


Figure 5: Point and interval estimation at 95 % for ξ for each semester. The red line helps to see the position between the estimation of ξ with respect to zero (Gumbel distribution). Semester 1 (left), semester 2 (right).

the values for $k = 7$ and $k = 8$ are slightly higher than the $k = 2$ case. Anyway for 18 stations and values of the Silhouette coefficient less than 0.5 it is more reasonable to work with $k = 2$ groups. Figure 7 shows the graph of the Silhouette coefficient for different values of k varying between 2 and 8 groups and for each of the quarters. Table 2 shows the values obtained separating $k = 2$ groups. Separated into two groups by k-means in quarters 1, 2 and 3 and three groups in quarter 4, below we give the conformation of each of the groups according to quarter or semester.

Quarter 1.

Group 1: Colonia, Melilla, Carrasco, Punta del Este, Durazno, Melo, Paso de los Toros.
Group 2: Rocha, Palmitas, Trinidad, Young, Tacuarembó, Artigas, Mercedes, Treinta y tres, Paysandú, Salto, Rivera.

Quarter 2.

Group 1: Colonia, Melilla, Carrasco, Punta del Este, Rocha, Mercedes, Trinidad, Palmitas,

Treinta y tres.

Group 2: Durazno, Melo, Paso de los Toros, Young, Paysandú, Salto, Tacuarembó, Artigas, Rivera.

Quarter 3.

Group 1: Colonia, Melilla, Carrasco, Punta del Este, Rocha, Mercedes, Palmitas, Trinidad, Durazno, Paysandú, Treinta y Tres, Young, Artigas.

Group 2: Paso de los Toros, Melo, Salto, Tacuarembó, Rivera.

Quarter 4.

Group 1: Melilla, Carrasco, Mercedes, Palmitas, Young, Melo.

Group 2: Durazno, Salto, Artigas, Rivera.

Group 3: Colonia, Punta del Este, Rocha, Trinidad, Treinta y Tres, Paso de los Toros, Paysandú, Tacuarembó.

Semester 1.

Group 1: Colonia, Melilla, Carrasco, Punta del Este, Rocha, Durazno, Melo, Paso de los Toros, Palmitas, Trinidad, Mercedes, Treinta y tres,

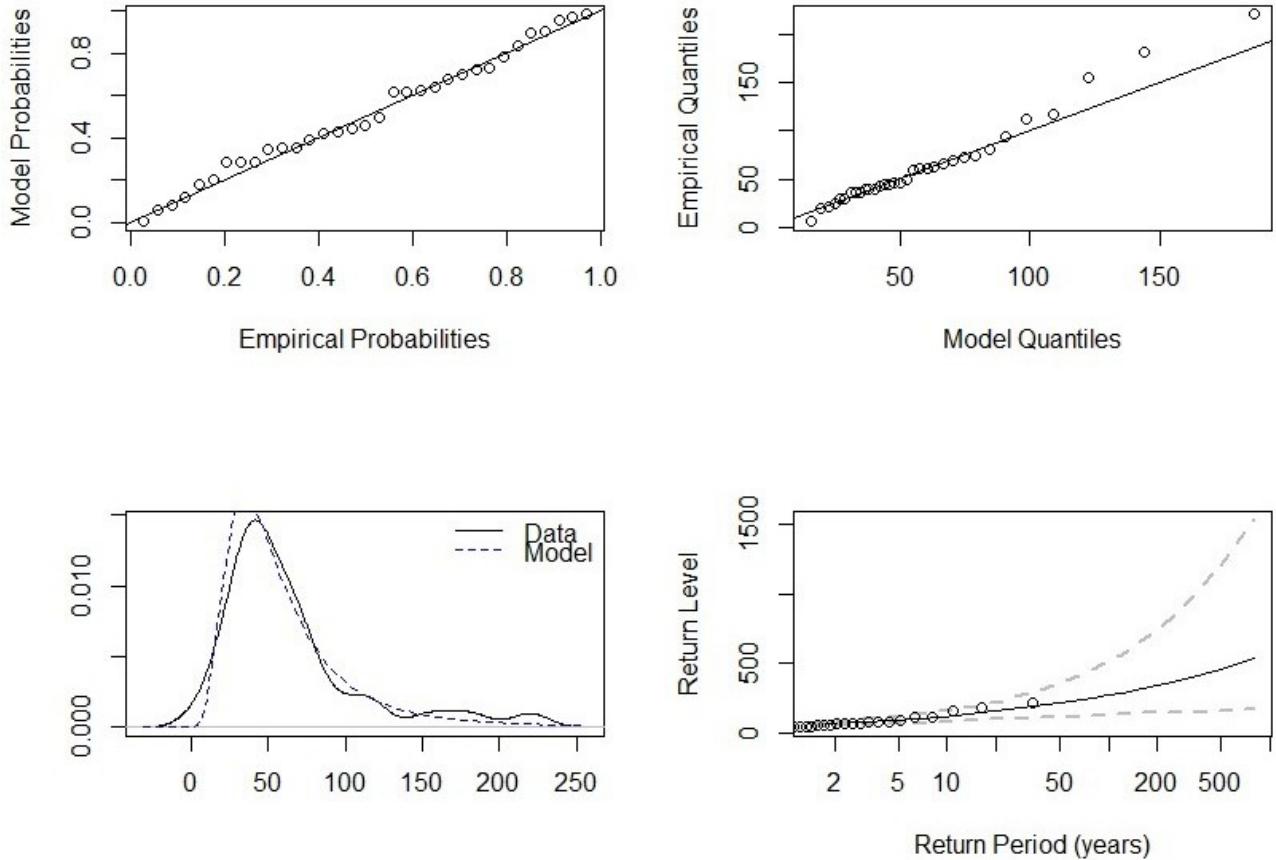


Figure 6: Diagnosis plots for Colonia station in the second quarter. pp-plot (top left), qq-plot (top right), empirical and model densities (bottom left) and return level plot (bottom right).

Paysandú, Salto, Rivera.

Group 2: Young, Tacuarembó, Artigas.

Semester 2.

Group 1: Colonia, Punta del Este, Rocha, Palmitas, Paysandú, Salto, Mercedes.

Group 2: Melilla, Carrasco, Trinidad, Durazno, Treinta y Tres, Young, Paso de los Toros, Melo, Tacuarembó, Artigas, Rivera.

It is observed that the southernmost stations of Uruguay (Colonia, Melilla, Carrasco, Punta del Este and Rocha) are in the same group in quarters 1, 2 and 3 (except for Rocha in quarter 3). In Figure 8 it is shown that separating in $k = 2$ groups for quarters 1 to 3 and $k = 3$ groups for quarter 4, k-means works well. On the other hand, if we consider the easternmost stations in Uruguay (Punta del Este, Rocha, Melo and Treinta y Tres) and the westernmost stations

(Colonia, Mercedes, Palmitas, Young, Paysandú and Salto) it is observed that they are mixed in different groups in each quarter.

3.4. Comparison between distributions

The application of the Kolmogorov-Smirnov test for equality of distributions (applied in pairs at two stations) in most cases did not reject the hypothesis of equality of distributions. As an example, Table 3 shows the results corresponding to the fourth quarter that among the stations further south with respect to the stations further north. For example in row 1 we show the p-value to the test between Colonia station and each of the other and in the final column we show the p-value to the test between Artigas station and each of the other. In most cases rejects the equality of distributions at

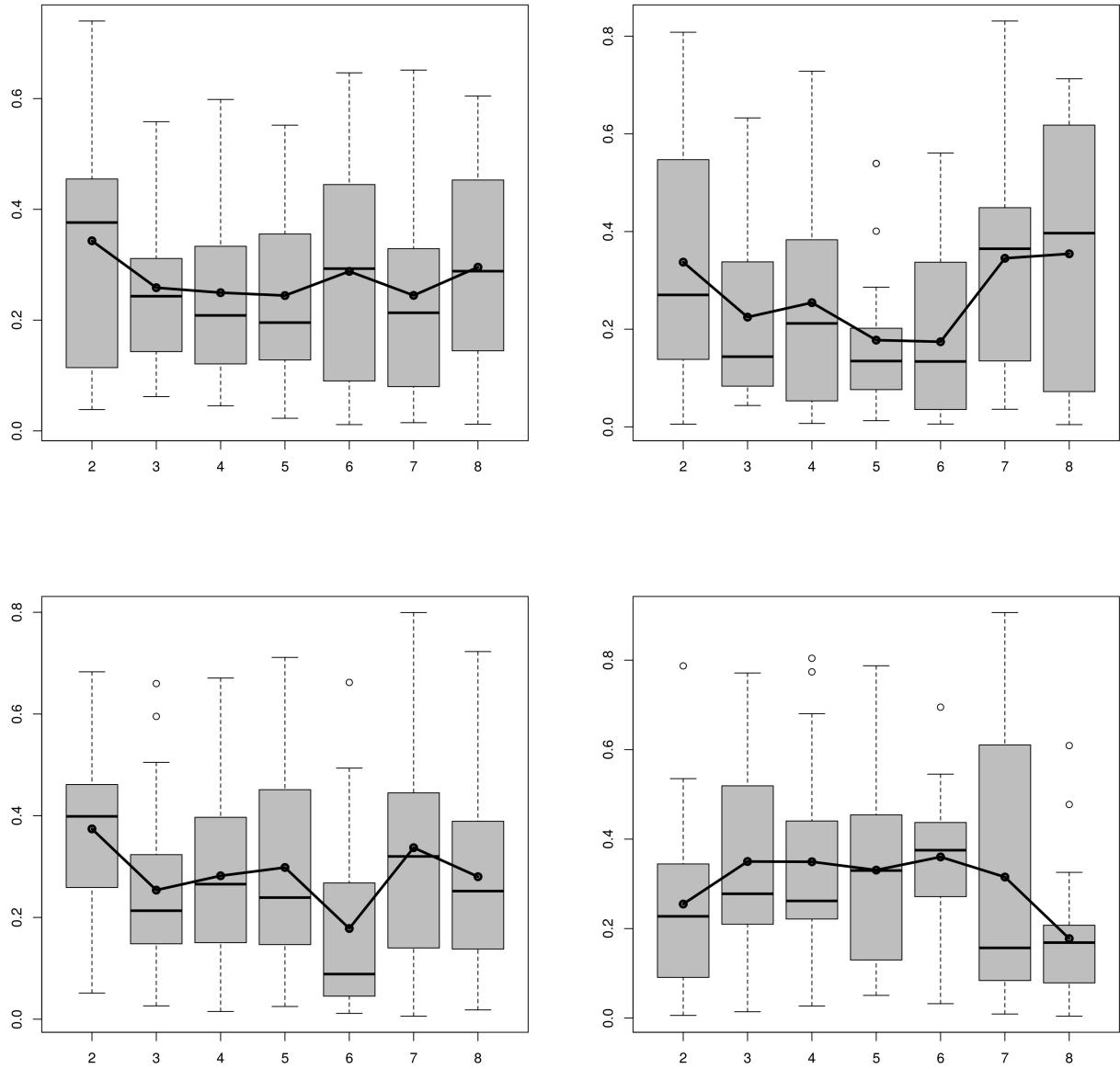


Figure 7: Silhouette coefficient from $k = 2$ groups to $k = 8$ groups. Left to right and up to down quarter 1, quarter 2, quarter 3 and quarter 4.

0) or between Rivera (X) and Artigas (Y) in quarter 1 (p -value = 0.029). In general terms and in agreement with what was observed in the clustering section, it was observed that the maximum values observed in the 5 southernmost stations were independent of the maximums observed in the 4 northernmost stations. Table 4 shows the decisions made by the independence test between the vectors $X = (\text{Colonia}, \text{Melilla}, \text{Carrasco}, \text{Punta del Este}, \text{Rocha})$ and $Y = (\text{Salto}, \text{Tacuaremb\'o}, \text{Rivera},$

Artigas) in each of the quarters and semesters.

It is known that in Uruguay it rains more in quarters 1 to 3 in the north than in the south, see the annual accumulate rainfall in Uruguay given in Figure 1, this fact is reflected in terms of extreme rainfall too, according to the results shown in Table 4.

Finally, Table 5 shows the decision resulting from the application of the independence test

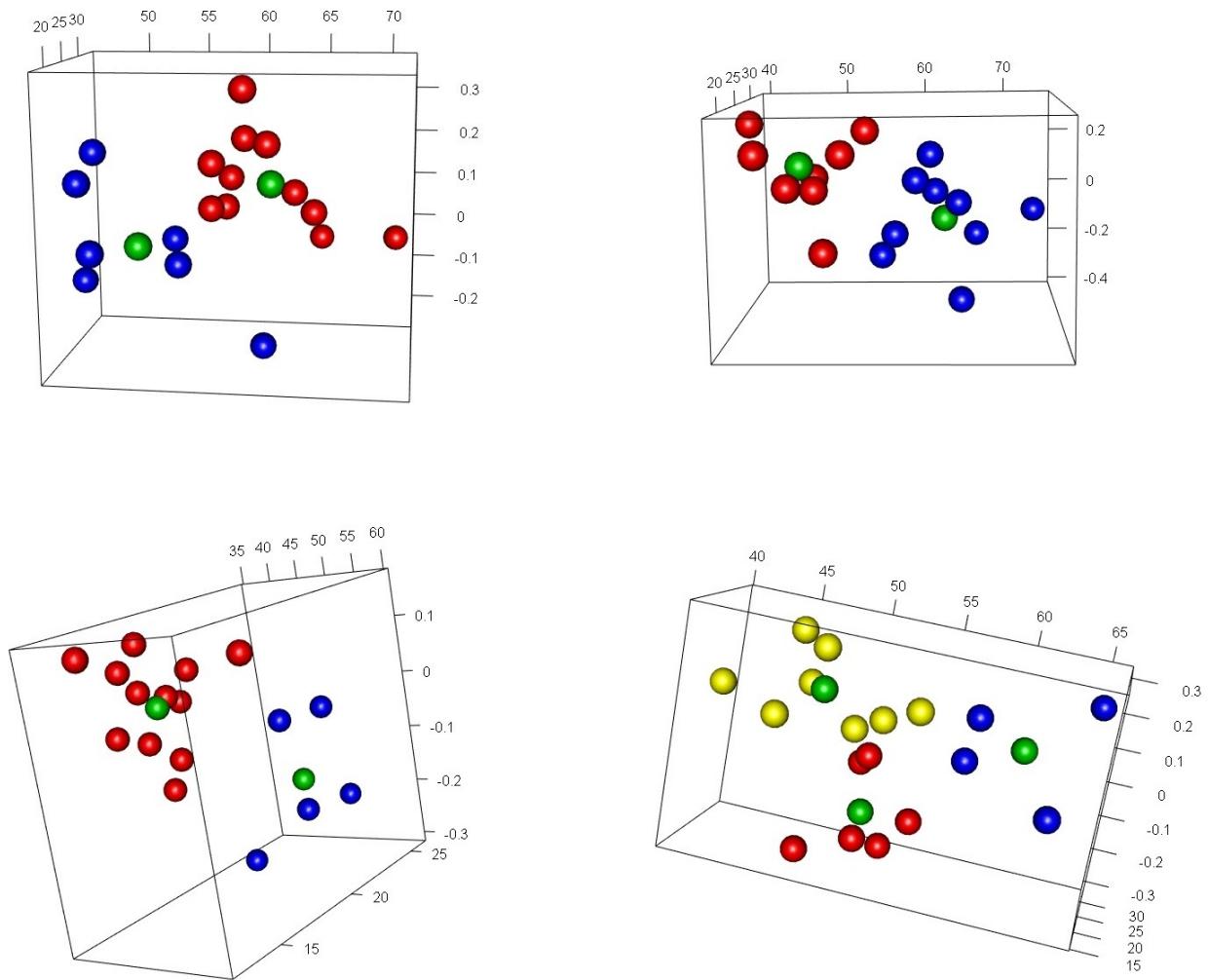


Figure 8: Graph of the 18 triples (μ, σ, ξ) in each quarter separated into 2 groups (quarters 1, 2 and 3) and three groups in quarter 4. In red those belonging to group 1, in blue those belonging to group 2, in yellow group 3) and in green the centroid of each cluster. Quarter 1 (top left), Quarter 2 (top right), Quarter 3 (bottom left), and Quarter 4 (bottom right).

between both groups separated through k-means for each of the quarters and semesters.

