



AUTOR ANDRÉS RIVERA

ESTACION CONTINUA GNSS REFUGIO GREVER (ECRG)
CAMPO DE HIELO SUR
Latitud: 48° 50' 01.8"
Longitud: 73° 34' 54.0"

GEOACTA

Publicación de la Asociación Argentina
de Geofísicos y Geodestas



Buenos Aires, Argentina
www.aagg.org.ar



Asociación Argentina
De
Geofísicos y Geodestas

GEOACTA

Publicación de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas



ISSN en línea 1852-7744

VOLUMEN 43(1)- 2018

Trabajos de Investigación

VARIABILIDAD ANUAL DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL ARGENTINA NORTE

Moira Luz Clara, Claudia G. Simionato, Andrés J. Jaureguizar

1

IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS PARA DETECTAR VARIACIONES BRUSCAS EN SERIES DE TIEMPO GNSS

Micaela Alejandra Carbonetti, Mauricio Alfredo Gende

17

MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES PARA LA SUBREGIÓN A1 DEL PLAN MAESTRO DEL RIO SALADO Y PARA LA CIUDAD DE JUNIN

María Eugenia Gomez, Raul Perdomo, Lautaro Simontacchi, Santiago Perdomo, María Florencia Tavarone, Daniel Del Cogliano, Martín Vazquez, Nicolás Tessone

32

ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE SERIES TEMPORALES DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA CHONE, ECUADOR

María Fernanda Ayala, Alfonso Tierra, David Carrera-Villacrés

52

NUEVOS HORIZONTES PARA EL ABORDAJE DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES A PARTIR DE LA EVALUACIÓN MULTIAMENAZAS

William Edison Valenzuela Valenzuela

69

I CONCURSO FOTOGRÁFICO CIENTÍFICO AAGG2021

Autor: TOMÁS BARRIENTOS

Título: Amanecer con desfile de nubes en niveles altos de la atmósfera

86

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOFISICOS Y GEODESTAS

Avenida Cabildo 381 (CP 1426). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina

<http://www.aagg.org.ar>

VARIABILIDAD ANUAL DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA PLATAFORMA CONTINENTAL ARGENTINA NORTE

ANNUAL VARIABILITY OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE NORTHERN ARGENTINEAN CONTINENTAL SHELF

Moira Luz Clara^{1,2,3}, Claudia G. Simionato^{3,4}, Andrés J. Jaureguizar^{5,6,7}

- 1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Moreno 3527 piso 3, B7600GIA, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- 2 Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Paseo Victoria Ocampo N° 1, Escollera Norte, B7602HSA, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- 3 Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI-IFAECI/CNRS), Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, Pabellón II, piso 2, C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- 4 Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEN-UBA) and Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA), Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, Pabellón 10 y 11, CP1900, La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- 5 Instituto Argentino de Oceanografía, CC 804, Florida 8000 (Camino La Carrindanga km 7,5), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
- 6 Instituto Argentino de Oceanografía, CC 804, Florida 8000 (Camino La Carrindanga km 7,5), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
- 7 Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO)-subsede Coronel Pringles, Sáenz Peña 867, Coronel Pringles CP 7530, Buenos Aires, Argentina

ABSTRACT

Twelve years of daily satellite data (0.1° spatial resolution) were used to study the seasonal variability of the sea surface temperature (SST) over the Northern Argentinean Continental Shelf (NACS; between 33° - 45° S and 52° - 66° W). The seasonal cycle, which includes the annual and semi-annual signals, was assessed using harmonic analysis. The annual cycle explained more than 90% of the total variance in the NACS, with SST amplitudes varying from 3.4 to 7.6° C. Largest variances values for this timescale were observed along the Argentinean coast and the inner shelf; particularly in the El Rincón region (exceeding 96%). Empirical Orthogonal Function Analysis (EOF) in S-Mode was applied to daily SST anomalies in the annual timescale, indicating that nearly 94% of its variance was explained by the first two modes, which accounted for 70 and 24% of the variance, respectively. Mode 1 prevailed most of the year with its positive phase occurring in autumn/winter and the negative in spring/summer. This mode revealed the seasonal radiative warming/cooling, related to the heating/cooling in summer/winter in most of the NACS; the shallow waters of the Río de la Plata and El Rincón were heated and cooled more and faster than deeper waters. The weakest seasonal heating/cooling occurred around Península Valdés, where vertical mixing maximizes due to tidal action. Mode 2 corresponded to early spring and early fall in their positive and negative phases, respectively. This mode was related to a transition during the early intermediate seasons when the cooling/heating of an extended coastal region connecting Península Valdés and the Río de la Plata occur.

Keywords: SST seasonal cycle, EOF analysis, water regime areas, Southwestern Atlantic Ocean.

RESUMEN

La variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar (TSM) en la Plataforma Continental Argentina Norte (PCAN, entre 33°- 45° S y 52°- 66° O) fue estudiada a partir de doce años de datos satelitales de resolución diaria y 0,1° de resolución espacial. El ciclo estacional, que incluye las señales anuales y semianuales, fue evaluado mediante análisis armónico. El ciclo anual explicó más del 90% de la varianza total en la PCAN, con amplitudes de TSM que variaron entre 3,4 y 7,6 °C. Los mayores valores de varianza para esta escala temporal se observaron a lo largo de la costa argentina y la plataforma continental interna, particularmente en la región de El Rincón (excediendo el 96%). Un análisis de funciones ortogonales empíricas (EOFs) en modo-S aplicado a las anomalías diarias de TSM en la escala anual indicó que casi el 94% de la varianza fue explicada por los primeros dos modos, que representaron el 70 y el 24% de la varianza, respectivamente. El Modo 1 prevaleció la mayor parte del año con su fase positiva en otoño/invierno y la negativa en primavera/verano. Este modo reveló el calentamiento/enfriamiento radiativo estacional, relacionado con el aumento/disminución de las temperaturas en verano/invierno en gran parte de la PCAN; las aguas poco profundas del Río de la Plata y El Rincón se calientan/enfrían más y más rápido que las aguas más profundas. El calentamiento/enfriamiento estacional más débil se produjo alrededor de Península Valdés, donde la mezcla vertical por acción de las mareas es intensa. El Modo 2 corresponde a principios de primavera y principios de otoño en sus fases positiva y negativa, respectivamente. Este modo se encontró relacionado con una transición durante el inicio de las temporadas intermedias, cuando se produce el enfriamiento/calentamiento de una larga región costera que conecta Península Valdés y el Río de la Plata.

Palabras Clave: Ciclo estacional de la temperatura superficial del mar, análisis EOF, zonas de regímenes de agua, Océano Atlántico Sudoccidental.

INTRODUCTION

The ocean has influence on a range of processes, from daily weather events to global climate variability. One accessible indicator of the ocean's state and potential influence is the sea surface temperature (SST). SST is important in climatic studies and air-sea interaction processes. The knowledge of SST variability is essential to study not only the global climate changes on inter-annual and decadal timescales (e.g., El Niño and La Niña events) but also the shorter timescale oceanic processes, such as frontal dynamics, upwelling and downwelling events, and eddy and plume evolution (Wang et al., 2004), as well as in biological applications. In general, SST variability is dominated by the annual cycle in most of the global ocean. This cycle is a pattern that nearly repeats itself every 12 months and can mask low-frequency climatic trends, which include the monthly means and the quarterly cycle. The knowledge of the SST cycles leads to a better understanding of the timing of biological events, since SST is a good indicator for the water column stratification in the Southwestern Atlantic Ocean (SWAO) (Podestá et al., 1991).

The dominant SST annual cycle forcing is the change of the distribution of incoming solar radiation along the year due to the orbit of the Earth around the Sun and the tilt of the Earth axis rotation. The exchange of energy between the sea surface and the atmosphere is one of the energy sources for the atmospheric circulation. Trenberth and Stepaniak (2004) provide a quantification of the seasonal uptake and release of heat by the oceans that substantially moderate the climate in maritime regions. These authors affirm that the solar radiation is absorbed and stored within the ocean, so that maximum SSTs tend to occur at the end of the summer in the extra tropics. Kara et al. (2009), based in atmospherically forced ocean general circulation model simulations, under the assumption that variations in the climatologic monthly SSTs are driven by atmospheric variables, demonstrate that shortwave radiation is the most influential variable controlling the seasonal cycle of SST over 34.3% of the global ocean whereas wind speed is the second most important variable (27.2%).