As seen in Table 5, except for quarter 4 and semester 2 in the other cases, the hypothesis of independence between the groups is not rejected. The explanation in the case of quarter 4 (where the groups give dependents), is due to the fact that Carrasco is in group 1 while the very close Melilla station is in group 2, with Carrasco and Melilla being two stations very close between them. The nearby stations

are highly dependent. In semester 2, something similar occurs between the Salto station (which belongs to group 1) and Tacuarembó station (which belongs to group 2).

Summarizing, by combining these three statistical tools, and concerning to maximum rainfall in each quarter, small difference were found between south and north but not between east and west. This result can be interesting because it is well-known that in winter the accumulated rainfall distribution gradient is

west are not observed. Another important conclusion of the work is from the statistical point of view, is that in general TCVM seem to performed better than the results obtained by the LR test. Given that the TCVM applied is an intuitive adaptation of the one proposed for the normal distribution in Kalemkerian (2019), as future work the theoretical development of this tool applied to the Gumbel distribution would be of interest, as well as the comparison with other tests related to the Gumbel for other data sets.

REFERENCES

- Anderson, T., Corso, C., Mendez, L. A., Gois Barboza, A. and Schneider, V. E., 2020: Determinação de equações de chuvas intensas para a encosta superior do nordeste do Rio Grande do Sul. Ciência e Natura; 42.
- Bettolli, M.L., Solman, S.A., Da Rocha, R.P., Llopert, M., Gutiérrez, J.M., Fernández, J., Olmo, M.E., Lavin-Gullon, A., Chou, S.C., Rodrigues, D. Carneiro, Coppola, E., Balmaceda Huarte, R.; Barreiro, M.; Blázquez, J.; Doyle, M., Feijoó, M., Huth, R., Machado, L., Cuadra, S. Vianna. The CORDEX Flagship Pilot Study in southeastern South America: a comparative study of statistical and dynamical downscaling models in simulating daily extreme precipitation events. Climate Dynamics.
- Carril, A.F., Cavalcanti, IFA., Menendez, C.G., Sörensson, A., López-Franca, N., Rivera, J.A., Robledo, F., Zaninelli, P.G., Ambrizzi, T., Penalba, O.C., da Rocha, R.P., Sánchez, E., Bettolli, M.L., Pessacg, N., Renom, M., Ruscica, R., Solman, S., Tencer, B., Grimm, A.M., Rusticucci, M., Cherchi, A., Tedeschi R., Zamboni, L. (2016). Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. Clim Res 68(2–3):95–116.
- Cavalcanti, IFA. (2012). Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: a review and case studies for the frst decade of the 21st century. Atmos Res 118:27–40. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.012>
- Cavalcanti, IFA, Carril, A.F., Penalba, O.C., Grimm, A.M., Menéndez, C.G., Sanchez, E., Cherchi, A., Sörensson, A., Robledo, F., Rivera, J., Pántano, V., Bettolli, M.L., Zaninelli, P., Zamboni, L, Tedeschi, RG, Dominguez, M, Ruscica, R, Flach, R (2015) Precipitation extremes over La Plata Basin—review and new results from observations and climate simulations. J Hydrol. 23:211–230. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>.
- Coles, S., Bawa, J.; Trenner, L. and Dorazio, P., 2001: An Introduction to statistical modeling of extreme values, Springer, vol 208.
- Fisher, R. A. and Tippett, L. H. C., 1928: Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample, Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 180-190.
- Gnedenko, B., 1943: Sur la distribution limite du terme maximum d'une serie statistical techniques, Springer (2008). aleatoire, Annals of mathematics, 423-453.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C. and Wallis, J. R., 1979: Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressable in inverse form, Water resources research 15-5, 1049-1054.
- Hernández, A., Guenni, and Sansó, B., 2011: Características de la precipitación extrema en algunas localidades de Venezuela. Interciencia (3) 185–191.
- Jenkinson, A. F., 1955: The frequency distribution of the annual máximo (or mínimo) values of meteorological elements. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 348 (81) 158-171.
- Kalemkerian, J., 2019: A truncated Cramér-von Mises test of normality, Communications in Statistics-Theory and Methods, 48:16, 3956-3975.
- Kalemkerian, J. and Fernández, D., 2020: An Independence Test Based on Recurrence Rates. Journal of multivariate analysis, v 178 (C), 104624.

- Kalemkerian, J. and Fernández, D., 2022: An Independence test based on recurrence rates. An empirical study and applications to real data. Communications in Statistics-Simulation and Computation: 1-21. <https://doi.org/10.1080/03610918.2022.2037637>.
- Kaufman, P. R. L., 1990: Finding groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. Wiley.
- Medeiros, E. S., Alvez, M. A. and Souza, S. A., 2019: Estimação de nível de retorno da precipitação máxima diária no município de Jataí, Goiás. Ciência e Natura; 41:1-08.
- Package “extremes”. <https://cran.r-project.org/web/packages/extRemes/extRemes.pdf>.
- Rousseeuw, P., 1986: Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, J. Comp App Math.
- Santiñaque, F., 2020: Análisis estadístico de precipitaciones extremas en Uruguay, Facultad de Ingeniería – UdelaR. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/24577>.
- Santiñaque, F., Kalemkerian, J. and Renom, M., 2021: <https://arxiv.org/pdf/2112.05179.pdf>
- Silva, L. V., Casaroli, D., Pego, A.W., Alves, J. and Battisti, R., 2019: Rainfall Intensity-Duration-Frequency Relationship for Risk Analysis in the Region of Matopiba, Brazil. Revista Brasileira de Meteorologia, 34(2): 247-254.
- Vich, A. I. J., Norte, F. A. and Lauro, C., 2014: Análisis regional de frecuencias de caudales de ríos pertenecientes a cuencas nacientes en la cordillera de los Andes. Meteorologica, 39: 3-26.
- Von Mises, R., 1936: La distribution de le plus grande de n valeurs. Rev. math. Union interbalcanique, (1) 141-160.

ESTUDIO CLIMATOLÓGICO DE NIEBLA EN AEROPUERTOS ARGENTINOS

Melina Sol Yabra^{1,2}, Ramón de Elía², Luciano Vidal² y Matilde Nicolini^{1,3,4}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

²Servicio Meteorológico Nacional Argentina

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, CONICET/FCEN-UBA, Buenos Aires, Argentina

⁴Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos,
CNRS/IRD/CONICET-UBA, Buenos Aires, Argentina

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio climatológico sobre niebla utilizando reportes aeronáuticos horarios (METAR) para el período 2000-2019 en los siguientes aeropuertos con distintos entornos geográficos: Ezeiza, Aeroparque, San Fernando, Mar del Plata, Rosario, Resistencia, Iguazú, Córdoba, Neuquén, Bariloche, Río Gallegos, Río Grande, Ushuaia y Montevideo. Se analizaron diferentes fuentes de datos (argentina SMN, española OGIMET y estadounidenses NOAA y IEM) y se eligió la base NOAA por ser la más completa, robusta y que se extiende por un mayor período de tiempo con el fin de construir las climatologías más representativas de la realidad posibles. Los datos fueron analizados considerando las regulaciones internacionales de la OACI a las observaciones meteorológicas y las prácticas de los observadores meteorológicos en Argentina. Entre los resultados más destacables, se encontró la mayor cantidad promedio de días por año con presencia de niebla en Mar del Plata, Ezeiza, Río Grande y Montevideo (49,8, 49,1, 34,1 y 34,8 respectivamente) mientras que Neuquén, Bariloche, Ushuaia y Aeroparque presentaron los menores valores (3,5, 4,4, 1,4 y 7,1 respectivamente). Se encontró un grupo de aeropuertos en los que las frecuencias de ocurrencia tienen un ciclo diario con los mayores valores en horas cercanas al amanecer (15-20 %, 7 am) durante la mayor parte del año (Ezeiza, Mar del Plata, San Fernando, Córdoba, Rosario, Montevideo) mientras que, en otro grupo, las frecuencias diarias no presentan un rango horario predominante pero sí se encuentran mayormente en los meses invernales (Río Gallegos, Río Grande, Aeroparque). El análisis climatológico de la dirección y velocidad del viento se abordó considerando la infraestructura de los aeropuertos como la dirección de la pista y la presencia de instrumental que permita operaciones con visibilidad reducida. En particular, el primer grupo presentó un predominio de vientos calmos durante las horas de visibilidad reducida, mientras que en el segundo predominaron los vientos leves y moderados provenientes desde cuerpos de agua. Por último, se estudió la reducción de visibilidad por niebla de forma simultánea en diferentes aeropuertos con el fin de establecer el impacto del fenómeno en la logística de las aerolíneas en lo que respecta al uso de aeropuertos alternativos.

Palabras clave: niebla, visibilidad, METAR, climatología, aeronáutica.

FOG CLIMATOLOGY IN ARGENTINA'S AIRPORTS

ABSTRACT

The main objective of this work is to present a climatology and characterization of fog and mist periods over Argentinean airports with different geographical environments. Hourly aeronautical reports, METAR, were used for the 20-year period corresponding to 2000-2019 at the following airports: Ezeiza, Aeroparque, San Fernando, Mar del Plata, Rosario, Resistencia, Iguazú, Córdoba, Neuquén, Bariloche, Río Gallegos, Río Grande, Ushuaia and Montevideo (Uruguay). Different data sources were analyzed (from the SMN, Argentina, from OGIMET, Spain, and from NOAA and IEM, United States) and the NOAA data source was selected for this study because it was found to be the most complete and extended one. Data analysis was made considering international ICAO's regulations for meteorological observations and the local meteorological observers' practices. The greatest mean number of days per year with fog was found at Mar del Plata, Ezeiza, Río Grande and Montevideo airports (49.8, 49.1, 34.1 y 34.8, respectively), whereas Neuquén, Bariloche, Ushuaia and Aeroparque airports presented the lowest values (3.5, 4.4, 1.4 y 7.1, respectively). At some airports (Ezeiza, Mar del Plata, San Fernando, Córdoba, Rosario, Montevideo) occurrence frequencies had a daily cycle with larger values near dawn (15-20 %, 7 am) during most of the year, while at others (Río Gallegos, Río Grande, Aeroparque), even if mainly found during the cold season, it did not present a predominant hourly range. Wind speed and direction were analyzed and included with particular emphasis on the airport infrastructure such as runways directions and landing instruments. The first mentioned airports presented calm wind conditions linked to the presence of fog and mists. At the secondly mentioned airports, weak and moderate winds were dominant and mostly from coastal directions. Lastly, to measure the impact that fogs have on aviation logistics from airlines, frequencies of simultaneous hours with reduced visibility due to fog in neighboring or alternative airports were studied.

Keywords: fog, visibility, METAR, climatology, aviation.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de la meteorología para determinar las condiciones de vuelo fue puesta en relevancia desde los inicios de la aeronáutica a principio del siglo XX (Dines, 1917) y continúa en la actualidad con creciente atención (Cook y otros 2009; Rudra y otros 2015; Gultepe y otros 2014a, b, 2017; entre otros). Entre las principales condiciones meteorológicas que causan o contribuyen a los incidentes y accidentes en la aviación se encuentra la reducción de visibilidad cerca de la superficie. Este efecto puede producir cuantiosas pérdidas económicas debido a la cancelación, demora

de vuelos, desvío hacia destinos alternativos y, en los casos más adversos, puede producir incidentes que generen pérdidas materiales y humanas. La reducción de visibilidad en los aeropuertos es frecuentemente causada por la niebla y la precipitación (Tardif y Rasmussen, 2007; Gultepe y otros, 2009), pero también puede ser causada por el polvo y la ceniza de origen volcánico (Hodges y Pu, 2015), humo (Milke, 2000), arena (Nabavi, 2016), smog (White y Roberts, 1967), etc. De todos ellos, el presente trabajo se concentrará en la niebla, fenómeno meteorológico ya definido como uno de los más disruptivos del tránsito aéreo (Gultepe y otros, 2009).

A pesar del interés que han generado los eventos de niebla en actividades de investigación meteorológica en el último medio siglo, todavía queda mucho por conocer sobre el fenómeno y muchas necesidades a cubrir en lo que respecta a su previsibilidad (Tardif, 2017). Para la industria de la aviación la reducción de visibilidad, a pesar de los progresos tecnológicos en la navegación aérea (OACI, 2004), ha sido y todavía representa una perturbación importante de las actividades normales. En las últimas dos décadas se han realizado varios estudios sobre esta temática en distintos aeropuertos internacionales alrededor del mundo como Lisboa (Teixeira, 2001), Nueva York (Tardif y Rasmussen 2007, 2008), Salónica (Stolaki y otros, 2009), París (Haefelin y otros, 2010), Estambul (Tuncay Özdemir y otros, 2016), México (González-Viveros y otros, 2018), Nueva Delhi (Kulkarni y otros, 2019), Maceio (Fedorova y otros, 2013) y Porto Alegre (Afonso y otros, 2019).

Aun cuando la reducción de visibilidad por niebla o neblina trae grandes complicaciones a la actividad aeronáutica, en la Argentina la investigación de este fenómeno es limitada a pocas regiones (Quinteros de Menzies y Obertello, 1972; Piccolo, 1983; Schonholz, 2014; Vasques Ferro y Ribero, 2015; Ruiz y otros, 2018; Lapido, 2019). Recientemente, Yabra y otros (2021a) resumieron los trabajos nacionales realizados previamente sobre la formación de niebla en los aeropuertos, y los complementaron con entrevistas a pronosticadores aeronáuticos con el fin de revelar conocimientos adquiridos en la experiencia que no hayan sido consolidados en textos. De esta forma, se generó una base de conocimientos en esta temática, que permitió circunscribir las lagunas de entendimiento y los hipotéticos mecanismos que dan lugar a la reducción de visibilidad por niebla en los respectivos aeropuertos. Dicha información recolectada fue contrastada con los resultados arrojados a partir de un estudio climatológico preliminar apoyando varias de las ideas previamente planteadas (Yabra y otros, 2021b, c).

Para continuar con la caracterización de los eventos de visibilidad reducida por niebla, el objetivo de este trabajo es presentar un estudio climatológico que resuma las principales características del fenómeno en aeropuertos con distintos entornos geográficos (continental, costero, con topografía compleja), utilizando reportes meteorológicos aeronáuticos de rutina. Los aeropuertos que abarca este trabajo se muestran en la Figura 1 y fueron seleccionados con base en la opinión de los pronosticadores aeronáuticos (Yabra y otros, 2021a) y las climatologías aeronáuticas preliminares realizadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para trabajar con este tipo de datos observacionales, es necesario realizar previamente un análisis de los mismos considerando tanto las regulaciones que la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, por sus siglas en inglés) impone para hacer las mediciones (OACI 2016a; OMM, 2014), como también las regulaciones argentinas al trabajo de los observadores y pronosticadores (ANAC, 2022) con el objetivo de evitar llegar a conclusiones erróneas.

El trabajo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se describen los datos observacionales utilizados para el estudio climatológico, su disponibilidad y las consideraciones necesarias para la comprensión de los resultados, así como también las principales características de los aeropuertos seleccionados. La metodología empleada para llevar a cabo el estudio climatológico se explica en la Sección 3 y en la Sección 4 se muestran los resultados encontrados para todos los aeropuertos, concentrándose en algunos casos específicos. Finalmente, en la Sección 5 se enumeran las conclusiones de este trabajo.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. METAR

El Reporte Meteorológico Aeronáutico de Rutina (METAR, por sus siglas en inglés) es un reconocido formato internacional que informa

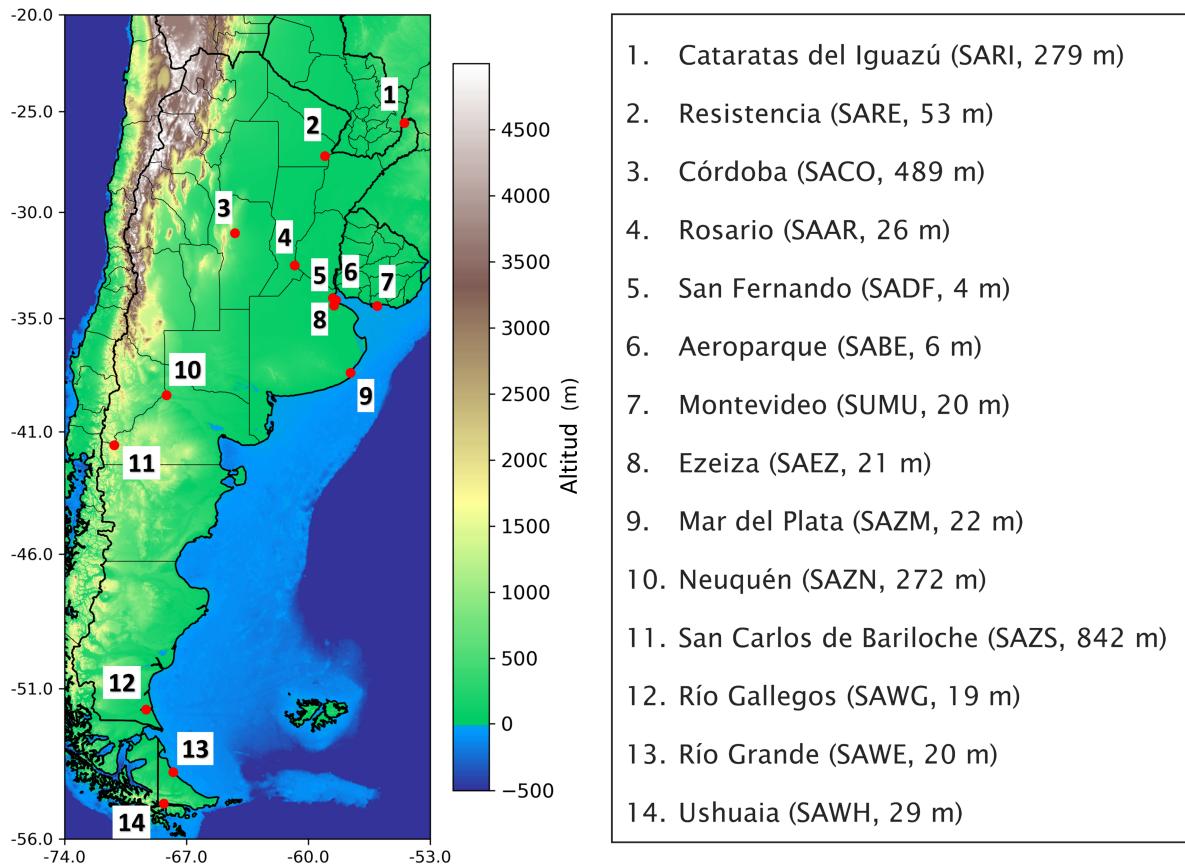


Figura 1: Aeropuertos seleccionados para realizar este trabajo. Entre paréntesis se indica el código OACI y su altitud sobre el nivel medio del mar. La información topográfica proviene del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) y de HydroSHEDS a partir de la misión SRTM (NASA Shuttle Radar Topography Mission) (Rodríguez y otros, 2005) con resolución horizontal de 90 m.

las condiciones meteorológicas del aeródromo. Frecuentemente es utilizado tanto por pilotos y despachantes de vuelo, como parte de los procedimientos previos al mismo, como también por investigadores al constituir una fuente de datos meteorológicos horarios (Tuncay y otros, 2016). Estos reportes meteorológicos fueron estandarizados por la OACI en 1968 para asegurar la uniformidad de formato en todo el mundo (OACI, 2016a). De esta forma, los METARs contienen principalmente la siguiente información en el orden indicado: identificación del tipo de informe, indicador de lugar, día y hora considerando el Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés) de observación, dirección y velocidad del viento en la superficie, visibilidad, alcance visual en

la pista, tiempo presente, cantidad de nubes, tipo de nubes y altura de la base de las nubes, temperatura del aire y del punto de rocío, presión atmosférica (Ver Apéndice A).

Una vez confeccionados por el observador meteorológico aeronáutico, los METARs, se difunden hacia el SMN y luego en boletines de Información Operativa Meteorológica (OPMET. OMM, 2015) en Formato IWXXM hacia los bancos internacionales de datos designados por el Acuerdo Regional de Navegación Aérea (Brasilia, en el caso de Argentina. OACI, 2010) a través del Sistema de Manejo del Mensaje Aeronáutico (AMHS, por sus siglas en inglés) independiente de la conexión a Internet. Hasta

el 2015 el SMN no contó con un sistema de almacenamiento interno que permitiera disponer de antiguos reportes METAR (y sus metadatos) provenientes de todas las históricas estaciones meteorológicas aeronáuticas. Este hecho contribuyó a que, a diferencia de los datos de estaciones meteorológicas no aeronáuticas, no exista en el SMN una única base de almacenamiento que reuniera todos los datos de forma homogénea.

Para este estudio climatológico se utilizaron los reportes METAR provenientes de las estaciones meteorológicas aeronáuticas de la red de observaciones de superficie del SMN ubicadas en los aeropuertos seleccionados (Fig. 1), correspondientes al período 2000-2019 y almacenados en la Base Integrada de Datos de Superficie (ISD, por sus siglas en inglés. Smith y otros, 2011) del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera (NOAA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. Se eligió esta base de datos porque es la que contiene el período de información más largo, a diferencia de otras bases como la propia del SMN (desde el 2016), la base española OGIMET (desde el 2005) o la base Iowa Environmental Mesonet (IEM, por sus siglas en inglés, desde el 2011; Todey y otros 2002), como se observa en la Figura 2.

2.1.1. DISPONIBILIDAD DE LOS REPORTES METAR

Si bien los datos utilizados fueron producidos desde la red de observación de superficie del SMN y del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), éstos fueron obtenidos desde una base de datos externa a dichos organismos. Debido a esto, no es fácil atribuir la causa de la falta de datos que podría tener su origen tanto en la medición y codificación por parte del observador de turno, como también fallas en las comunicaciones, tanto internas como externas, que pueden darse dentro del circuito que atraviesan los reportes hasta formar parte de la base final de datos. Además, las

fallas en la comunicación generan una pérdida casi instantánea de la información ya que los METARs del día remitidas con atraso de más de 18 horas serán rechazadas por el banco OPMET (OACI, 2010). Un evento importante que puede haber jugado un rol en la falta de datos en los primeros años de este siglo es la transición que sufrió el SMN a partir del 1 de enero del 2007 (Fig. 2a-c), donde la institución pasó de ser dependencia del Comando de Regiones Aéreas a cargo de la Fuerza Aérea Argentina, a la actual Secretaría de Investigación, Política Industrial y Producción para la Defensa del Ministerio de Defensa de la Nación (Decreto N° 1689/2006).

Por otro lado, existe una variación con los años de las horas con reportes en cada uno de los aeropuertos. Por ejemplo, la reducción de las horas nocturnas de medición entre las 20 y 6 hora oficial argentina (HOA UTC-3) a partir del 2001 y la ampliación de las mismas a partir del año 2013 (Fig. 2a-c) es seguramente atribuible a una sucesión de distintos Planes de Labor que son las regulaciones y requerimientos de los observadores meteorológicos aeronáuticos determinados por el SMN teniendo en cuenta las necesidades de las dependencias de los servicios de tránsito aéreo (ver Apéndice 1 en Yabra y otros, 2021b). La variación de los Planes de Labor condujo a períodos con reportes horarios distribuidos en diferentes horas del día y con variaciones interanuales en función de la evolución de uso de los aeropuertos. Lamentablemente no existe metadata sobre estos cambios en los Planes de Labor para asegurar que todo cambio que se aprecia sea únicamente resultado de modificaciones de dichos planes. Algunos de estos cambios pueden deberse a mejoras de Planes de Labor que originalmente solo emitían reportes trihorarios (en horas principales y secundarias) y/o reportes solamente activos en las horas en las que el aeropuerto estaba operativo. Estos cambios en el régimen horario de reportes tienen incidencia en el análisis de frecuencias de ocurrencia horarias. La Figura 3 muestra la cantidad de datos faltantes relativa a la cantidad que tendría que haber si se hubiesen efectuado las mediciones

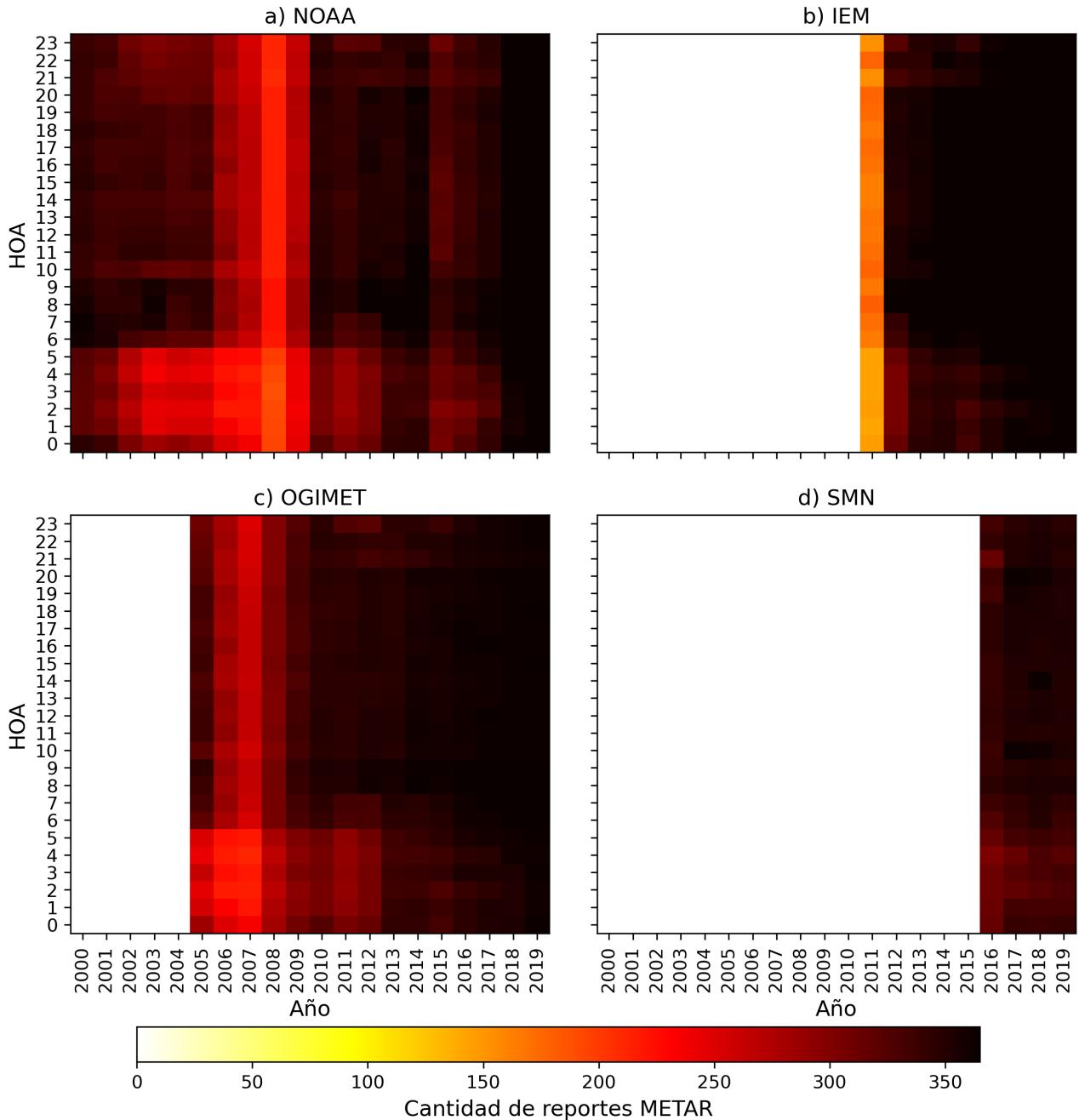


Figura 2: Evolución anual media de la cantidad de reportes METAR en función de la Hora Oficial Argentina (HOA, promedio de los aeropuertos estudiados) generados por el SMN y almacenados en las distintas bases: a) NOAA, b) IEM, c) OGIMET, d) SMN.

en cada una de las horas del día todos los días del año (365) durante todo el período de estudio (20 años). El aeropuerto de Río Grande (SAWE) es el que presenta mayor cantidad de datos faltantes en las horas nocturnas hasta el 2017 superando el 60 % entre la 1 y las 6 HOA,

asociada probablemente a una operatividad del aeropuerto limitada a períodos diurnos. Este comportamiento también se encontró pero en menor medida en los aeropuertos de Ushuaia (SAWH), Bariloche (SAZS), Mar del Plata (SAZH), Neuquén (SAZN) y San Fernando

(SADF). Estos últimos dos son los que tienen mayor cantidad de datos faltantes distribuidos en todas las horas del día y esto se debe a la ausencia o escasa cantidad de reportes durante años completos: del 2005 al 2010 en el caso de Neuquén (SAZN), y del 2000 al 2009 en el caso de San Fernando (SADF). Los aeropuertos con menor cantidad de datos faltantes son Ezeiza (SAEZ), Resistencia (SARE), Cataratas del Iguazú (SARI), Río Gallegos (SAWG) y Montevideo (SUMU).