In this work the seasonal cycle over the Northern Argentinean Continental Shelf (NACS, between 33°- 45° S and 52°- 66° W) was studied utilizing almost 12 years of satellite data. This cycle was defined as the expected evolution of the climatic variable through the year (Yashayaev and Zveryaev, 2001). This approach involves the parametric description of the seasonal cycle, which is defined by a small number of parameters: harmonic coefficients,

annual and semi-annual amplitudes and phases, etc. Thus, the annual and semi-annual harmonics form the dominant part of the seasonal cycle. This method allows the determination of the appropriate climatic value for any moment of a year and avoids the misinterpretation of natural seasons because of the wrong setting of fixed calendar months. Thereby, the production of the winter and summer fields is based on the actual extremes, as defined from the phase analysis. The parametric description of the seasonal cycle is more accurate than the use of monthly means because it considers a potential irregular distribution of observations throughout the year. The distribution of amplitudes and phases helps to disclose the origin of the seasonal cycle in different areas and to reveal the mechanisms responsible for the modification of its structure. The characteristics of the seasonal cycle can also be used to initialize oceanic and atmospheric models and may serve as a reference for validation of model simulations (e.g., Giese and Carton, 1994) providing a firm criterion of model viability.

The annual pattern of SST variability in different portions of the SWAO Continental Shelf (Fig. 1) has been studied by other authors using diverse approaches and data. These previous studies, that use satellite images for different periods of time with different temporal and spatial resolutions (daily, 1984-1988 and 100 km (Podestá et al., 1991); weekly, 1982-1994 and 4 km (Lentini et al., 2000); monthly, 1985-2002 and 9 km (Rivas, 2010); daily, 2002-2008 and 11 km (Simionato et al., 2010); monthly, 2002-2011 and 1 km (Delgado et al., 2014)) and different spatial coverage (SWAO, NACS, Río de la Plata and El Rincón scales) indicate that, in general, SST in the NACS shows a marked seasonal cycle, with amplitudes decreasing offshore and southward, and with higher values in the shallow areas of the upper and intermediate Río de la Plata estuary and very coastal areas of El Rincón.

Thus, several regions of the Argentinean shelf were described regarding of the extent of the SST. However, a study showing how the SST at the different oceanographic areas (or systems) of the NACS respond both spatially and temporally on annual timescales as a whole and eventually co-vary is still missing. Therefore, this investigation aims to determine the SST spatial differentiation over the whole NACS concerning the seasonal cycle and try to reveal the forcing mechanisms of its spatial structure besides complementing and updating the knowledge of the SST at the spatial scale.

Study Area

The NACS (Fig.1) is located in the South Atlantic Ocean between 33°- 45° S and 52°- 66° W. This shelf comprises a variety of water masses mostly dominated by three large basins (San Matías Gulf, Río de la Plata and El Rincón) and influenced by Brazil and Malvinas marine currents (Guerrero and Piola, 1997). The Río de la Plata is one of the largest estuaries of the world (Shiklomanov, 1998), ranking fourth and fifth worldwide in freshwater discharge and drainage area, respectively (Framiñan et al., 1999). The San Matías Gulf (SMG) is a semi-enclosed basin and a very deep area on the NACS (Fig. 1). Bathymetry and local thermohaline characteristics force a semi-permanent gyre within the Gulf (Piola and Scasso, 1988). Shelf waters enter through the southeastern section of the mouth and are eventually exported through the northern section of the mouth (Piola and Scasso, 1988). Scasso and Piola (1988) present SMG as a warm and saline anomaly throughout the year, showing that it has a salinity maximum relative to the open shelf waters due to an excess of evaporation over precipitation of around $100 \text{ cm}\cdot\text{yr}^{-1}$, which is favored by the relatively higher sea surface temperatures found within the gulf.

The main oceanographic systems present in the NACS exhibit important differences in their spatial cover scale, magnitude forcing (river freshwater flow, tides, shelf currents, topography) and exhibit strong seasonal variations in its extension related to wind variability (Delgado et al., 2014; Lucas et al., 2005; Meccia et al., 2009; Palma et al., 2004a; Rivas, 2010; Simionato et al., 2001). During autumn and winter, the prevailing winds blow from the southwest, so that the waters of the Río de la Plata (RDP) and the SMG tend to discharge northeastward, and the El Rincón (ER) system extends its coverage along the coast. In spring and summer, the prevailing winds in the northern shelf blow from the northeast (Simionato et al., 2005). The drainage waters of RDP during these seasons are lower than in winter, with a dominant path to the south and towards the continental slope. The signal of SMG waters, also weaker, mainly extends eastward accompanying an increase in the Río Negro runoff. There are at least two sources of energy available in abundance in the area that may be important in maintaining the circulation in SMG and its vicinity: the wind intensity, that does not present significant seasonal variations and, therefore, neither would the associated circulation, and the tides, which occur at times of

the year in which there is a well-developed thermocline (Piola and Scasso, 1988). The SMG region is characterized by large tidal amplitudes (Glorioso and Flather, 1997; Palma et al., 2004b; Moreira et al., 2011), intense westerly winds, particularly in winter (Palma et al., 2004a), and significant surface heat and freshwater fluxes (Scasso and Piola, 1988; Rivas and Beier, 1990). In particular, the Península Valdés frontal system (PVF) is one of the best-known tidal fronts in the NACS, located south of the SMG entrance (Carreto et al., 1986; Glorioso, 1987; Bava et al., 2002; Glorioso, 1987; Bianchi et al., 2005, 2009; Derisio et al., 2014).

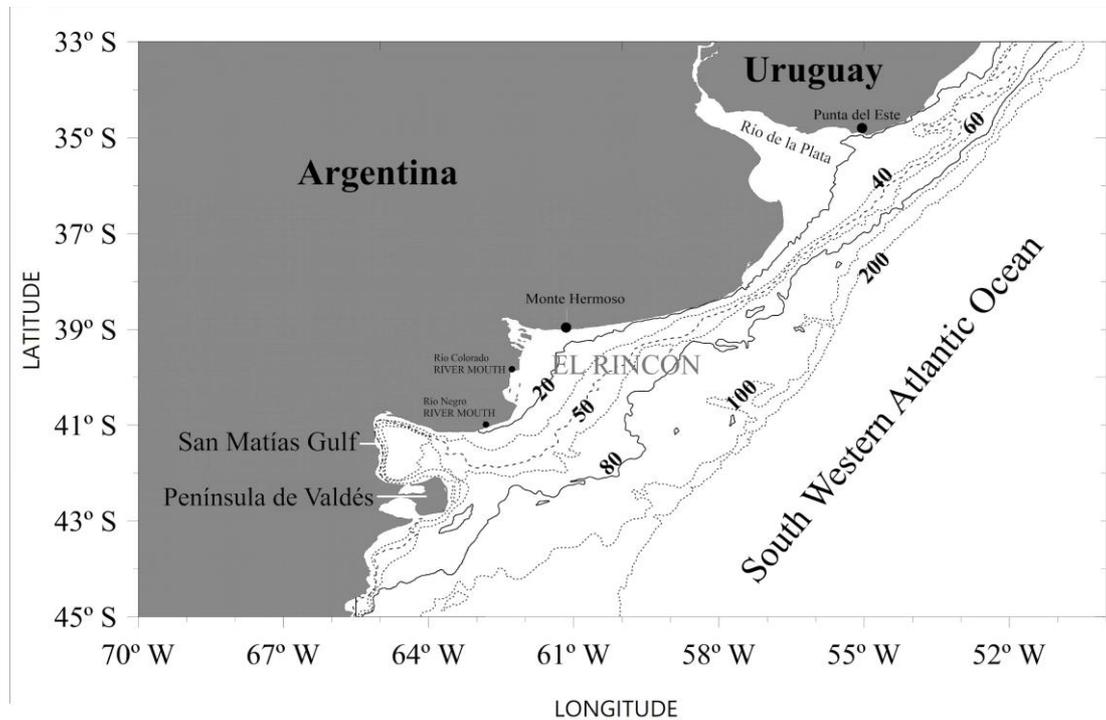


Figure 1. Northern Argentinean Continental Shelf (study area) showing the principal geographical references and isobaths.

Figura 1. Plataforma Continental Argentina Norte (área de estudio) y principales referencias geográficas y batimétricas.

The signal observed in the coastal waters and the ER is different; it is stronger and detected to the north of approximately $38^{\circ}50' S$ (Guerrero, 1998; Lucas et al., 2005; Piola and Rivas, 1997). In this area, spring and summer mean physical distributions lead to conjecture that stratification increases because of increased insolation, reduced winds and subsurface intrusions into the shelf (Martos and Piccolo, 1988).

The NACS is characterized by a gentle slope and low relief features (Parker et al., 1997). The continental shelf widens from north to south, and it is characterized by a mean north-northeastward surface flow in the middle shelf and a flow seasonally influenced in the inner shelf (Palma et al., 2008). This shelf comprises a variety of water masses: coastal waters and the so-called High Salinity Coastal Water, with relative salinity maximums ($S > 34.0$). This leads to the presence of several oceanic fronts (Guerrero and Piola, 1997; Acha et al., 2004). Waters dominated by the SMG, RDP and ER are separated from the mid and outer-shelf waters seasonally stratified by a thermal front called Middle Shelf Front (MSF). This front can be detected in SST horizontal distributions and can be visualized throughout the year, spanning between $38^{\circ} S$ and $42^{\circ} S$ between the 30 m and 80 m isobaths (Lucas et al., 2005; Martos and Piccolo, 1988; Saraceno et al., 2004).

The NACS is highly productive and diverse, with socio-economic relevance in the different systems and strongly related to dominant environmental conditions. Although the primary production in the main coastal shelf system is greater than the biomass supported by the system (Lercary et al., 2018, in press), its production is enhanced by the fertilization of continental freshwater discharge contributed by three principal rivers (RDP, Colorado and

Negro) and the Lagoa dos Patos, Brazil, (Lat -31° 04' S, Lon -51° 28' W, not shown in figure 1) (Garcia and Garcia, 2008; Lutz et al., 2010) and exhibit a clear seasonal pattern strongly related to changes in vertical stability, which controls nutrients and light availability (Carreto et al., 1995). Therefore, the availability of adequate food (high presence of phytoplankton and zooplankton) and the variation in the retention mechanisms (marine fronts, anticyclone gyres, oceanic circulation) will affect the successful fish larval recruitment and growth (Militelli, 2007; Rivas and Pisoni, 2010). Likewise, this oceanographic mechanism, together with the temperature and salinity distribution, affect the spatial arrangement of the principal fish assemblage (Menni et al., 2010), the species abundance and its population structure at different biological level (Elisio et al., 2017; Jaureguizar et al., 2016). The spatial and temporal variation in the environmental pattern affect the fishery landing (De Wysiecki et al., 2017) within the NACS, and thus, the improvement of the knowledge of patterns of environmental variables is significant for a fishery sustainable management within an ecosystem approach.

DATA AND METHODS

We used daily satellite SST data called "Blended Sea Surface Temperature" from the NOAA CoastWatch Program (NOAA NESDIS Office of Satellite Data Processing and Distribution, and NASA's Goddard Space Flight Center, OceanColor Web; https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/infog/BA_ssta_las.html). This ocean product is derived from observations of both infrared and microwave remote sensors installed on multiple platforms, with 0.1° spatial resolution and daily temporal resolution over the period July 2002 - March 2014. Data are mapped into a regular grid of 0.1° × 0.1° and, through simply arithmetic, daily compositions over a 5-day period averages are produced.

This blended SST data set is one of the highest resolutions analyzed SST products that have been lately produced; it is estimated by optimal interpolation methods merging SST satellite coming from infrared and microwave sensors. The data processing is described in Powell et al. (2008). Combining the diverse sources of data makes possible to take advantage of each sensor's strengths (the high accuracy and resolution of the thermal infrared SST measurements and the better temporal and spatial coverage of passive microwave SST measurements). Merged or "Blended" products, in addition, have the advantage of having a low total error compared with the individual errors for each instrument. As shown in Reynolds et al. (2002), those errors can be dramatically reduced with blended products. In areas where data are scarce, as it is the case in the NACS, those blended products provide an opportunity of evaluating SST variability even on relatively short timescales. However, the problem of the blending is not free of difficulties; for instance, thermal infrared retrievals are measuring the skin temperature while passive microwave retrievals measure the sub-skin temperature. Wick et al. (2004) discussed the use of this combined data and concluded that it creates a new global, high quality, multi-sensor SST product at a fine spatial and temporal resolution that is global and regularly distributed, useful for climate modelers and scientists to better understand oceanic and atmospheric circulation patterns.

Taking advantage of the temporal resolution of our data (July 2002 - March 2014), we can apply a more accurate definition of the seasonal cycle than the use of monthly means, and more sophisticated statistical techniques to aid on the understanding of the involved processes.

Statistical Methods

The seasonal cycle of the SST daily anomalies respect to annual mean at every grid point (SSTA, hereafter) was computed by adjusting minimum squares sinusoidal functions (harmonic analysis).

To explore the co-variability of SSTA at different locations, *i.e.*, how SST variations at one location are related to those at another, alternative analyses methods could be applied. One commonly used approach is Principal Components based on Empirical Orthogonal Functions (EOF) analysis and extensions thereof (von Storch and Zwiers, 1999; Hannachi, 2004). Conceptually, EOF analysis determines a spatial pattern of variability that accounts for the maximum covariance between the SST anomaly timeseries at all the grid points in the dataset. This covariance maximum is extracted as the "first variability mode", or first or leading EOF. Then, the remaining co-variability is subject to the same decomposition with the added constraint that the second EOF pattern is orthogonal (*i.e.*, uncorrelated) in space to the leading

EOF pattern. This procedure is repeated until all n EOF patterns have been computed, where n is equal to the number of grid points. In practice, only the first few leading modes are robust as a result of the orthogonality constraint. EOF rotation may be used to circumvent this constraint; however, it may also result in patterns that are overly localized in space. Each EOF pattern is associated to a principal component (PC, *i.e.*, the corresponding timeseries or scores) that describes the temporal evolution of the covariance between the EOF pattern (in our case it would be a spatial pattern) and the SSTA field analyzed. The PC may be obtained by projecting (as a matrix product) the EOF pattern onto the original SST anomaly field at each time step to find the sign and amplitude of the pattern at every time (Deser et al., 2010). It should be noted that the sign of the EOF is arbitrary; however, the product of the EOF and the PC timeseries recovers the correct polarity of the mode at any given grid point and time. Although useful, EOF analysis is not infallible. The EOF modes depend on the spatial domain considered, are subject to orthogonality constraints, and may not be separable if they account for similar percentages of the total variance (North et al., 1982). Also, EOFs are empirically determined "modes" and thus are not necessarily equivalent to the dynamical modes of the system. It is always prudent to confirm EOF patterns with other techniques such as compositing, one-point correlation maps, linear regression analysis, etc.

Therefore, EOF analysis (S-Mode) over the fields of SSTA data was applied. To reflect the strength and physical robustness of every mode found, "composite" maps for the SSTA were computed, considering the positive and negative events identified with those days when high score values (>0.7 or <-0.7) were found.

RESULTS

The SST annual cycle accounted for over 90% of the total variance in all the study area; the most significant variances were observed along the inner shelf between 35° and 42° S (Fig. 2a). Particularly, in ER region values exceeded 96%. The lowest values were located along the RDP northern coast and at the outer continental shelf close to the shelf break.

The annual mean SST ranged from 10.5 to 20°C (Fig. 2b), with a marked tilt of the isotherms from southwest to northeast, approximately following the regional isobathic features (Fig. 1). The lowest mean SST values were observed to the south of the continental shelf at depths higher than 100 m, whereas the highest values were found at the shallow upper RDP, where the continental runoff has considerable influence, and along the northern Uruguayan coast. A relatively low temperature cell, also observed by other authors (Glorioso, 1987; Pisoni et al., 2015; Rivas, 2010), was distinguished offshore PVF, due to this is a tidal front area where homogeneous and stratified waters meet and force the vertical mixing.