2.1.2. CONSIDERACIONES NECESARIAS PARA LA UTILIZACIÓN DE METAR

Para corroborar que se tratara de los mismos mensajes realizados por los observadores meteorológicos del SMN, se compararon los valores de visibilidad de ambas fuentes (NOAA y SMN) durante el año 2017 para el aeropuerto de Rosario y se encontró que, en efecto, los mensajes son idénticos. No obstante, algunos aspectos vinculados a la utilización de los reportes deben ser tenidos en cuenta para el análisis de los resultados:

a) Metadato. El METAR sólo informa el día y la hora UTC de validez del reporte, por ende, el mes y el año al que pertenecen deberá ser extraído del metadato siendo este de suma importancia a la hora de trabajar con períodos de varios años.

b) Medición de la visibilidad. El Anexo 3 (OACI, 2016a) comprende prescripciones tanto para las observaciones como para los pronósticos orientados a contribuir a la seguridad operacional en la navegación aérea. En Argentina las observaciones meteorológicas en aeródromos informan la visibilidad mínima, la cual se basa en la estimación de la mayor distancia visible en la dirección de menor visibilidad a partir de visualización de obstáculos de referencia preestablecidos para cada aeropuerto sin importar la dirección en la que se encuentre. Es importante notar que los obstáculos de referencia que utiliza el

observador para medir dicha variable no son construidos con el propósito de esta medición, sino que consisten en estructuras elegidas ad hoc que responden a las características propias de cada aeropuerto. Este hecho conduce a una discretización de la medición de visibilidad (tanto en su variabilidad angular como en distancia) que no resulta uniforme dentro del mismo aeropuerto y tampoco entre distintos aeropuertos. Una vez ya realizada la medición de visibilidad por el observador meteorológico, esta deberá ser especificada en el reporte bajo el siguiente criterio: cada 50 m cuando la visibilidad se encuentra entre 0 y 800 m; cada 100 m cuando la visibilidad se encuentra entre 800 y 5000 m; cada 1000 m cuando la visibilidad se encuentra entre 5000 y 10000 m. Todo valor observado que no corresponda a la escala de notificación utilizada será redondeado hacia el incremento inferior más bajo de la escala (OACI, 2016a).

c) Precisión con que se reporta la temperatura del aire y la de punto de rocío. Si bien estas variables son continuas, según la normativa del Anexo 3 (OACI, 2016a) sólo se reportan sus partes enteras. Además de la información que se pierde al redondear estos valores, la poca precisión puede conducir a cierto error en el cálculo de otros indicadores como, por ejemplo, la humedad relativa (este error puede ser de hasta 7 %, y su análisis se puede encontrar en Yabra y otros, 2021b).

d) Medición sesgada de la dirección del viento. El Anexo 3 (OACI, 2016a) indica que la dirección y la velocidad del viento de superficie se notificarán en escalones de 10 grados angulares (°) y 1 kt, respectivamente, redondeado al escalón más próximo todo valor que no se ajuste a dicha escala. En los aeropuertos que no cuentan con Sistemas Automáticos de Observación Meteorológica (AWOS, por sus siglas en inglés), estas mediciones son realizadas por el observador utilizando el anemómetro y la veleta que se dispone en cada estación aeronáutica. En estos casos, la medición de la dirección del viento

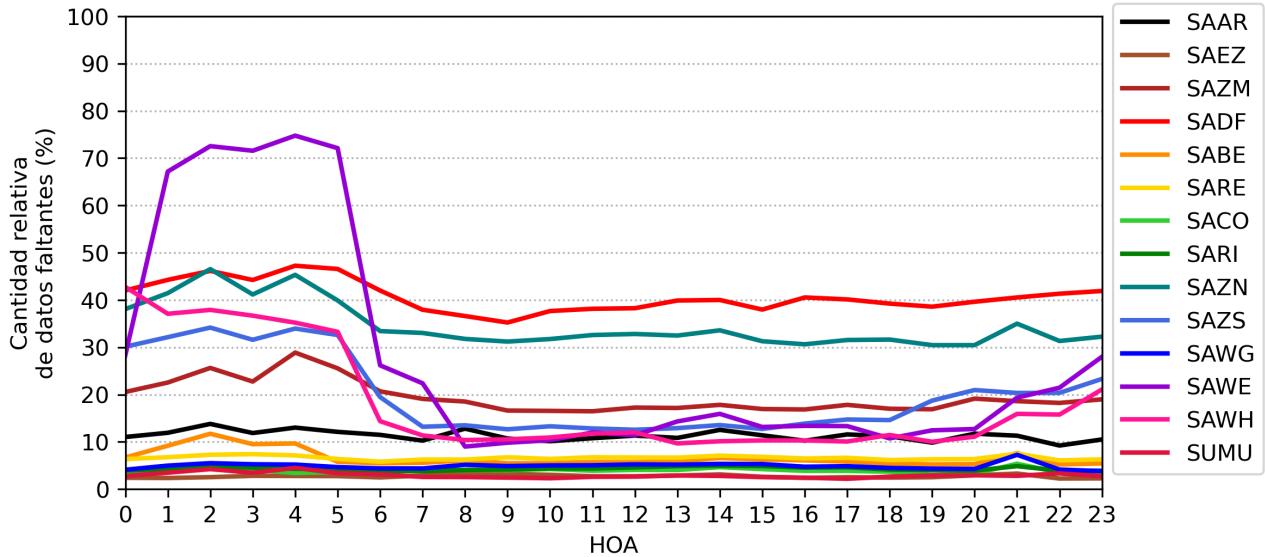


Figura 3: Distribución horaria de la cantidad relativa de datos METAR faltantes en cada aeropuerto para el período 2000-2019 en la base de almacenamiento NOAA.

puede verse sesgada por diferentes factores. Por un lado, la utilización de una escala de redondeo del valor por parte del observador que fuera distinta a la establecida en la normativa, por ejemplo, en intervalos de 45° conduciendo a la falta de precisión de las coordenadas. Por otro lado, la ondulación del terreno (Carrera y otros, 2009) o la existencia de construcciones cercanas a la estación meteorológica podría obstaculizar la circulación del viento y producir datos fuertemente sesgados en dirección y velocidad. En este caso, dichos datos conducirían a formular conclusiones erróneas respecto de, por ejemplo, la advección de humedad que daría lugar a la formación de niebla.

e) Inconsistencias en el tiempo presente. Existe una gran cantidad de reportes donde el tiempo presente, o bien falta, se encuentra mal codificado o contradice otras observaciones en el METAR. En particular, la diferencia entre reportar niebla o neblina radica en si el valor de la visibilidad es menor a 1000 m o, mayor a 1000 m y menor a 5000 m, respectivamente (OMM, 1966). Sin embargo, se encontraron reportes con niebla en el tiempo presente y visibilidad mayor a 1000 m (0,2% del total de reportes, calculado con el cociente 14/7511), y también numerosos

reportes con neblina y visibilidad menor a 1000 m (10% del total, calculado como el cociente 762/7511) como se muestra en la Tabla I para el aeropuerto de Ezeiza. Particularmente se destaca la cantidad de horas con niebla (por tener visibilidad menor a 1000 m) que fue reportada como neblina ya que representan el 19% de la cantidad total de horas con niebla (calculados como el cociente 762/3934). En otros aeropuertos también se encontraron estas últimas inconsistencias, pero con valores menores, por ejemplo, 4% en Córdoba y 2,5% en Aeroparque. A diferencia de estos, el aeropuerto de Bariloche se destaca por tener el 56% de las horas con neblina reportadas como niebla. Esto tiene incidencia a la hora de analizar el fenómeno que explica la reducción de visibilidad y definir la metodología utilizada en este trabajo, y nos obliga a, o bien a tomar a una de las dos informaciones contradictorias como verdadera, o a desecharlas (ver Sección 2.3).

2.2. AEROPUERTOS

Cook y otros (2009) cuantificaron el impacto de los factores meteorológicos en los retrasos de los vuelos y encontraron que los factores contribuyentes dependen en gran medida del

	METAR con visibilidad [0 m, 1000 m]	METAR con visibilidad [1000 m, 5000 m]	Total
METAR con niebla	3172	14	3186
METAR con neblina	762	3563	4325
Total	3934	3577	7511

Tabla I: Cantidad de reportes METAR para el aeropuerto de Ezeiza (SAEZ) cuyo tiempo presente reportado es niebla (primera fila) y neblina (segunda fila), categorizados según el valor de la visibilidad reportada: entre 0 m y 1000 m (primera columna) y entre 1000 m y 5000 m (segunda columna). Una tabla correspondiente a un aeropuerto sin inconsistencias entre la visibilidad y el tiempo presente, tendría ceros en las categorías “niebla con visibilidad entre 1000 m y 5000 m” y “neblina con visibilidad menor a 1000 m”.

tipo de aeropuerto. La gravedad del impacto que puede provocar la niebla recae en la infraestructura y el instrumental que disponga, es decir, en la máxima categoría de operaciones que se puedan llevar a cabo en dicho aeropuerto. Para ello, se deben tener en cuenta varios aspectos (las condiciones meteorológicas, el instrumental meteorológico, la infraestructura del aeropuerto, el instrumental de la aeronave, la capacitación de la tripulación) y, en función de estos, se pueden clasificar los vuelos en visuales o instrumentales (ANAC, 2016). En un vuelo visual (VFR, por sus siglas en inglés), el piloto dirige su aeronave manteniendo en todo momento contacto visual con el terreno. Para este tipo de vuelo el mínimo meteorológico que se debe cumplir es 5000 m para la visibilidad. Los vuelos instrumentales (IFR, por sus siglas en inglés) son aquellos que se pueden llevar a cabo en los aeropuertos que disponen de infraestructura instrumental y por aviones y tripulaciones preparados para utilizarlas, cuando la visibilidad se encuentra por debajo de 5000 m. Los procedimientos

y mínimos meteorológicos de visibilidad para las operaciones en las diferentes categorías se establecen para asegurar que se alcance un cierto nivel de seguridad en condiciones de visibilidad reducida asociadas con las operaciones en un determinado aeropuerto. En cuanto a las condiciones meteorológicas requeridas, se utilizan umbrales mínimos de visibilidad o de alcance visual en pista (RVR, por sus siglas en inglés, se define como la distancia a la cual el piloto de una aeronave que se encuentra sobre el eje de una pista puede ver las señales de superficie de la pista o las luces que la delimitan o que señalan su eje. OACI, 2016b). Según ANAC (2019a), las diferentes categorías (CAT) meteorológicas de operaciones en cada aeropuerto se determinan como I, II y III dependiendo de la adversidad de las condiciones bajo las que se puede operar. Los aeropuertos con CAT I pueden realizar operaciones cuando la visibilidad mínima es mayor a 800 m o RVR mayor a 550 m, mientras que los aeropuertos con CAT III (A y B) pueden operar mientras que el RVR sea mayor a 200 m o incluso, con cualquier valor de RVR en el caso de CAT III C. Las categorías y los mínimos meteorológicos de los aeropuertos seleccionados para este trabajo fueron obtenidos de la Publicación de Información Aeronáutica (AIP) realizada por la Administración Nacional de Aviación Civil de Argentina (ANAC) y se encuentran detallados en el Apéndice B (<http://ais.anac.gov.ar/aip> accedido el 30/10/21).

2.3. METODOLOGÍA

Los reportes horarios METAR para todo el período y aeropuertos fueron descargados desde la fuente dentro de un archivo de texto que reúne toda la información meteorológica horaria disponible en cada aeropuerto y para cada año del período. A partir de cada archivo, los reportes fueron decodificados utilizando el módulo “Metar” desarrollado en lenguaje Python por Tom Pollard y disponible en GitHub (<https://github.com/tomp/python-metar> accedido el 30/10/21). En este trabajo, como se propone realizar

un estudio local dentro de un mismo país (con mismo huso horario) a excepción del aeropuerto de Montevideo (Uruguay), se realizó la conversión de todas las fechas a las correspondientes en HOA.

El foco de este estudio climatológico está puesto en los períodos con visibilidad reducida por niebla y neblina. Para analizar los períodos de niebla, se seleccionaron los reportes que indican visibilidad menor a 1000 m y niebla o neblina como tiempo presente (codificadas como "FG" y "BR, respectivamente), mientras que no incluya simultáneamente otro fenómeno que pueda disminuir la visibilidad ("reportes con niebla en adelante). La justificación para incluir ambos fenómenos en el tiempo presente radica en las incongruencias encontradas entre la visibilidad y el tiempo presente, aspecto ya discutido en la sección 2. Para analizar los períodos de neblina, el criterio de selección es análogo pero la visibilidad reportada debe ser mayor o igual a 1000 m y menor a 5000 m ("reportes con neblina en adelante). Según OMM (2008), un buen control de calidad de las observaciones que corresponden a nieblas y neblinas incluye la condición de superar el 90 % de humedad relativa. La Figura 4 muestra las distribuciones de depresión de punto de rocío (D) para cada intervalo de visibilidad en horas con presencia de sólo niebla/neblina en el tiempo presente considerando todos los aeropuertos. Es importante mencionar que las variables expresadas con sus números enteros, como es el caso del METAR, sólo permiten una estimación aproximada de la real depresión del punto de rocío. Es decir, lo que aquí se define como $D = 0^{\circ}\text{C}$, es en realidad un número entre 0°C y $0,9^{\circ}\text{C}$. Por ejemplo, se podría tener $10,4^{\circ}\text{C}$ de temperatura y $9,5^{\circ}\text{C}$ de temperatura de punto de rocío, lo cual representa un $D = 0,9^{\circ}\text{C}$, mientras que calculado a partir del METAR daría $D = 0^{\circ}\text{C}$. A partir de la Figura 4, se puede ver que la mayor cantidad de casos ocurre con valores cercanos a la saturación, con depresión de punto de rocío menor a 2°C . Particularmente, el 75 % de las horas con hasta los 3000 m de visibilidad tienen valores menores

o iguales a 1°C cualquiera sea el fenómeno que esté obstruyendo la visibilidad. Como trabajos anteriores han notado (Isaac y otros, 2020; Zhang y otros, 2020), a simple vista se observa la compleja relación entre estas dos variables en las horas con niebla/neblina. Los valores de depresión mayores a 2°C con nieblas/neblinas son muy poco frecuentes para las horas con visibilidad menor a 5000 m. Estos casos pueden tratarse de tiempo presente mal codificado, es decir, que se hayan reportado nieblas o neblinas cuando el fenómeno que redujo la visibilidad haya sido otro (humo o calima, por ejemplo). Otro factor que puede estar influyendo en la relación entre visibilidad, depresión de punto de rocío y tiempo presente es la localización desde donde se ha realizado la medición de cada uno. Es decir, mientras que ambas temperaturas se miden *in situ* en la estación meteorológica aeronáutica, la obstrucción de visibilidad puede deberse a un banco de niebla que se encuentra entre el observador meteorológico y el obstáculo de referencia, pero no sobre la estación. En este razonamiento, estas observaciones no refieren al mismo estado local de la atmósfera. A raíz de esto, se eligió no utilizar la depresión de punto de rocío como control de calidad de los datos. El criterio de selección de reportes con niebla o neblina se restringe a los valores obtenidos de visibilidad y de tiempo presente con el objetivo de no limitar por demás la cantidad de datos.

Algunos resultados de este trabajo son producto de la aplicación de promedios en diferentes cantidades absolutas o proporciones. Para poder realizar la comparación de estos promedios entre los distintos aeropuertos, es necesario conocer las medidas de la incertidumbre que llevan asociadas en su estimación. Por esta razón, los resultados estadísticos que se describen en la siguiente sección se informan en forma de intervalo de confianza utilizando la metodología denominada "Wilson modificado por continuidad" con un 90 % de confianza. Para una discusión más detallada ver Wallis (2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

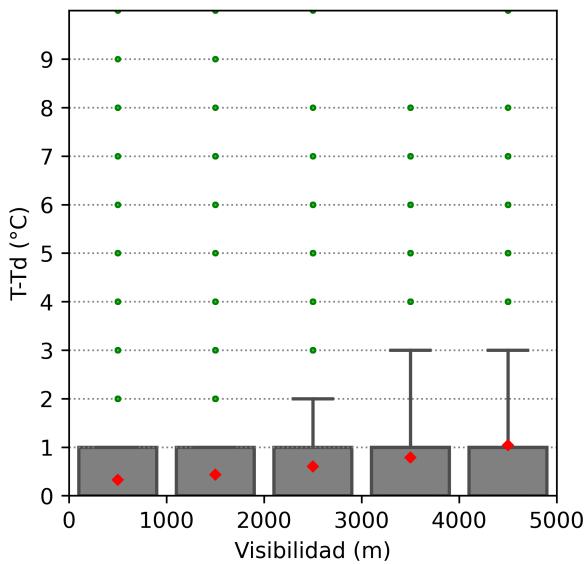


Figura 4: Boxplot para las distribuciones de depresión de punto de rocío en intervalos de visibilidad para las horas con nieblas o neblinas en su tiempo presente considerando todos los aeropuertos seleccionados.