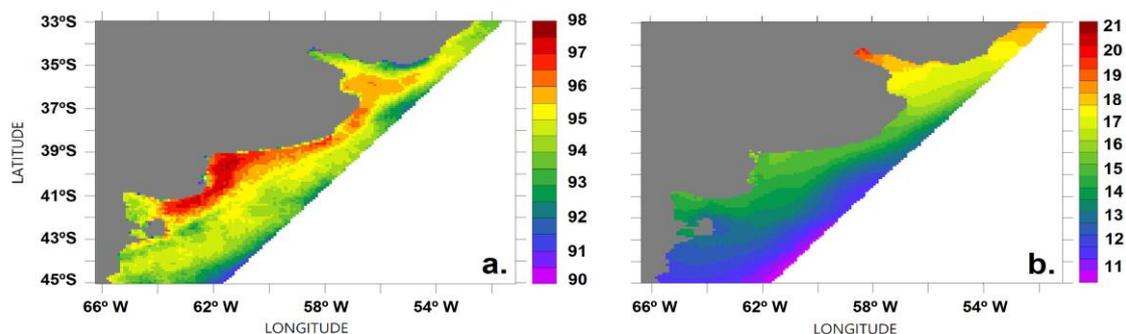


Figure 2. Spatial distribution of SST variance (%) in the Northern Argentinean Continental Shelf. SST annual cycle (a.) explains over 90%. Annual mean SST (b.) isotherms show a tilt from southwest to northeast. Note that the scale of every figure is different.

Figura 2. Distribución espacial de la varianza de TSM (%) en la Plataforma Continental Argentina Norte. El ciclo anual de TSM (a.) explica más del 90%. El campo medio anual de TSM (b.) muestra una inclinación de las isobaras de sudoeste a noreste. Notar que la escala de colores en cada figura es diferente.

The amplitude and phase of the annual cycle (Fig. 3a and b) showed similar spatial patterns, decreasing offshore north of 41° S and showing an opposite behavior in the vicinity of PVF, where minimum values are present close to the coast. The amplitude in the whole area ranged between 3.4 and 7.6 °C. The highest amplitudes occurred over the shallow areas (depths < 20 m) of the ER and the RDP, with a variation of over 6.8 °C between the warm and cold seasons (red areas in Fig. 3a). The lowest amplitudes were observed in the SMG with an extension from the PVF to the northeast, between the 50 and 80 m isobaths. Here, there were changes of up to 4.6 °C between the warm and the cold seasons (blue areas in Fig. 3a). The annual cycle phase (Fig. 3b) ranged between 28 and 72 days. There was a difference of about 30 days in the occurrence of the maximum/minimum SST seasonal anomaly between the outer shelf and the coastal systems of the Southwestern Atlantic Ocean. The shallower areas of the RDP and ER heat/cold, up to the end of the summer/winter, 40 days after than the PVF region. Thus, three shelf areas can be differentiated regarding their annual harmonic constants: the shallow areas of the ER and RDP, a region influenced by the PVF deep water, and the intermediate area of MSF and the Uruguayan coast.

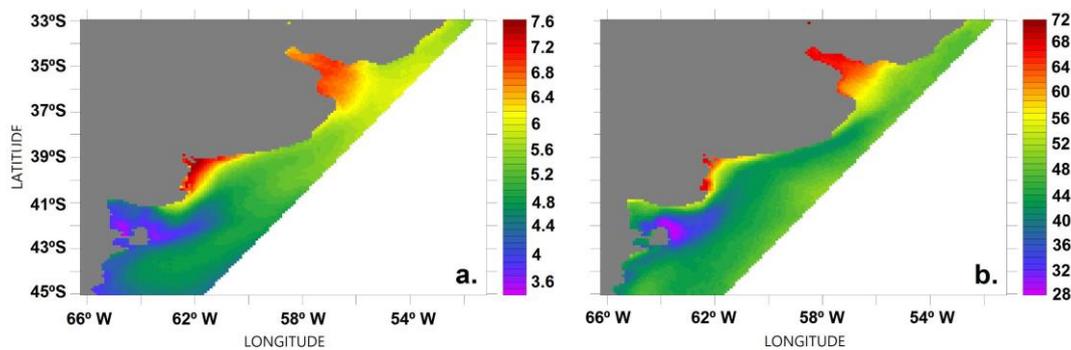


Figure 3. Amplitude (a.) and phase (b.) of SST annual cycle in Northern Argentinean Continental Shelf. The values of amplitude are in °C. The phase is defined as a time span (in days) between the beginning of the timeseries analyzed (July 27th) and the first cycle's minimum. The annual cycle phase ranged between 28 days around PVF and 72 days in shallow areas.

Figura 3. Amplitud (a.) y fase (b.) del ciclo anual de TSM en la Plataforma Continental Argentina Norte. Los valores de amplitud están expresados en °C. La fase es definida como el tiempo transcurrido (en días) entre el inicio de la serie temporal analizada (27 de julio) y el primer mínimo del ciclo. La fase del ciclo anual tiene un rango entre 28 días alrededor de FPV y 72 días en las áreas poco profundas.

The monthly mean SST fields computed from the adjusted annual cycle (Fig. 4) showed, for every month, a gradient pointing in the northwest direction (onshore). In January and February, the shallow regions of the NACS showed the highest temperatures, reaching around 26 °C in the RDP and around 23 °C in ER, whereas the coldest areas were in the southern shelf and at the SMG mouth, with approximately 14 °C. The areas close to the continental shelf break cooled first during March and April, but shallow areas rapidly get the same SST cool range during May to August, reaching 8/10 °C in the ER and middle coastal region, and about 10 °C in the RDP. During spring and early summer (September-December), shallow waters heat faster than the shelf and deeper areas and, therefore, the SST gradient points onshore again.

The EOF analysis applied to the SSTA (Fig. 5) indicated that nearly 94% of the annual variance was explained by the first two modes, which account for 70% (resembling the annual cycle pattern) and 24% (resembling the semi-annual cycle) of the variance, respectively. The spatial structure of Mode 1, *i.e.* the annual signal fields or EOFs (Fig. 5b), showed a pattern in which shallow areas (RDP and ER) heat/cool differently than deeper regions (SMG and PVF), as can be seen by the alternate factor loading sign. The PC timeseries of Mode 1 (Fig. 5a) showed minimum score values (<-0.7, negative phase) in late spring and summer of the Southern Hemisphere (end of October to March), whereas maximum values (>0.7, positive phase) occurred in late autumn and winter (May to early September).

The spatial pattern, or EOFs, of Mode 2 (Fig. 5d) showed a SSTA gradient pointing offshore/onshore at the inner ER and RDP with maximum values related to fall/spring; at the shelf region, between the 20 and 80 m isobaths and north of 42.5° S, maximum

positive/negative SSTA related to fall/spring season were observed. The PC timeseries of Mode 2 (Fig. 5c) showed minimum values (<-0.7 , negative phase) in spring (September to October) and maximum values (>0.7 , positive phase) in autumn (March to May).

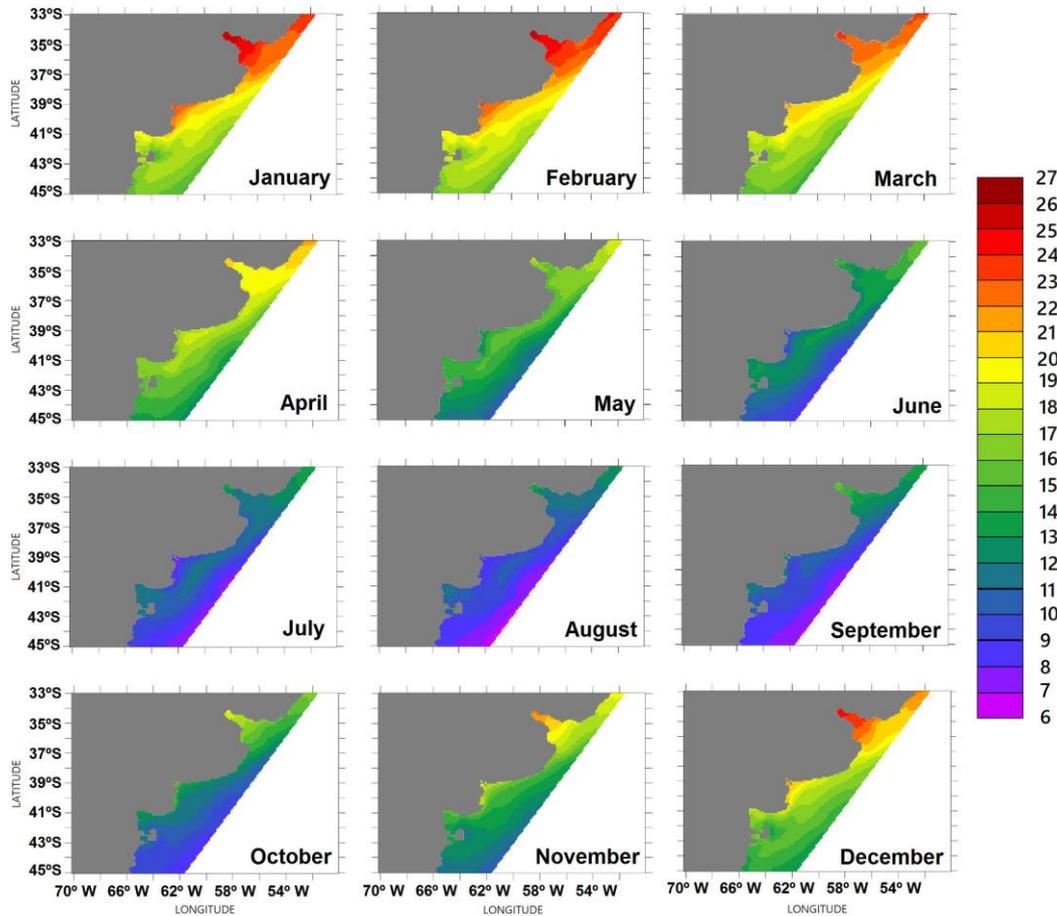


Figure 4. SST ($^{\circ}$ C) monthly mean distribution associated with the seasonal cycle in the Northern Argentinean Continental Shelf. Minimum SSTs occur in August and maximum SSTs in February.

Figura 4. Distribución de TSM media mensual ($^{\circ}$ C) asociada con el ciclo estacional en la Plataforma Continental Argentina Norte. Los mínimos valores de TSM se observan en agosto y los máximos en febrero.

To assess the robustness and better understand the meaning of the EOF modes, the SST composites for score values above/below $+0.7/-0.7$ were mapped (Fig. 6). The positive phase of Mode 1 occurred in autumn/winter (Fig. 6a), during 130 days of the year, whereas its negative phase occurred in spring/summer (Fig. 6b), during 151 days of the year. This mode very much resembled the structures of the annual cycle amplitudes and phases (Fig. 3) and reveals the seasonal warming/cooling associated with the radiative cycle. In winter, the entire shelf cooled with respect to the mean SST (Fig. 2b). However, the shallow areas of the RDP and, mainly, the ER cooled more than the MSF region and much more than the SMG and PVF. At the ER the cooling results of 4.4° C lower than at the PVF. Conversely, in summer the entire shelf heated with respect to the mean SST (Fig. 2b), but the shallow waters heated more than the adjacent waters and the middle shelf, and much more (around 4° C) than the SMG and PVF.

Mode 2 reveals the different heating and cooling that take place in the intermediate seasons, which can hardly be appreciated in previous figures. Mode 2 significant cases corresponded to early spring and early fall (September and April; Fig. 6c and 6d, respectively) in the positive (with 39 days) and negative (with 35 days) phases of the mode, respectively. In early spring, the

region comprised between the 10 m and 60 m isobaths showed a temperature increment of around 3 °C, while the temperatures at RDP, SMG, and the inner ER increased less than 2 °C. In the fall, SST cooling was more pronounced in ER and the MSF areas, where a decreased of more than 4 °C was observed and minimizes in middle and internal RDP, western ER, and SMG.

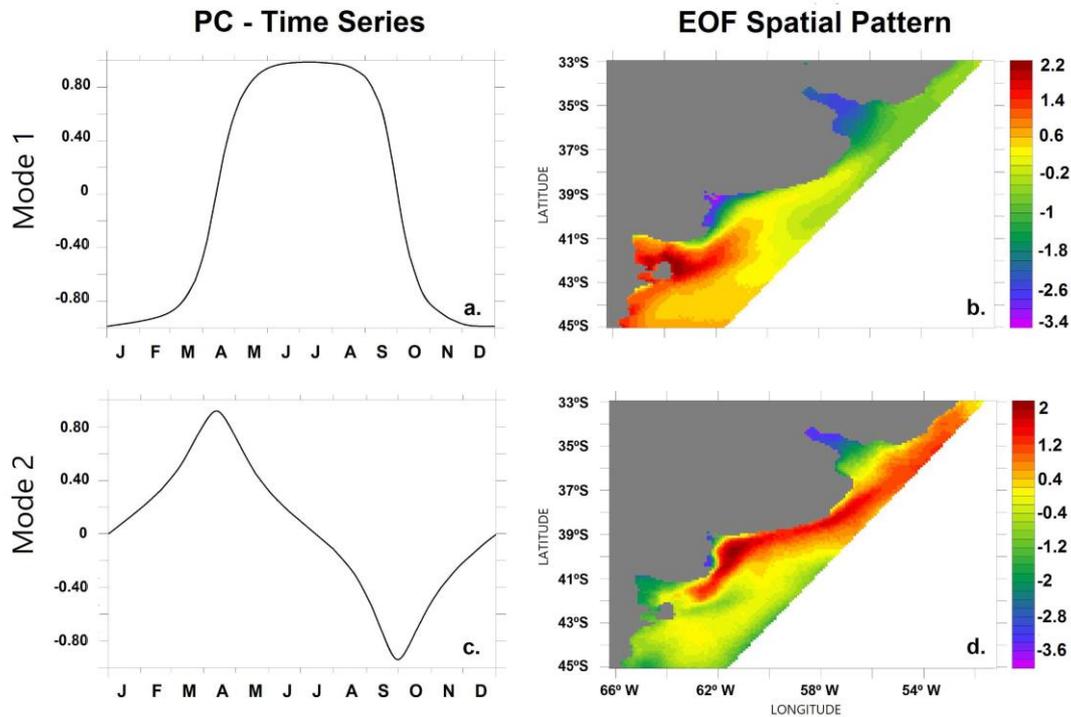


Figure 5. Average principal component associated with the Mode 1 (a., accounting 70% of the variance) and Mode 2 (c., 24% of the variance) of SST seasonal variability in the NACS, showing the monthly correlation between each mode and the SST field. EOF spatial structure associated with Mode 1 (b.) is mainly related to Areas I and II occurring in late spring and summer (Oct-Mar), and in late autumn and winter (May-Sep); while the associated with Mode 2 (d.) occurs in Area III with maximum negative values in spring (Sep-Oct) and positive values in autumn (Mar-May).

Figura 5. Componentes principales (series temporales) asociadas al Modo 1 (a., 70% de la varianza) y al Modo 2 (c., 24% de la varianza) de variabilidad de TSM en la Plataforma Continental Argentina Norte, mostrando la correlación mensual entre cada modo y el campo de TSM. La estructura EOF espacial asociada con el Modo 1 (b.) está principalmente relacionada a las Áreas I y II que ocurren en la primavera temprana y verano (oct-mar), y en otoño tardío e invierno (may-sep); mientras que la estructura asociada al Modo 2 (d.) ocurre en el Área III con valores máximos negativos en primavera (septiembre y octubre) y valores positivos en otoño (mar-may).

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Twelve years of daily satellite data were used to describe SST seasonal variability at seasonal timescales in the NACS. An accurate definition of the seasonal cycle was utilized, computed as a harmonic analysis that extracts the annual and semi-annual components, and statistical techniques were applied to show the principal modes of variability in this spatial scale. Our results update and improve the knowledge of the SST seasonal cycle in the NACS.

SST annual variability accounted over 90% of the total variance analysis in the NACS, with the highest values (>96%) in ER. This variability was related to the forcing mechanisms associated with the seasonal fluctuations in the solar radiation received by the ocean surface, which has an approximately sinusoidal signature (Seckel and Beaudry, 1973).