3.1. FACTORES CAUSANTES DE LA REDUCCIÓN DE VISIBILIDAD

Tal como se mencionó en la Sección 1, la reducción de visibilidad puede deberse al efecto de otro fenómeno meteorológico y, por lo tanto, resulta de interés comparar las frecuencias de visibilidad reducida por niebla con las asociadas a otros factores meteorológicos tales como los distintos tipos de precipitación o litometeoro. La Figura 5 muestra la cantidad total de reportes METAR con visibilidad menor a 1000 m divididos según el tiempo presente para el aeropuerto de Rosario. Los otros aeropuertos no son mostrados por presentar comportamiento similar. La visibilidad reducida sin considerar el tiempo presente (Fig. 5a) tiene un régimen de ocurrencia similar al mismo considerando sólo los reportes con niebla (Fig. 5b), cuyos máximos se encuentran en las horas nocturnas y meses invernales. La cantidad de reportes con visibilidad reducida por niebla es la que domina el comportamiento de la frecuencia total lo cual otorga a este fenómeno un rol crucial dentro

de las condiciones meteorológicas necesarias para la navegación aérea. Por el contrario, la visibilidad reducida por precipitaciones (Fig. 5c) además de obedecer a otra estacionalidad, representa una menor proporción dentro del total de reportes. La reducción de visibilidad por presencia de litometeoro (Fig. 5d) presenta una muy baja ocurrencia y sin ciclos aparentes, aunque marginalmente más frecuente por la tarde que por la madrugada en Rosario. Particularmente, Aeroparque, Ezeiza, Rosario y San Fernando reportaron en reiteradas horas la presencia de humo debido a la quema de pastizales en el Delta. Por otro lado, Río Grande presentó reiterados eventos con litometeoro en suspensión durante los meses de febrero y marzo cuando el agua de la Laguna Seca (ubicada a 1,5 km al oeste del aeropuerto de Río Grande) desaparece por completo, y los fuertes vientos conducen a levantar nubes de polvo que suelen reducir la visibilidad sobre gran parte de la ciudad. En el caso de Bariloche y Neuquén, la reducción de visibilidad por presencia de litometeoro se debió principalmente a dos eventos de cenizas tras la erupción de los volcanes Puyehue en 2011 y Calbuco en 2015. Se encontraron considerables cantidades de reportes cuyo tiempo presente incluye niebla y algún tipo de precipitación (Fig. 5e) y, en aeropuertos como Río Grande, Córdoba y Aeroparque el patrón que presentan es similar al de los reportes con niebla o neblina, aunque su frecuencia es menor (Fig. 5b). Estos casos pueden deberse a la disminución de la visibilidad por la ocurrencia de precipitación y confundida con niebla o también a la formación de niebla producto de la condensación generada a partir de la saturación del aire tras la evaporación de la precipitación caída, dentro de la misma hora considerada para el reporte. Tal como se observa en el aeropuerto de Rosario, en los aeropuertos de Ezeiza y Mar del Plata también se encontraron escasos reportes nocturnos y cercanos a la hora del amanecer con visibilidad reducida, pero sin información del tiempo presente (Fig. 5f). Por el patrón que presentaron, similar al correspondiente a este fenómeno, se asume que en su mayoría fueron

nieblas no reportadas, aunque no se consideran para el estudio climatológico.

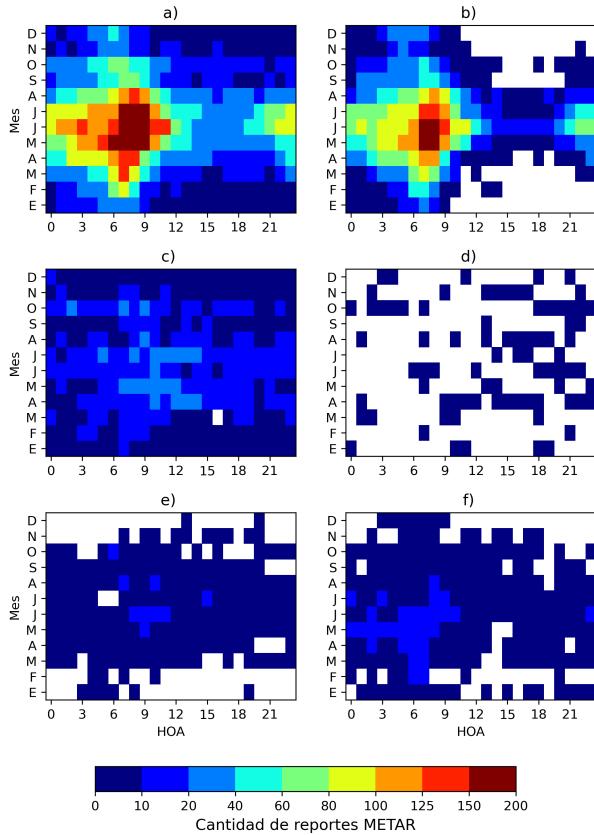


Figura 5: Cantidad de reportes METAR con visibilidad menor a 1000 m en el aeropuerto de Rosario por hora y mes para el período 2000-2019: a) totales, b) niebla, c) precipitación, d) litometeoro, e) precipitación y niebla y f) sin información en el tiempo presente.

3.2. CARACTERÍSTICAS TEMPORALES DE LAS NIEBLA Y NEBLINA

La Tabla II muestra la cantidad promedio de días por año (considerando los años disponibles en cada aeropuerto) y promedio de horas por día con visibilidad reducida por niebla o neblina en cada aeropuerto. Para calcularlas se seleccionaron todos los reportes con niebla y con neblina como se describió en la Sección 2.3. La cantidad de días por año refiere a la cantidad de días con al menos un (1) reporte con el fenómeno mientras que la cantidad de

horas por día equivale a la cantidad de reportes en cada uno de dichos días promediada por la cantidad total de días con niebla o neblina. Estas cantidades permiten tener una primera estimación de la frecuencia de ocurrencia de este fenómeno en cada región. Es importante tener en cuenta que la comparación entre aeropuertos debe realizarse con cierta precaución ya que como se mostró en la Figura 2 la disponibilidad de datos es variada. Entre los aeropuertos con mayor cantidad promedio de días por año con presencia de niebla se encuentra el de Mar del Plata con 49,8 y Ezeiza con 42,1 días, mientras que los de Neuquén y Ushuaia presentaron las menores cantidades con valores de 3,5 y 1,4, respectivamente. El comportamiento de los días por año con neblina es análogo al de la niebla, pero sumando al aeropuerto de Montevideo dentro de los que más días por año tienen y Bariloche dentro de los que menos días por año tienen (71,9 y 9,3 días, respectivamente).

Respecto de la cantidad de horas por día, el caso más extremo es Ushuaia para los casos de niebla, en el cual esos 1,4 días tienen en promedio reducción de visibilidad por 4,75 horas, estimando la ocurrencia de niebla como recurrente dentro del mismo día (no se puede aseverar estimaciones sobre la duración de la niebla ya que el estudio no incluye el tratamiento de horas consecutivas de reportes con niebla). Por el contrario, en los días en que la visibilidad es reducida por neblina en el mismo aeropuerto, estos días tienen en promedio 1,62 horas siendo el menor valor encontrado. Este estudio particular sobre la cantidad de horas por día con niebla o neblina tiene un carácter estimativo, ya que en la realidad los eventos de visibilidad reducida pueden ser una combinación de ambos fenómenos en horarios sucesivos y por ende, la cantidad de horas por día total podría ser mayor a la considerada individualmente para cada fenómeno. Seguido de Ushuaia, los aeropuertos de Ezeiza, Río Grande y Río Gallegos presentaron las mayores cantidades de horas por día con niebla (3,7, 3,9, 3,7 horas, respectivamente), mientras que Aeroparque es el que presentó mayor cantidad

Aeropuerto	Días por año con niebla	Días por año con neblina	Horas por día con niebla	Horas por día con neblina
Mar del Plata	49,8 (49,3 - 50,3)	83,4 (82,7 - 84,1)	3,6 (3,6 - 3,7)	3,0 (2,9 - 3,0)
Ezeiza	42,1 (41,7 - 42,6)	74,2 (73,6 - 74,7)	3,8 (3,7 - 3,8)	2,9 (2,9 - 3,0)
Rosario	30,5 (30,0 - 30,9)	50,8 (50,3 - 51,3)	3,5 (3,4 - 3,5)	3 (2,9 - 3,0)
Río Grande	34,1 (33,6 - 34,6)	47,3 (46,7 - 47,8)	4,0 (3,9 - 4,0)	3 (2,9 - 3,0)
Montevideo	34,8 (34,3 - 35,2)	71,9 (71,3 - 72,5)	3,8 (3,7 - 3,8)	3,3 (3,3 - 3,4)
Iguazú	30,8 (30,4 - 31,2)	58,8 (58,2 - 59,3)	3,0 (2,9 - 3,0)	2,9 (2,9 - 3,0)
Resistencia	20,0 (19,6 - 20,3)	49 (48,5 - 49,5)	2,9 (2,8 - 2,9)	2,4 (2,4 - 2,5)
San Fernando	18,8 (18,4 - 19,2)	34, 1 (33,5 - 34,6)	3 (2,9 - 3,0)	2,7 (2,71 - 2,78)
Córdoba	16,0 (15,7 - 16,3)	36,3 (35,8 - 36,7)	2,8 (2,8 - 2,9)	2,7 (2,6 - 2,7)
Río Gallegos	15,1 (14,8 - 15,4)	19,7 (19,4 - 20,0)	3,78 (3,7 - 3,8)	2,7 (2,6 - 2,7)
Aeroparque	7,1 (6,9 - 7,3)	34,1 (29,7 - 30,5)	3,6 (3,5 - 3,6)	3,5 (3,5 - 3,6)
Bariloche	4,4 (4,2 - 4,6)	9,3 (9,0 - 9,5)	3,5 (3,4 - 3,5)	2,0 (2,0 - 2,1)
Neuquén	3,5 (3,3 - 3,6)	4,8 (4,6 - 5,0)	3,2 (3,1 - 3,2)	1,9 (1,9 - 2,0)
Ushuaia	1,4 (1,3 - 1,5)	1,9 (1,7 - 2,0)	4,8 (4,7 - 4,8)	1,6 (1,6 - 1,7)

Tabla II: Cantidad promedio de días por año y horas (reportes) por día con niebla y neblina en el análisis climatológico. Los intervalos de confianza al 90 % entre paréntesis, se calcularon de acuerdo a la metodología mencionada en la sección 2.3.

de horas por día con neblina (3,51 horas).

La Figura 6 muestra los ciclos anuales (5a) y diarios (5b) de las frecuencias relativas de reportes con neblina para cada aeropuerto. Mientras que en aeropuertos continentales como Rosario, Ezeiza, Córdoba, Iguazú y Resistencia estos reportes son más frecuentes en las horas nocturnas y cercanas al amanecer, principalmente en la temporada fría, los aeropuertos costeros como Aeroparque, Río Gallegos y Río Grande, no presentan un rango horario definido siendo sus frecuencias quasi-homogéneas a lo largo del día (recordar que Río Grande carece de más del 50 % de los

datos en las horas nocturnas). Particularmente, en los aeropuertos de Iguazú y Resistencia cerca del 20 % de los reportes con neblina se concentran a las 7 de la mañana, mientras que en Aeroparque y Río Grande, este porcentaje a dicha hora se reduce a la mitad ya que se encuentra distribuido durante un período de tiempo más largo y la comparación se invierte en las horas de la tarde. En los aeropuertos continentales, el mecanismo dominante en la formación de la niebla sería el enfriamiento radiativo nocturno de la superficie bajo condiciones anticiclónicas y vientos calmos, llamándose así “niebla radiativa” (Byers, 1960). Esta hipótesis ya fue

aceptada en otros trabajos en los aeropuertos de Rosario (Lapido, 2019) y Ezeiza (Schonholz, 2015). En cambio, los aeropuertos costeros serían frecuentemente afectados en la temporada fría por la advección de masas de aire húmedas o bien de niebla ya formada proveniente de la superficie marina relativamente más cálida, llamándose “niebla advectiva” (Byers, 1960). Este resultado también ya fue expuesto en el trabajo de Vasques Ferro y Ribero (2015) enfocado en Aeroparque. También se encontraron diferencias entre aeropuertos con entornos geográficos similares. Por ejemplo, Mar del Plata y Montevideo se encuentran a poca distancia de la costa como Río Grande y Aeroparque, respectivamente, pero su régimen de ocurrencia se asemeja más al de los aeropuertos continentales. Yabra y otros (2021a) mencionaron que una posible justificación para este fenómeno se basa en la existencia de una zona boscosa entre la costa y el aeropuerto, imposibilitando o debilitando las advecciones desde esa dirección en el caso de Mar del Plata. En dicho trabajo, también se menciona la hipótesis en la que niebla radiativa formada tierra adentro hacia el noroeste, es advectada hacia este último aeropuerto cerca de la hora del amanecer. Por otro lado, los aeropuertos de Córdoba, Bariloche y Neuquén se localizan sobre regiones con terreno complejo (Ver Fig. 76 en Yabra y otros, 2021b). Mientras que los primeros parecieran estar dominados por el enfriamiento radiativo nocturno, el último pareciera tener otro mecanismo responsable de la formación de neblina que justifique el máximo de frecuencias en el mes de mayo. La extensión de las frecuencias horarias hasta el mediodía en Bariloche y Neuquén posiblemente esté influenciada por la fuerte estabilidad que se genera en los valles como consecuencia del flujo pendiente abajo de masas de aire frías, requiriendo de mayor radiación solar para romper dicha estabilidad y disipar la niebla/neblina (Pilié y otros, 1975).

Análogamente, se analizaron los ciclos anuales y diarios de las frecuencias relativas de reportes con niebla para cada aeropuerto y se

encontraron resultados similares (Fig. 7). Una de las diferencias más notables es la reducción de horas con máximas frecuencias de niebla en Bariloche y Neuquén que si bien alcanzan el mismo porcentaje entre las 8 y 9 de la mañana que en el caso de los reportes con neblina, el aumento de la frecuencia anterior a dicho máximo y la disminución posterior son más abruptos. Por otro lado, las frecuencias diarias de ocurrencia de neblina del aeropuerto de Iguazú presentaron un comportamiento similar al del aeropuerto de Resistencia. En cambio, las frecuencias de ocurrencia de niebla en dicho aeropuerto se encuentran más distribuidas durante todas las horas del día, aunque aumentan notablemente a partir de las 2 y conservan el máximo valor entre las 7 y 8 de la mañana.

3.3. COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN PRESENCIA DE NIEBLA Y NEBLINA

Las situaciones conducentes a niebla o neblina tienden en general a obedecer a situaciones sinópticas favorables bastante específicas incluidas la presencia de anticiclones en niveles bajos o ciclones con frentes cálidos, fríos o estacionarios asociados (Roach, 1995). Además de la indispensable humedad disponible en el aire, la intensidad y la dirección de los vientos en superficie pueden tener un rol fundamental. En lo que sigue se exploran las condiciones de viento para los casos de neblina o niebla concentrándose en dos aeropuertos con características peculiares.