Annual mean SST in the NACS ranged between 10.5 and 20 °C. The highest temperatures were found in the northern shelf and the lowest values over the southern part, with isotherms following in coincidence the shelf isobathic features, as a result of a combination of the regional circulation and the net surface heat flux. Strong currents driven by the dominant semidiurnal tide

(M_2) inhibit the formation of the seasonal thermocline in some coastal areas of the Patagonian shelf, inducing homogenization of the whole water column even during the spring and summer when the surface heat flux increases (Glorioso, 1987; Pisoni et al., 2015; Rivas et al., 2006; Rivas, 2010). In our results, an isolated low temperature cell was observed in PVF region, as a unique feature associated with the dynamic of this tidal front, where vertical mixing tends to damp the seasonal heating/cooling.

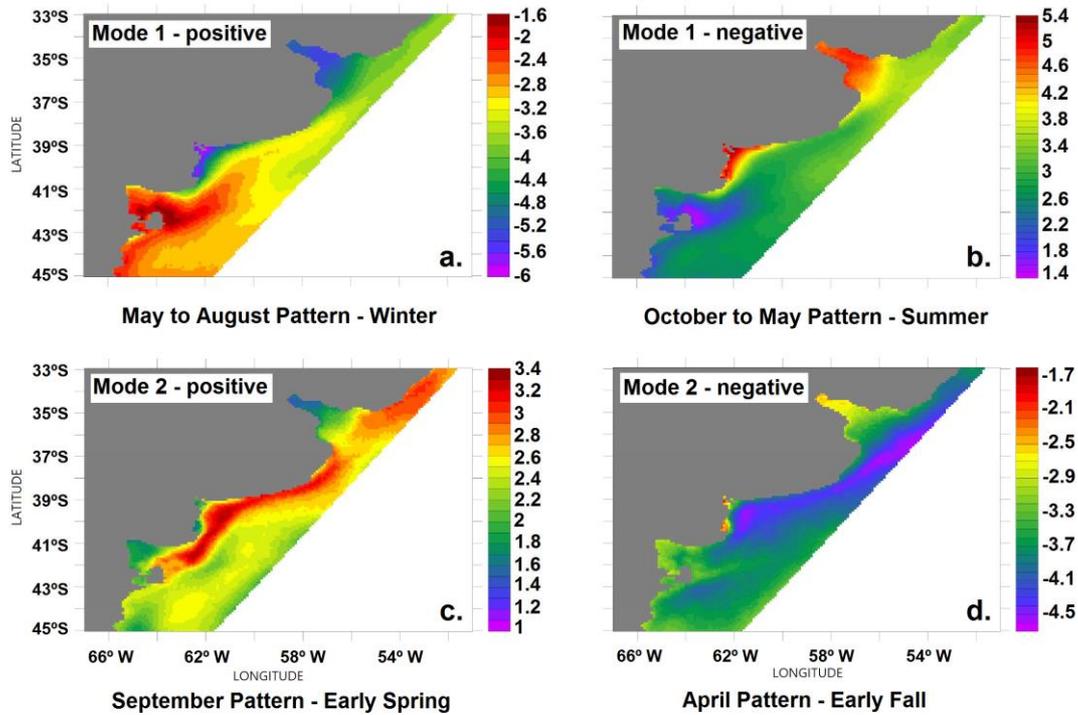


Figure 6. Composites of the SST ($^{\circ}$ C) fields associated with the Mode 1 (upper panels) and the Mode 2 (lower panels) of annual variability in its positive (a. and c.) and negative (b. and d.) phases for the Northern Argentinean Continental Shelf. Note that the scale of every figure is different.

Figura 6. Campos de composiciones de SST ($^{\circ}$ C) asociados con el Modo 1 (paneles superiores) y el Modo 2 (paneles inferiores) de variabilidad anual y sus fases positivas (a. y c.) y negativas (b. y d.) para la Plataforma Continental Argentina Norte. Notar que la escala de colores de cada figura es diferente.

Monthly mean SST spatial distribution associated with the seasonal cycle showed a SST gradient pointing in the northwest direction (onshore) in most areas all year round, remarking that shallow areas heat/cool rapidly as seasons change. Minimum SSTs occur in August and maximum SSTs in February, in agreement with other studies for different parts of our study area (e.g., Hoffman et al., 1997; Lentini et al., 2000; Martínez-Avellaneda, 2005; Podestá et al., 1991).

The spatial distribution of SST variance, its annual cycle amplitude and phase could be associated with water response to changes in the radiative cycle and allowed us to define three main areas with particular behaviors:

- **Area I:** the inner regions of ER and RDP, with depth less than 20 m, that showed the highest amplitudes, with differences over 6.8° C between the warm and cold seasons, and the highest phases (>60 days);
- **Area II:** the SMG and shelf water around PVF where the lowest amplitudes (less than 4.6° C) and phases (less than 40 days) occurred;
- **Area III:** the middle coastal shelf water that "connects" or "involves" the previous areas, associated with MSF dynamics.

The amplitude of the annual cycle showed values from 7.6° C to 3.4° C; this result is lower than that previously obtained for the whole NACS by Podestá et al. (1991) and equal or somewhat higher than that obtained by Rivas (2010). The annual cycle phase (days from July 27th where SST annual cycle reaches its minimum) showed that first cycle's minimum in the

RDP and ER areas was around day 70 (October 5th), while the shelf and in offshore waters got it around day 40 (September 5th, *i.e.*, one month before), and, as noted by Podestá et al., (1991), the PVF area showed lower values, around day 30 (August 26th).

The near north-south differences north of 41° S shown by these results suggested a predominantly astronomical forcing, *i.e.*, solar radiation, of the SST annual cycle. The decrease in amplitude and phase with higher depth could be associated with slower water response to changes in the radiative cycle due to higher depth or due to vertical mixing, as a result of wind and tides, which distributes heat throughout the water column (Glorioso, 1987) diluting the effect of the radiative cycle. The amplitude is lower in areas that do not show seasonal stratification, such as PVF, and where summer heat flux is distributed over the whole water column (Rivas 2010). The semi-annual cycle amplitude (not shown) resulted very small (< 1 °C) at the inner shelf and the coastal areas; consistently, it is known that this cycle is mostly related to the system of the SWAO boundary currents (Goñi et al., 2011; Provost et al., 1992) which is out of the scope of this work.

The dominant EOF mode of SSTA (Mode 1, accounting for 70% of the variance) was mainly related to ER and RDP inner water (Area I) and SMG and PVF water (Area II), and was more intense (higher score values) in late spring and summer (October to March) and in late autumn and winter (May to September), reflecting the effect of the annual radiative cycle. As the cold season progresses, the shallow waters of ER and the RDP (Area I) cool faster than the deeper waters of the shelf and the SMG/PVF regions (Area II). As a result, during late autumn/winter those shallow regions become colder than the deeper ones and the temperature gradient points southward and offshore, getting temperatures ~ 3 °C lower than the adjacent waters and the middle shelf, and ~ 4 °C lower than the SMG and PVF. Reciprocally, during late spring/summer, the Area I heat faster than the north middle shelf (~ 2 °C hotter), SMG and the Patagonian coastal shelf (more than ~ 3.5 °C hotter) and, therefore, the temperature gradient points northward and onshore. Although the Area III (middle region, MSF) had similar amplitude and phase, this Mode 1 allow us to differentiate it around 38° S.

The second EOF mode (accounting for 24% of the variance) was mainly associated with the middle shelf water and MSF (Area III) and showed more intensity during early spring (September-October, negative phase) and early autumn (March-May, positive phase). It showed a pattern where SSTA gradient pointing offshore suggest the heating/cooling of coastal waters feature. This mode could be related to a transition at the early intermediate seasons when this heating/cooling extends along the coastal region between PVF and RDP, and surface heat and freshwater fluxes get maximum extreme values (Scasso and Piola, 1988). In early spring, the region comprehended between 20-60 m isobaths showed a 3-3.4 °C temperature increment, whereas the RDP, SGM, and the inner ER got less than 2.2 °C heating. In early fall, SST cooling was stronger in ER and the MSF area where it got a 4-4.7 °C decrease and minimized in middle and internal RDP, western ER, and SMG. The mean circulation of coastal shelf waters over the NACS is from the SSW to the NNE, and following the bathymetry (Severov, 1990; Piola and Rivas, 1997; Guerrero and Piola, 1997). Across the central portion of the NACS, the NNE direction of the flow prevails throughout the year, as it can be inferred from the salinity distributions in Lucas et al. (2005). Waters exported from the SMG cover almost the whole area between the coast and the 50-m isobath and show large seasonal variation in extent and distribution (Lucas et al., 2005). During the winter months, the entire area off ER is dominated by the northward extension of the SMG waters. In the spring-summer period, the retraction of SMG waters in the ER area appears to allow the expansion of the ER estuarine low salinity signal along the coast and to the east, an effect enhanced by the formation of a southward coastal flow of shelf waters during this season proposed by Palma et al., 2004b.

While flowing towards lower latitudes, the continental shelf water is subject to an excess of evaporation over precipitation (Scasso and Piola, 1988), thus increasing the salinity along its path over Area III. The excess of evaporation implies an exchange of net heat with the atmosphere through latent heat flux, as the process of evaporation will absorb heat from the surrounding waters, thus implying cooler SSTs. The net air-sea exchange of water in the SMG area shows similar seasonality as the evaporation rate (*i.e.*, with a minimum in September and a maximum in the fall (Scasso and Piola, 1988)) while the precipitation rate is nearly constant throughout the year. As the difference between evaporation and precipitation is always positive, there is net loss of water to the atmosphere throughout the year (Scasso and Piola, 1988). Over this region, Mode 2 indicates warm SSTA in the spring and cool SSTA in the fall (Fig. 6).

Therefore, the Mode 2 suggests the presence of a warm water mass in an area where evaporation exceeds the precipitation rate. Minimum evaporation rates in September / Spring

suggests less ocean heat loss, and thus, warmer SSTs (*i.e.*, positive SSTA). Whereas in the fall, the SMG water begin to cover the ER area and the excess of evaporation is at its peak, thus, the loss of heat through latent heat flux is greater, resulting in cooler SSTs (*i.e.*, negative SSTA).

This study showed the importance of seasonal cycle on NACS hydrographic conditions and defined three main areas with similar SST behavior. It denoted that within the RDP and ER region there are at least two areas with different amplitude and phase of variation. Computing the timing of the annual cycle can be useful to comprehend the occurrence, distribution and migration of local economic fish stocks, which could explain the variation in temporal availability of preferred habitat for, for example, cold water species along the coast (*e.g.*, *Discopyge tschuddi*, Cortés et al., 2011). Therefore, the variability of SST condition would not only determine the species/stage vulnerability (Jaureguizar et al., 2007, 2015, 2016; Jaureguizar and Guerrero, 2009) during evaluation cruises or fishery, affecting estimates of densities (sub/overestimation) and fishery mortality, and have implications in management regulations of fish stocks, but also affects the reproductive potential (Elisio et al., 2017; Militelli, 2007), species recruitment (Marrari et al., 2013), and affect the ratio of consumption over biomass (Q/B) within the NACS (Lercari et al., 2018, in press) and would therefore have serious implications for the sustainability of the ecosystem.

Acknowledgements: This paper is a contribution to the ANPCyT (National Agency for Scientific and Technological Research of Argentina) PICT 2014-2672 and 2015-1934 Projects; UBACYT 20020150100118BA (Universidad de Buenos Aires) and PIDDEF 2014 N°14 (Ministerio de Defensa, Secretaría de Ciencia, Tecnología y Producción para la Defensa, Subsecretaría de Investigación, Desarrollo y Producción para la Defensa, Programa de Investigación y Desarrollo para la Defensa). Dr. Luz Clara and Dr. Simionato's salaries were paid by the CONICET. Dr. Jaureguizar's salary was paid by the CIC-Provincia de Buenos Aires. The authors are grateful to Reviewer H for his/her careful reading of the manuscript and constructive comments and suggestions to significantly improve the explanation of the methodological work, as well as Dr. R.A. Maenza for his constructive critical reading. INIDEP contribution #2178.

REFERENCES

- Acha, E. M., Mianzan, H. W., Guerrero, R. A., Favero, M., y Bava, J. (2004). Marine fronts at the continental shelves of austral South America. *Journal of Marine Systems*, 44(1-2), 83-105. doi: 10.1016/j.jmarsys.2003.09.005
- Bava, J., Gagliardini, D. A., Dogliotti, A. I. y Lasta, C. A. (April 8-12, 2002). Annual distribution and variability of remotely sensed sea surface temperature fronts in the Southwestern Atlantic Ocean. 29th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Com. Nac. de Activ. Espaciales, Buenos Aires, Argentina.
- Bianchi, A. A. (2005). Vertical stratification and air-sea CO₂ fluxes in the Patagonian shelf. *Journal of Geophysical Research*, 110(C7), C07003. doi: 10.1029/2004JC002488
- Bianchi, A. A., Pino, D. R., Perlender, H. G. I., Osiroff, A. P., Segura, V., Lutz, V., ... Piola, A. R. (2009). Annual balance and seasonal variability of sea-air CO₂ fluxes in the Patagonia Sea: Their relationship with fronts and chlorophyll distribution. *Journal of Geophysical Research*, 114(C3), C03018. doi: 10.1029/2008JC004854
- Carreto, J. I., Benavides, H. R., Negri, R. M., y Glorioso, P. D. (1986). Toxic red-tide in the Argentine Sea. Phytoplankton distribution and survival of the toxic dinoflagellate *Gonyaulax excavata* in a frontal area. *Journal of Plankton Research*, 8(1), 15-28. doi: 10.1093/plankt/8.1.15
- Carreto, José., A. Lutz, V., Carignan, M. O., Cucchi Colleoni, A. D., y De Marco, S. G. (1995). Hydrography and chlorophyll a in a transect from the coast to the shelf-break in the Argentinian Sea. *Continental Shelf Research*, 15(2-3), 315-336. doi: 10.1016/0278-4343(94)E0001-3
- Cortés, F., Jaureguizar, A. J., Menni, R. C., y Guerrero, R. A. (2011). Ontogenetic habitat preferences of the narrownose smooth-hound shark, *Mustelus schmitti*, in two Southwestern Atlantic coastal areas. *Hydrobiologia*, 661(1), 445-456. doi: 10.1007/s10750-010-0559-2