La Figura 8 muestra las rosas de los vientos para los aeropuertos de Bariloche (arriba) y Río Grande (abajo). A la izquierda se muestran las rosas climatológicas utilizando todos los reportes disponibles (Fig. 8a y d), en el centro las rosas correspondientes sólo a aquellos reportes con neblina (Fig. 8b y e) y a la derecha correspondientes sólo a aquellos reportes con niebla (Fig. 8c y f). Como primer resultado, se puede ver que los vientos que acompañan la visibilidad reducida son muy

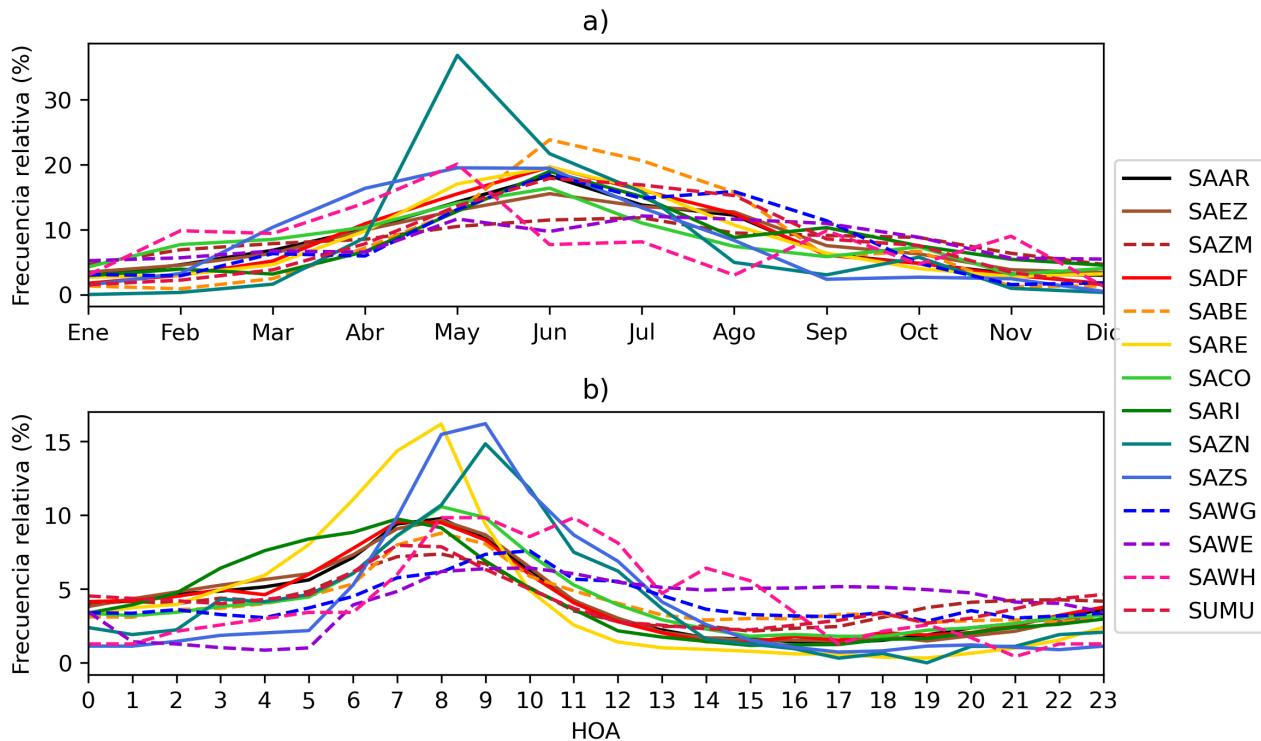


Figura 6: Frecuencia relativa de reportes METAR con niebla para el período 2000-2019 en los aeropuertos seleccionados. En el panel superior (a) se muestra el ciclo anual y en el inferior (b) el ciclo diario. En líneas continuas se presentan los aeropuertos continentales y en líneas segmentadas se presentan los aeropuertos costeros.

distintos a los climatológicos, aunque ello es más notorio en el caso de Bariloche. En los reportes con niebla o niebla de este aeropuerto se encontró un porcentaje de calmas muy elevado superior al 50%, seguido de vientos leves (2 - 6 kt) y moderados (6 - 12 kt) provenientes mayormente del sector SE. Esta dirección ya había sido señalada en las hipótesis formuladas por los pronosticadores (Yabra y otros, 2021a). Este posible efecto estaría vinculado con la topografía, ya que hacia el sudeste existe una pendiente pronunciada que podría estar favoreciendo el desarrollo de circulaciones locales de mesoscala. El comportamiento del viento prácticamente no cambia en los reportes con niebla, ya que el porcentaje de calmas se mantiene y la dirección predominante continúa siendo el SE. El predominio de vientos calmos es una característica que también se observó en la mayoría de los aeropuertos continentales como Rosario, Ezeiza, Resistencia, Córdoba, Neuquén,

y el caso más extremo, San Fernando. Este resultado refuerza la teoría sobre la formación de “niebla radiativa” (Byers, 1960) en estos aeropuertos.

Por el contrario, en el aeropuerto de Río Grande en los reportes con niebla se encontró un porcentaje de calmas poco mayor que la climatología, pero no predominante, seguido de vientos moderados y fuertes (mayores a 12 kt) provenientes mayormente de las direcciones comprendidas entre el NO y SE, dirección en la que se encuentra la costa del Mar Argentino a 2 km. El comportamiento del viento cambia en los reportes con niebla, ya que el porcentaje de calmas aumenta, no se observa ninguna dirección predominante, las velocidades disminuyen, dominan los valores menores a 8 kt y casi no superan los 16 kt. Los vientos más fuertes continúan proveniendo del mar, mientras que los leves y moderados provienen del sector

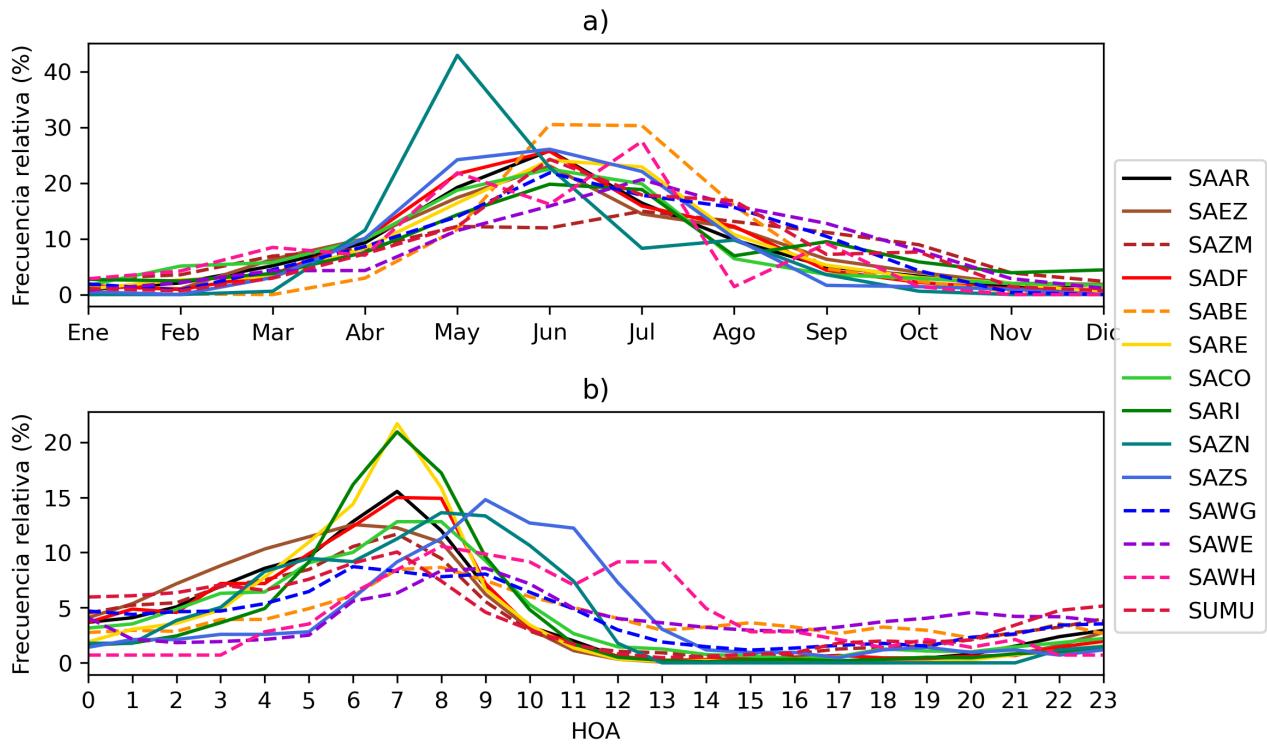


Figura 7: Ídem Fig. 6 pero para reportes con niebla.

SO, región continental con cuerpos de agua poco profundos. Comportamientos similares se encontraron en Aeroparque y Río Gallegos, aeropuertos que también se encuentran cerca de la costa. En el aeropuerto de Mar del Plata, a pesar de su localización a pocos kilómetros de la costa, se encontró que el viento que acompaña los reportes de visibilidad reducida por niebla y/o por neblina tiene un comportamiento más parecido al de Bariloche en cuanto al predominio de los vientos calmos, y nuevamente su patrón se asemeja más al de la niebla radiativa que a la niebla advectiva.

3.4. OPERACIONES CON SISTEMAS DE ATERRIZAJE POR INSTRUMENTOS

A la hora de mejorar la infraestructura de un aeropuerto, no siempre se cuenta con los recursos suficientes para optimizar todas las pistas en todas sus orientaciones, por lo cual en Argentina, los Sistemas de Aterrizaje por Instrumentos (ILS, por sus siglas en inglés) son

generalmente instalados en una sola cabecera de la pista (a excepción de aquellos que poseen CAT III). De acuerdo a la teoría de vuelo (ANAC, 2019c), las operaciones de despegue o aterrizaje con viento en contra favorecen la sustentación ya que aumenta la velocidad relativa de la aeronave respecto del viento y, de este modo, el avión consigue despegar o aterrizar en menor distancia. La Figura 8 indica la orientación de la pista y sus cabeceras en el aeropuerto de Bariloche y de Río Grande. Notar que los aviones pueden despegar o aterrizar en ambas direcciones dependiendo de las condiciones meteorológicas y técnicas en las que se encuentre el aeropuerto. El número que lleva la cabecera indica la orientación en la que se desplazan las aeronaves sobre dicha pista. Por ejemplo, en la rosa de la Figura 8f, el número 07 refiere a la orientación de la pista cuando el aterrizaje o despegue del avión comienza en el sector sudoeste.

En Bariloche, el ILS permite llevar a cabo operaciones de vuelo IFR con CAT I cuando se

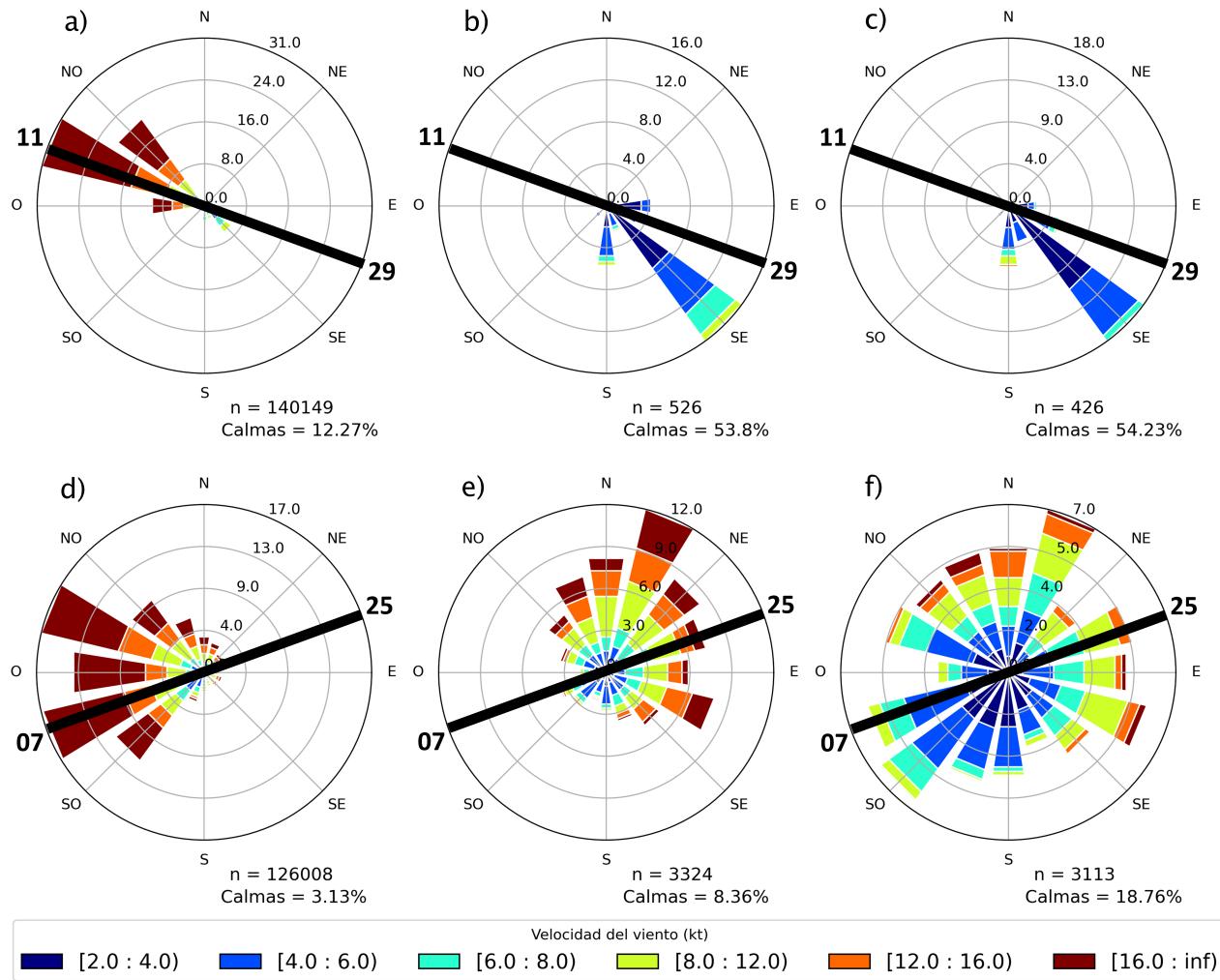


Figura 8: Rosa de los vientos (% , velocidad del viento en kt) para el período 2000-2019 en el aeropuerto de Bariloche (a,b,c) y Río Grande (d,e,f), considerando: todos los reportes (a,d), los reportes con niebla (b,e) y los reportes con niebla (c,f). Debajo de cada diagrama, se indica en texto el porcentaje de vientos calmos y la cantidad de reportes utilizados para cada gráfico (n). La línea negra sólida que atraviesa el diagrama corresponde a la orientación de la pista de aterrizaje del aeropuerto y sus correspondientes números de cabecera.

utiliza la cabecera 29 y se requiere de 800 m de visibilidad para poder aterrizar. La elección de esta orientación se encontraría beneficiada por la dirección climatológica de los vientos ya que predominan los vientos del ONO (Fig. 8), es decir, de frente al avión para los despegues. No obstante, el comportamiento del viento durante las horas de visibilidad reducida es contrario, con dirección dominante del ESE (Fig. 8), y esto podría derivar un cambio de cabecera, pasando a ser la 11 la utilizada para los aterrizajes.

Esta cabecera, al no contar con ILS, requiere de al menos 1800 m de visibilidad para que los aviones puedan aterrizar en esta orientación. Esto sugiere, que con respecto a las condiciones de falta de visibilidad debido a niebla, el ILS presente en la pista no sería de utilidad en ciertas circunstancias.

El caso del aeropuerto de Río Grande es análogo al de Bariloche, con ILS instalado para permitir operaciones instrumentales por la cabecera 25 de

forma solidaria a los vientos climatológicos. Por el contrario, en horas de visibilidad reducida, en este aeropuerto se encontraron vientos fuertes provenientes desde la dirección opuesta (entre N y E, Fig. 8e y f). Estos vientos sí podrían conducir a la necesidad de utilizar la cabecera 07 tanto para despegues como para aterrizajes y este cambio requeriría que la visibilidad reducida supere el valor de 2700 m sobre la pista.

3.5. SIMULTANEIDAD Y PROBLEMÁTICA OPERATIVA

Para los pronosticadores responsables de actividades aeronáuticas, el problema más grave respecto de la ocurrencia de visibilidad reducida recaería en la niebla persistente en el tiempo (días enteros) y en la niebla generalizada que afecta tanto al aeropuerto principal como también a todos los aeropuertos alternativos o cercanos (Yabra y otros, 2021a). En esta instancia, este trabajo se concentra en el segundo caso. En el plan operacional de vuelo y en el plan de vuelo ATS (Servicio de Tránsito Aéreo, por sus siglas en inglés) se seleccionan y especifican al menos dos aeródromos de alternativa de destino cuando las condiciones meteorológicas de visibilidad, a la hora prevista de su utilización, estarán por debajo de los valores mínimos de operación del aeropuerto (llamado “condiciones de bajo mínimos”) o no se dispone de información meteorológica en el aeródromo de destino (OACI, Anexo 6). Dichos planes son establecidos por cada aerolínea según los convenios acordados con los distintos aeropuertos. Por lo tanto, cada vuelo tiene predefinidos sus aeropuertos alternativos para el caso en que el aeropuerto de destino se encuentre cerrado o saturado.

La exploración de la simultaneidad de eventos de niebla o neblina en diferentes aeropuertos ofrece centenares de combinaciones posibles que podrían ser de sumo interés para casos particulares. El presente trabajo se concentra, dentro del conjunto de aeropuertos analizados, en aquellos con mayor cantidad de movimientos diarios y sus alternativos: Ezeiza, Aeroparque,

Montevideo y Córdoba. Considerando la mayor cantidad de movimientos anuales (ANAC, 2019b), la situación más problemática sería el cese de operaciones por condiciones de bajo mínimos en Aeroparque. Como la categoría de este aeropuerto con respecto al tamaño de aeronaves que puede recibir (ver Apéndice B) es la menor con respecto a los otros tres aeropuertos mencionados, los vuelos con este destino podrían operar en cualquiera de los restantes siempre que éstos no estuvieran también en condiciones de bajo mínimos. Notar que para este análisis no se consideran los mínimos meteorológicos de cada aeropuerto sino que sólo se considera la presencia de niebla (visibilidad menor a 1000 m por niebla o neblina) en cada uno. Las probabilidades de que esta última condición ocurra se detallan en la Tabla III. Por ejemplo, dadas las condiciones en las que Aeroparque se encuentra afectado por niebla, los aeropuertos que tienen mayor probabilidad de también estarlo son Ezeiza (caso 1) y Montevideo (caso 2), con valores alrededor de 45 % y 37%, respectivamente. La Tabla III también nos muestra casos en que se den tres y cuatro aeropuertos con niebla simultáneamente. Por ejemplo, la probabilidad de que haya niebla simultáneamente en Ezeiza y Montevideo dado que hay niebla en Aeroparque (caso 4, alrededor de 23 %) es mayor que la probabilidad de que haya niebla en el aeropuerto de Córdoba con la misma condición (caso 3, en torno al 6,7%).

Si se considera la mayor frecuencia de ocurrencia de niebla (Tabla II), la situación más problemática sería el cese de operaciones en Ezeiza. Como su categoría es la mayor (ver Apéndice B), no todos los vuelos van a poder ser desviados a los aeropuertos restantes, particularmente a Aeroparque. Por otro lado, la problemática en el aeropuerto de Ezeiza ocurre en condiciones extremas de baja visibilidad, ya que su mínimo es el menor de todos los aeropuertos (200 m), por lo tanto, si se trata de una niebla generalizada espacialmente, es probable que los aeropuertos cercanos (Aeroparque y Montevideo) también se encuentren bajo mínimos y, por ende,

Caso	SAEZ	SUMU	SACO	a. Probabilidad condicional	b. Probabilidad sin condicionar
1	X			38% (35% - 43%) (191/492)	1,90% (1,85% - 1,96%) (3185/167256)
2		X		35% (31% - 39%) (169/484)	1,57% (1,52% - 1,62%) (2609/166357)
3			X	5,1% (3,6% - 7,2%) (25/487)	0,55% (0,52% - 0,58%) (907/164986)
4	X	X		20% (16% - 23%) (94/474)	0,38% (0,36% - 0,41%) (618/162607)
5		X	X	1,5% (0,7% - 2,9%) (7/471)	0,036% (0,03% - 0,04%) (57/160429)
6	X		X	1,1% (0,4% - 2,3%) (5/477)	0,054% (0,05% - 0,07%) (88/161924)
7	X	X	X	0,43% (0,09% - 1,47%) (2/461)	0,01% (0,006% - 0,015%) (15/157565)

Tabla III: a) Probabilidad de que haya niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con una ‘x’ dada la condición de que hay niebla en Aeroparque y b) probabilidad de que haya niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con una ‘x’, en cada caso (casos 1-3 no incluyen simultaneidad con ningún otro aeropuerto). Entre paréntesis se muestra el intervalo de confianza al 90 % y la relación que condujo a la elaboración de las probabilidades: a) cantidad de reportes con niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con ‘x’ sobre, la cantidad de reportes con niebla en Aeroparque acotada a aquellas horas en que coincidentemente haya reportes en los aeropuertos marcados, b) cantidad de reportes con niebla simultáneamente en los aeropuertos marcados con ‘x’ sobre, la cantidad total de reportes simultáneos en dichos aeropuertos. Los intervalos de confianza se calcularon de acuerdo a la metodología mencionada en la Sección 2.3.

cerrado para todo tipo de operaciones. Las probabilidades de que otros aeropuertos se encuentren afectados por niebla dado que el aeropuerto de Ezeiza lo está se detallan en la Tabla IV, junto con las probabilidades absolutas de que dichos aeropuertos sean afectados por niebla. Se puede observar que los valores de las probabilidades condicionales son notablemente inferiores a los correspondientes a la condición de niebla en Aeroparque (Tabla III). Por ejemplo, la probabilidad de que haya niebla en el aeropuerto de Ezeiza dado que hay niebla en Aeroparque es 45% pero, por el contrario, la probabilidad de que haya niebla

en Aeroparque dado que hay niebla en el aeropuerto de Ezeiza es 8%. Si bien refieren a horas simultáneas de niebla (son 298 reportes en ambos casos), esta diferencia entre ambas probabilidades condicionales se relaciona con la diferencia en la probabilidad absoluta de ocurrencia, 6 veces más grande en Ezeiza respecto de Aeroparque. El aeropuerto que tiene mayor probabilidad de estar afectado por niebla dado que el aeropuerto de Ezeiza lo está, es el de Montevideo (alrededor del 22%) seguido de Aeroparque y Córdoba con menos de la mitad de probabilidades (8% y 3,7%, respectivamente). La ocurrencia de niebla en Ezeiza y Montevideo

resulta problemática, ya que en ocasiones no todas las aeronaves que allí operan pueden aterrizar en Aeroparque por el tamaño de las mismas o no pueden aterrizar en Córdoba por no tener convenio comercial.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo aborda la problemática de la visibilidad reducida por niebla en 13 aeropuertos argentinos y 1 uruguayo desde un punto de vista climatológico. Para llevarlo a cabo se analizaron 20 años (2000-2019) de reportes aeronáuticos horarios METAR, generados por la red de observaciones en superficie del SMN en el caso de Argentina y del INUMET en el caso de Uruguay, y almacenados en la base de datos ISD de la NOAA. Si bien se encontraron otras bases de datos que contenían esta información, se eligió dicha base ya que presentó el período más largo de reportes en el total de los aeropuertos seleccionados. La manipulación de este tipo de datos observacionales y su análisis junto con las normativas de la OACI, ANAC, el conocimiento de la lógica de los Planes de Labor de los observadores meteorológicos del SMN, junto a los usos y costumbres (desvíos establecidos a lo largo del tiempo de las sugerencias de OACI), permitió establecer una serie de consideraciones que deben tenerse en cuenta a la hora de analizar los resultados, ya que la lectura literal de éstos puede conducir a conclusiones erróneas. El criterio de selección de reportes METAR con nieblas y con neblinas permitió caracterizar la ocurrencia de estos fenómenos en los diferentes aeropuertos. Si bien en este trabajo sólo se consideró la visibilidad y tiempo presente en el desarrollo de dicho criterio, la cuantificación de la humedad será considerada para la selección de eventos de niebla/neblina en futuros estudios.

Primero, se estudió la influencia de la niebla dentro de otros fenómenos meteorológicos que pueden causar la reducción de visibilidad y, en efecto, se le atribuye la mayor cantidad de casos, seguido de la presencia de precipitación y de litometeoro. Dados los distintos entornos geográficos que presentan los aeropuertos

seleccionados, se estudió la cantidad de días por año con niebla y neblina, y la cantidad de horas por día con dichos fenómenos. Los resultados mostraron un amplio abanico de valores entre los distintos aeropuertos. Los aeropuertos de Mar del Plata, Ezeiza, Río Grande y Montevideo fueron los que presentaron mayor cantidad de días con niebla y neblina por año, mientras que Ushuaia, Bariloche y Neuquén fueron los que menos días presentaron. Respecto de la cantidad de horas promedio en cada uno de esos días, Ushuaia, Ezeiza, Río Grande y Mar del Plata arrojaron la mayor cantidad promedio de horas por día con niebla, y Rosario, Aeroparque, San Fernando y Montevideo también lo hicieron, pero en el caso de neblina. El análisis de la distribución anual y diaria de las frecuencias de ocurrencia mostró al menos dos patrones definidos. El primero, encontrado en los aeropuertos continentales como Ezeiza, Resistencia y Bariloche, concentra las máximas frecuencias en las horas cercanas al amanecer (entre 5 y 10 de la mañana) y en los meses más fríos (entre mayo y agosto). El segundo, encontrado en los aeropuertos cercanos a la costa Atlántica o del Río de la Plata como Aeroparque, Río Grande y Río Gallegos, no presenta un determinado rango horario predominante pero sí es más frecuente en los meses invernales. Aeropuertos como Mar del Plata o Montevideo aun siendo costeros, presentaron patrones de ocurrencia más similares al de los aeropuertos continentales, y Neuquén presentó una distribución anual con un inusual máximo en mayo que sólo fue encontrado en menor medida en Bariloche.

Este trabajo se propuso enfocar el estudio climatológico de la niebla y neblina a las necesidades que requieren las operaciones aeronáuticas. En este sentido, se realizaron distintos análisis que relacionan los factores meteorológicos con la infraestructura de los aeropuertos. Por un lado, se estudió el comportamiento del viento que acompaña a la visibilidad reducida por estos fenómenos y se los comparó con el viento climatológico. En

Caso	SABE	SUMU	SACO	a. Probabilidad condicional	b. Probabilidad sin condicionar
1	X			6,3% (5,6% - 7,1%) (191/3022)	0,31% (0,29% - 0,34%) (502/160613)
2		X		20% (19% - 21%) (618/3078)	1,57% (1,52% - 2,62%) (3240/166357)
3			X	2,8% (2,3% - 3,4%) (88/3115)	0,55% (0,52% - 0,58%) (907/164986)
4	X	X		3,2% (2,7% - 3,8%) (94/2925)	0,11% (0,09% - 0,12%) (169/156306)
5		X	X	0,5% (0,3% - 0,8%) (15/3014)	0,036% (0,03% - 0,04%) (57/160429)
6	X		X	0,17% (0,07% - 0,37%) (5/2969)	0,016% (0,01% - 0,02%) (25/156426)
7	X	X	X	0,07% (0,01% - 0,24%) (2/2875)	0,004% (0,002% - 0,009%) (7/152338)

Tabla IV: Ídem Tabla III pero dada la condición de que haya niebla en el aeropuerto de Ezeiza.

aeropuertos como Bariloche, Río Gallegos y Río Grande, la dirección del viento durante la reducción de visibilidad es distinta, y hasta opuesta a la climatológica. Por otro lado, se relacionaron las posiciones de los ILS, que permiten el aterrizaje de aeronaves en condiciones de baja visibilidad, junto con las componentes de viento en cada caso y se encontró que estos instrumentos se encuentran instalados en las cabeceras de las pistas más utilizadas considerando los vientos climatológicos. El viento presente en las horas de visibilidad reducida, principalmente en el aeropuerto de Río Grande, indicaría utilizar la cabecera opuesta para los aterrizajes, la cual no cuenta con instrumental y requiere de mayor visibilidad para poder efectuarlo.

Por último, se trabajó con otra de las grandes problemáticas que tiene la meteorología aeronáutica, mayormente vinculada al pronóstico y la elaboración de planes de vuelo, que es la reducción de visibilidad de

forma simultánea en aeropuertos cercanos o alternativos entre sí. Para el análisis se seleccionaron los aeropuertos con mayores movimientos y sus destinos alternativos: Aeroparque, Ezeiza, Montevideo y Córdoba. El aeropuerto con más probabilidades de estar afectado por niebla cuando Aeroparque lo está es Ezeiza, mientras que el aeropuerto con más probabilidades de estar afectado por niebla cuando Ezeiza lo está es Montevideo. La inclusión de Córdoba disminuye las probabilidades de ocurrencia simultánea de niebla respecto de los restantes aeropuertos, convirtiendo a este aeropuerto en un destino alternativo factible en este aspecto. Estos resultados ilustran la complejidad a la hora de determinar qué aeropuertos pueden ser los destinos alternativos de cada vuelo, en caso de que a la hora del aterrizaje dicho aeropuerto se encuentre en condiciones de bajo mínimos meteorológicos.

Este trabajo contribuye a una temática de

fundamental importancia para las tareas operativas de los aeropuertos y además constituye información básica para futuros desarrollos claves para la industria. Un detallado conocimiento del fenómeno conducirá eventualmente a mejoras en las técnicas de pronóstico y vigilancia aeronáutica, y por esta razón es necesario continuar con el estudio de los mecanismos que intervienen en la formación, evolución y disipación de las nieblas en Argentina.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los expertos en la temática, observadores y pronosticadores meteorológicos aeronáuticos del SMN y de Aerolíneas Argentinas, por los aportes de sus conocimientos adquiridos en experiencia de la práctica operativa. Este trabajo fue realizado en el marco de una Tesis Doctoral en Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, con sede en el SMN, y financiada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Nación Argentina.

ANEXOS

ANEXO A – CODIFICACIÓN DE REPORTES METAR

Como ejemplo, en la Tabla V se puede ver la decodificación para el siguiente reporte con visibilidad reducida por niebla, correspondiente al lunes 10 de mayo del 2021 a las 09:00 UTC en el aeropuerto de Ezeiza: METAR SAEZ 100900Z 24003KT 1200 R11/1300N BR SCT001 BKN200 08/08 Q1021

ANEXO B – INFRAESTRUCTURA DE LOS AEROPUERTOS

Cuando se trata de operatoria, la comparación entre distintos aeropuertos debe incluir otros

aspectos que aumentan la complejidad. Es importante mencionar que, no todos los aeropuertos cuentan con la infraestructura necesaria para la operatoria de todo tipo de aeronaves. Por eso, en el Anexo 14 (OACI, 2018) se dispone otra categorización (Clave de Referencia) de los aeropuertos de acuerdo a la longitud del campo de referencia del avión (número del 1 al 4) y a la envergadura del avión (longitud entre los extremos de las alas) o en la anchura exterior entre las ruedas del tren de aterrizaje principal (lo que dé el mayor valor crítico, letra de la A a la F). Por campo de referencia del avión se refiere a longitud de campo mínima necesaria para el despegue del avión con la masa máxima certificada para esta operación al nivel del mar, en atmósfera tipo, sin viento y con pendiente de pista cero. El propósito de la clave de referencia es proporcionar un método simple para relacionar entre sí las numerosas especificaciones concernientes a las características de los aeropuertos, a fin de suministrar una serie de instalaciones aeroportuarias que convengan a los aviones destinados a operar en ellos. La letra o número de la clave está relacionado con el mayor campo de referencia y la mayor envergadura que puede tener una aeronave para que pueda operar con dicha infraestructura aeroportuaria.

En la Sección 2 también se describe otra categorización de los aeropuertos respecto de la mayor categoría de vuelos que pueden llegar a operar haciendo referencia al instrumental y la infraestructura disponibles para el despegue, aterrizaje y traslados sobre las pistas en condiciones adversas de visibilidad (diferentes umbrales de visibilidad mínima). La Tabla VI muestra las categorías (<https://www.aa2000.com.ar/> accedido el 10/12/21) y los umbrales de visibilidad mínima de cada cabecera (<http://ais.anac.gov.ar/aip> accedido el 30/10/21) de los aeropuertos seleccionados para el análisis realizado en las Secciones 3.4 y 3.5.

REFERENCIAS

Afonso, J. M. S., Levit, V., Fedorova, N.,

Grupo dentro del mensaje	Indicación	Significado
METAR	Tipo de reporte	METAR
SAEZ	Estación meteorológica aeronáutica	Aeropuerto de Ezeiza
100900Z	Día, hora y minutos	Día 10 a las 9:00 UTC
24003KT	Dirección y velocidad del viento	240° (OSO) a 3 kt
1200	Visibilidad	1200 m
R11/1300N	Cabecera y alcance visual en pista (RVR)	En la cabecera de la pista 11 hay 1300 m
BR	Tiempo presente	Neblina
SCT001 BKN200	Nubosidad	3-4 octavos a 100 pies; 5-7 octavos a 20.000 pies (sobre el nivel de la estación)
08/08	Temperatura del aire y del punto de rocío	8°C y 8°C
Q1021	Presión al nivel del mar	1021 hPa

Tabla V: Ejemplo de decodificación de un reporte METAR.

Aeropuerto	Categoría	Pista	Visibilidad mínima
Aeroparque - SABE	CAT II 4C	13	750 m (RVR 750 m)
		31	2600 m
Ezeiza - SAEZ	CAT III A 4E	11	200 m (RVR 200 m)
		29	1400 m
		35	800 m
		17	2300 m
Córdoba - SACO	CAT III A 4E	01	3100 m
		05	1500 m
		19	550 m (RVR 550 m)
		23	1700 m
Montevideo - SUMU	CAT I 4E	01	1200 m
		24	800 m
		19	800 m (RVR 550 m)
		06	1600 m
Bariloche - SAZS	CAT I 4E	29	800 m (RVR 550 m)
		11	1899 m
Río Grande - SAWE	CAT I 4C	26	1200 m
		08	1500 m

Tabla VI: Detalle de los aeropuertos seleccionados (Anexo B).

- 2019: Estudo de baixa visibilidade no aeroporto de Porto Alegre: processos sinóticos e termodinâmicos. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.6, p.131-145, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0012>
- ANAC, 2016: Regulaciones argentinas de aviación civil (RAAC), parte 91: Reglas de vuelo y operación general. 4ta edición. Fecha de efectividad de la presente: 16 de DICIEMBRE del 2016 http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/raac/raac_vigentes/por_parte/parte-91-r-1131-16.pdf
- ANAC, 2019a: Publicación de Información Aeronáutica (AIP). Gen 4-Categorías de actuación operacional en aproximaciones de precisión. Fecha de efectividad de la presente: 18 de JULIO de 2019. <https://ais.anac.gob.ar/descarga/aip-5ce6f78a42c55>
- ANAC, 2019b: Anuario estadístico 2019. <https:////datos.anac.gob.ar/estadisticas/article/055dd8be-984f-4c3cb2ae-ce5037902295>
- ANAC, 2019c: Manual de piloto privado de avión. <http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/aviaciongeneral/2019/manual-del-piloto-privado-de-avi-n-2019-digital.pdf>
- ANAC, 2022: Publicación de Información Aeronáutica (AIP). Gen 3.5-Servicios Meteorológicos
- Byers, H. R., 1960: General Meteorology. New York (McGraw-Hill), 3rd Edition, 1959. Pp. x. 540; 223 Figs.; 10 Tables. 74s. Q.J.R. Meteorol. Soc., 86: 123-123. <https://doi.org/10.1002/qj.49708636716>
- Carrera, M. L., J. R. Gyakum, y C. A. Lin, 2009: Observational study of wind channeling within the St. Lawrence River valley. J. Appl. Meteor. Climatol., 48, 2341–2361.
- Cook, L., B. Wood, A. Klein, R. Lee, and B. Memarzadeh, 2009: Analyzing the share of individual weather factors affecting NAS performance using the weather impacted traffic index. In AIAA 2009-7017. 9th AIAA aviation technology, integration, and operations conference (ATIO), Hilton Head, SC, September 2009. <https://doi.org/10.2514/6.2009-7017>
- Decreto 1689, 2016: Dispónese la transferencia del Servicio Meteorológico Nacional, al ámbito de la Secretaría de Planeamiento del Ministerio de Defensa, a partir del 1º de enero de 2007. Presidencia de la Nación Argentina. Firmado el 22/11/2006. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/122437/norma.htm>
- Dines, W. H., 1917: Meteorology and aviation. Monthly Weather Review, 45, 401. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1917\)45%3c401b:MAA%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1917)45%3c401b:MAA%3e2.0.CO;2)
- Fedorova, N., Levit, V., Silva A.O., Santos D.M.B., 2013: Low Visibility Formation and Forecasting on the Northern Coast of Brazil. Pure and Applied Geophysics, 170(4), 689–709.
- González-Viveros P., Caetano E., García-García F., 2018: Characterization and modeling of fog in the Mexico basin. AEROSOL AIR QUAL RES 18 79-90.
- Gultepe, I., G. Pearson, J.A. Milbrandt, B. Hansen, S. Platnick and P. Taylor, 2009: The fog remote sensing and modeling (FRAM) field project. Bulletin of American Meteorological Society, 90, 341–359. DOI: [10.1175/2008BAMS2354.1](https://doi.org/10.1175/2008BAMS2354.1)
- Gultepe, I., G. A. Isaac, P. Joe, P. Kucera, J. Thériault and T. Fisico, 2014a: Roundhouse (RND) mountain top research site: Measurements and uncertainties for winter alpine weather conditions. Journal of Pure and Applied Geophysics. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0582-5>
- Gultepe, I., T. Kuhn, M. Pavolonis, C. Calvert, J. Gurka, and G.A. Isaac, 2014b: Ice fog in Arctic during FRAMIF project: Aviation and nowcasting applications. Bulletin of American Meterorological Society, 95, 211–226. DOI: [10.1175/BAMS-D-11-00071.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00071.1)
- Gultepe, I., A. J. Heymsfield, P.R. Field and D. Axisa, 2017: Ice-phase precipitation. Meteorological Monographs, 58, 6.1–6.36. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPH-D-16-0013.1>
- Hodges, D., and Z. Pu, 2015: The climatology, frequency, and distribution of cold season fog

- events in northern Utah. Pure and Applied Geophysics, 173, 3197–3211. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1187-6>
- Haeffelin, M., T. Bergot, T. Elias, R. Tardif, D. Carrer, P. Chazette, M. Colomb, P. Drobinski, E. Dupont, J. Dupont, L. Gomes, L. Musson-Genon, C. Pietras, A. Plana-Fattori, A. Protat, J. Rangognio, J. Raut, S. Rémy, D. Richard, J. Sciare, and X. Zhang, 2010: Paris Fog. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91, 767–783, <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2671.1>
- Kulkarni, R., Jenamani, R. K., Pithani, P., Konwar, M., Nigam, N., Ghude, S. D., 2019: Loss to Aviation Economy Due to Winter Fog in New Delhi during the Winter of 2011-2016. Atmosphere, vol. 10, issue 4, p. 19.
- Isaac, G. A., Bullock, T., Beale, J., Beale, S., 2020: Characterizing and Predicting Marine Fog Offshore Newfoundland and Labrador, Weather and Forecasting, 35(2), 347-365. Retrieved Jun 2, 2022. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0085.1>
- Lapido, B., 2019: Estudio preliminar de niebla en el aeropuerto de la ciudad de Rosario. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Milke J. A., 2000: Evaluating the smoke hazard from fires in large spaces. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Volume 2, Number 3, págs.94-103.
- Nabavi, S. O., 2016: Global Assessment of Sand and Dust Storms (Dust Storms in the West Asia Region). 8. Appendix: Case Studies
- OACI, 2004: European guidance material on integrity demonstration in support of certification of ILS and MLS systems. 1st edition.
- OACI, 2010: Catálogo de datos OPMET disponibles en el Banco Internacional de datos OPMET de Brasilia. 4ta edición.
- OACI, 2016a: Anexo 3: Servicio Meteorológico para la navegación aérea internacional. 20a edición.
- OACI, 2016b: Anexo 6: Operación de Aeronaves. Parte II: Aviación general internacional - Aviones. 9na edición.
- OACI, 2018: Anexo 14: Aeródromos. Vol I: Diseño y operaciones de aeródromos. 8va edición.
- OMM, 1966: Reglamento Técnico N° 49. Anexo I: Atlas Internacional de Nubes (N° 407), Manual de observación de nubes y otros meteoros.
- OMM, 2008: Guía de instrumentos meteorológicos y métodos de observación..
- OMM, 2014: Guía de sistemas meteorológicos de observación y distribución de información para los servicios meteorológicos aeronáuticos.
- OMM, 2015: Manual del Sistema Mundial de Telecomunicación. Anexo III al Reglamento Técnico de la OMM. Actualización de 2020.
- OGIMET, 2021: Información profesional de las condiciones meteorológicas en todo el mundo. <https://www.ogimet.com/>, accedido el 30 octubre 2021.
- Piccolo, M. C., 1983: Resultados preliminares de un estudio de niebla en Río Grande. Meteorológica. Vol. XIV. N° 1 y 2. Págs. 213 a 224.
- Pilie, R.J., E.J. Mack, W.C. Kocmond, C.W. Rogers and W.J. Eadie, 1975: The life cycle of valley fog. Part I: Micrometeorological characteristics, J. Appl. Meteor. 14, 347–363. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014\(0347:TLCOVF\)2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014(0347:TLCOVF)2.0.CO;2)
- Quinteros de Menzies, C. Y., Obertello, I., 1972: Pronóstico objetivo de niebla en Ezeiza. Publicación de la Fuerza Aérea Argentina, Comando de regiones aéreas, Servicio Meteorológico Nacional, Serie C, 12, 32 páginas.
- Roach, W.T., 1995: Back to basics: Fog: Part 3 - The formation and dissipation of sea fog. Weather, 50, 80-84.
- Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E. Chapin, J. Martin, W. Daffer and S. Hensley, 2005: An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639. Rolph G., Stein A., Stunder B., 2017: Realtime Environmental Applications and Display sYstem: READY,

- Environmental Modelling Software, Volume 95, 2017, Pages 210-228, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>.
- Rudra, R., W.T. Dickinson, S. I. Ahmed, P. Patel, J. Zhou, and B. Gharabaghi, 2015: Changes in rainfall extremes in Ontario. International Journal of Environment Research, 9(4), 1117–1372.
- Ruiz, J., T. Schonholz y C. Saulo, 2018: Generación de pronósticos probabilísticos de visibilidad a partir de pronósticos numéricos retrospectivos y observaciones. Meteorologica Vol 43 N°1 (2018), 73-96. http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2018/07/Ruiz_y-otros_Vol43N1.pdf
- Schonholz, T., 2014: Desarrollo de una técnica objetiva para la generación de pronósticos probabilísticos de umbrales de visibilidad empleando pronósticos retrospectivos en la estación Ezeiza. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Smith, A., N. Lott, y R. Vose, 2011: The Integrated Surface Database: Recent Developments and Partnerships. Bulletin of the American Meteorological Society, 92, 704–708, doi:10.1175/2011BAMS3015.1
- Stolaki, S.N., Kazadzis, A.S., Foris, D.V., Karacostas, T.S., 2009: Fog characteristics at the airport of Thessaloniki, Greece, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 1541-1549
- Tardif, R., 2017: Precipitation and Fog. Book chapter in Koracin, D., and C. E. Dorman, eds. Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations and Forecasting. Springer Publ.
- Tardif, R., and R. M. Rasmussen, 2007: Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. Journal of Applied Meteorology Climatology, 46, 1141–1168. <https://doi.org/10.1175/JAM2516.1>
- Tardif, R., and Rasmussen, R. M., 2008: Process-oriented analysis of environmental conditions associated with precipitation fog events in the New York City region. Journal Of Applied Meteorology And Climatology, 47, 1681-1703. doi:10.1175/2007JAMC1734.1
- Teixeira, J. and Miranda, P. M. A., 2001: Fog prediction at Lisbon Airport using a one-dimensional boundary layer model. Meteorol. Appl. 8, 497–505.
- Todey, D.P., D.E. Herzmann, and G.S. Takle, 2002: The Iowa Environmental Mesonet – combining networks into a single network. Preprints 6th Symposium on Integrated Observing Systems, Orlando, FL, Amer. Meteor.Soc.
- Tuncay Özdemir, E., Deniz, A., Sezen, İ., Menteş, S. S., Yavuz, V., 2016: Fog analysis at Istanbul Ataturk International Airport. Weather, 71(11), 279–284. doi:10.1002/wea.2747
- Vasques Ferro, R. y C. Ribero, 2015: Formación de niebla en Aeroparque Jorge Newbery. XII CONGREMET, Mar del Plata, Argentina.
- Wallis S., 2013: Binomial Confidence Intervals and Contingency Tests: Mathematical Fundamentals and the Evaluation of Alternative Methods, Journal of Quantitative Linguistics, 20:3, 178-208, DOI: 10.1080/09296174.2013.799918
- White, W.H. and P.T. Roberts, 1967: On the nature and origins of visibility-reducing aerosols in the Los Angeles air basin. Atmospheric Environment, 11(9), 0–812. doi:10.1016/0004-6981(77)90042-7
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, R. Vasques Ferro, C. Ribero, L. Chiaparri, E. Fernández, C. Campetella, O. Bonfili, M. Ceballos, G. Barrera, N. Troche, V. López, M. Schizzano, N. Bentancor, L. Berengua, M. Steven, 2021a: Las nieblas en los aeropuertos argentinos: revisión de literatura y perspectiva de los pronosticadores. Nota Técnica SMN 2021-89. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1540>
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, 2021b: Estudio climatológico de visibilidad reducida por niebla y neblina en aeropuertos argentinos. Nota Técnica SMN 2021-106. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1698>
- Yabra, M. S., R. de Elia, L. Vidal, M. Nicolini, 2021c: Características climatológicas de

las niebla en aeropuertos argentinos.
XIX Reunión Científica de la Asociación
Argentina De Geofísicos Y Geodestas, Agosto
2021, Ciudad de Mendoza, Argentina.

Zhang, J., P. Zhao, X. Wang, J. Zhang, J.
Liu, B. Li, Y. Zhou, H. Wang, 2020: Main
Factors Influencing Winter Visibility at the
Xinjin Flight College of the Civil Aviation
Flight University of China, Advances in
Meteorology, vol. 2020, Article ID 8899750,
13 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8899750>