- De Wysiecki, A. M., Jaureguizar, A. J., y Cortés, F. (2017). The importance of environmental drivers on the narrownose smoothhound shark (*Mustelus schmitti*) yield in a small-scale gillnet fishery along the southern boundary of the Río de la Plata estuarine area. *Fisheries Research*, 186, 345–355. doi: 10.1016/j.fishres.2016.10.011
- Delgado, A. L., Jamet, C., Loisel, H., Vantrepotte, V., Perillo, G. M. E., y Piccolo, M. C. (2014). Evaluation of the MODIS-Aqua Sea-Surface Temperature product in the inner and mid-shelves of southwest Buenos Aires Province, Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, 35(1), 306-320. doi: 10.1080/01431161.2013.870680
- Derisio, C., Alemany, D., Acha, E. M., y Mianzan, H. (2014). Influence of a tidal front on zooplankton abundance, assemblages and life histories in Península Valdés, Argentina. *Journal of Marine Systems*, 139, 475–482. doi: 10.1016/j.jmarsys.2014.08.019
- Deser, C., Alexander, M. A., Xie, S.-P., y Phillips, A. S. (2010). Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms. *Annual Review of Marine Science*, 2(1), 115-143. doi: 10.1146/annurev-marine-120408-151453
- Elisio, M., Colonello, J. H., Cortés, F., Jaureguizar, A. J., Somoza, G. M., y Macchi, G. J. (2017). Aggregations and reproductive events of the narrownose smooth-hound shark (*Mustelus schmitti*) in relation to temperature and depth in coastal waters of the south-western Atlantic Ocean (38–42°S). *Marine and Freshwater Research*, 68(4), 732. doi: 10.1071/MF15253
- Framiñan, M. B., Etala, M. P., Acha, E. M., Guerrero, R. A., Lasta, C. A., y Brown, O. B. (1999). Physical Characteristics and Processes of the Río de la Plata Estuary. In G. M. E. Perillo, M. C. Piccolo, y M. Pino-Quivira (Eds.), *Estuaries of South America* (pp. 161-194). doi: 10.1007/978-3-642-60131-6_8
- García, C. A. E., y García, V. M. T. (2008). Variability of chlorophyll-a from ocean color images in the La Plata continental shelf region. *Continental Shelf Research*, 28(13), 1568-1578. doi: 10.1016/j.csr.2007.08.010
- Giese, B. S. y Carton, J. A. (1994). The Seasonal Cycle in Coupled Ocean-Atmosphere Model. *Journal of Climate*, 7, 1208-1217.
- Glorioso, P. D. (1987). Temperature distribution related to shelf-sea fronts on the Patagonian Shelf. *Continental Shelf Research*, 7(1), 27-34. doi: 10.1016/0278-4343(87)90061-6
- Glorioso, P. D., y Flather, R. A. (1997). The Patagonian Shelf tides. *Progress in Oceanography*, 40(1–4), 263–283. doi: 10.1016/S0079-6611(98)00004-4
- Goni, G. J., Bringas, F., y DiNezio, P. N. (2011). Observed low frequency variability of the Brazil Current front. *Journal of Geophysical Research*, 116(C10), C10037. doi: 10.1029/2011JC007198
- Guerrero, R. A. y Piola, A. R. (1997). Masas de agua en la plataforma continental. In E. Boschi. (Ed.), *El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros, Tomo I: Antecedentes Históricos de las Exploraciones en el Mar y las Características Ambientales* (pp. 107-119). Bahía Blanca, Argentina: Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero.
- Guerrero, R. A. (1998). Oceanografía física del estuario del Río de la Plata y el sistema costero de El Rincón. In C. A. Lasta, (Ed.), *Resultados de una campaña de evaluación de recursos demersales costeros de la Provincia de Buenos Aires y del litoral uruguayo*. INIDEP Informe Técnico N° 8, 21 (pp. 29-54). Mar del Plata, Argentina.
- Hannachi A. (2004). A Primer for EOF Analysis of Climate Data. Department of Meteorology, University of Reading, Reading, U.K.
- Hoffman, J. A. J., Núñez M. N., y Piccolo, M. C. (1997). Características Climáticas del Atlántico Sudoccidental. In E. Boschi, (Ed.), *El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros: 1* (pp. 163- 193). Mar del Plata, Argentina: Inst. Nac. De Investigación y Desarrollo Pesquero.
- Jaureguizar, A. J., y Raúl, G. (2009). Striped weakfish (*Cynoscion guatucupa*) population structure in waters adjacent to Río de la Plata, environmental influence on its inter-annual variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(1), 89-96. doi: 10.1016/j.ecss.2009.04.013
- Jaureguizar, A. J., Solari, A., Cortés, F., Milessi, A. C., Militelli, M. I., Camiolo, M. D., ... García, M. (2016). Fish diversity in the Río de la Plata and adjacent waters: An overview of environmental influences on its spatial and temporal structure: environment influence on fish diversity of río de la plata. *Journal of Fish Biology*, 89(1), 569-600. doi: 10.1111/jfb.12975
- Jaureguizar, A. J., Cortés, F., Milessi, A. C., Cozzolino, E., y Allega, L. (2015). A trans-ecosystem fishery: Environmental effects on the small-scale gillnet fishery along the Río

- de la Plata boundary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 166, 92-104. doi: 10.1016/j.ecss.2014.11.003
- Jaureguizar, A. J., Waessle, J. A., y Guerrero, R. A. (2007). Spatio-temporal distribution of Atlantic searobins (*Prionotus* spp.) in relation to estuarine dynamics (Río de la Plata, Southwestern Atlantic Coastal System). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1-2), 30-42. doi: 10.1016/j.ecss.2006.12.012
- Kara, A. B., Wallcraft, A. J., Hurlburt, H. E., y Loh, W.-Y. (2009). Which surface atmospheric variable drives the seasonal cycle of sea surface temperature over the global ocean? *Journal of Geophysical Research*, 114(D5), D05101. doi: 10.1029/2008JD010420
- Lentini, C. A. D., Campos, E. J. D., y Podestá, G. G. (2000). The annual cycle of satellite derived sea surface temperature on the western South Atlantic shelf. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48(2), 93-105. doi: 10.1590/S1413-77392000000200001
- Lercari, D., Milessi, A. C., Vögler, R., Velasco, G., y Jaureguizar, A. J. (2018). Modelos tróficos en el Atlántico Sud Occidental: evaluando la estructura y funcionamiento de ecosistemas costeros. In P. Muniz, D. Conde, N. Venturini, E. Brugnoli. (Eds.), *Ciencias Marino Costeras en el Umbral del Siglo XXI: Desafíos en Latinoamérica y el Caribe*. XV COLACMAR. Sección: Estructura y Funcionamiento de Comunidades y Ecosistemas Marino-Costeros. Punta del Este, Uruguay.
- Lucas, A. J., Guerrero, R. A., Mianzán, H. W., Acha, E. M., y Lasta, C. A. (2005). Coastal oceanographic regimes of the Northern Argentine Continental Shelf (34-43°S). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65(3), 405-420. doi: 10.1016/j.ecss.2005.06.015
- Lutz, V. A., Segura, V., Dogliotti, A. I., Gagliardini, D. A., Bianchi, A. A., y Balestrini, C. F. (2010). Primary production in the Argentine Sea during spring estimated by field and satellite models. *Journal of Plankton Research*, 32(2), 181-195. doi: 10.1093/plankt/fbp117
- Marrari, M., Signorini, S. R., McClain, C. R., Pájaro, M., Martos, P., Viñas, M. D., ... Buratti, C. (2013). Reproductive success of the Argentine anchovy, *Engraulis anchoita*, in relation to environmental variability at a mid-shelf front (Southwestern Atlantic Ocean). *Fisheries Oceanography*, 22(3), 247-261. doi: 10.1111/fog.12019
- Martínez Avellaneda, N. (2005). *Ciclo Anual y Variabilidad de baja frecuencia de la Temperatura Superficial del Mar en el Océano Atlántico Sudoccidental* (Tesis de Licenciatura en Oceanografía). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, Argentina.
- Martos, P., y Piccolo, M. C. (1988). Hydrography of the Argentine continental shelf between 38° and 42°S. *Continental Shelf Research*, 8(9), 1043-1056. doi: 10.1016/0278-4343(88)90038-6
- Meccia, V. L., Simionato, C. G., Fiore, M. E., D'Onofrio, E. E., y Dragani, W. C. (2009). Sea surface height variability in the Río de la Plata estuary from synoptic to inter-annual scales: Results of numerical simulations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85(2), 327-343. doi: 10.1016/j.ecss.2009.08.024
- Menni, R. C., Jaureguizar, A. J., Stehmann, M. F. W., y Lucifora, L. O. (2010). Marine biodiversity at the community level: Zoogeography of sharks, skates, rays and chimaeras in the southwestern Atlantic. *Biodiversity and Conservation*, 19(3), 775-796. doi: 10.1007/s10531-009-9734-z
- Militelli, M. I. (2007). *Biología reproductiva comparada de especies de la familia Sciaenidae en aguas del Río de la Plata y Costa Bonaerense* (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Mar del Plata, Argentina.
- Moreira, D., Simionato, G. G., y Dragani, W. (2011). Modeling Ocean Tides and Their Energetics in the North Patagonia Gulfs of Argentina. (2011). *Journal of Coastal Research*, 27(1), 87. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-09-00055.1
- North, G. R., Bell, T.L., Cahalan, R. F., y Moeng, F. J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Weather Rev.*, 110, 699-706.
- Palma, E. D. (2004). A comparison of the circulation patterns over the Southwestern Atlantic Shelf driven by different wind stress climatologies. *Geophysical Research Letters*, 31(24), L24303. doi: 10.1029/2004GL021068
- Palma, E. D., Matano, R. P., y Piola, A. R. (2004b). A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing: SOUTHWESTERN ATLANTIC SHELF CIRCULATION. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C8), n/a-n/a. doi: 10.1029/2004JC002315

- Palma, E. D., Matano, R. P., y Piola, A. R. (2008). A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing. *Journal of Geophysical Research*, 113(C11), C11010. doi: 10.1029/2007JC004720
- Parker, G., Paterlini M. C. y Violante, R. A. (1997). El fondo marino. In E. Boschi. *El Mar Argentino y sus Recursos Pesqueros, Antecedentes Históricos de las Exploraciones en el Mar y las Características Ambientales, vol. 1* (pp. 65-87). Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), Mar del Plata, Argentina.
- Piola, A. R. y A. L. Rivas. (1997). Corrientes en la plataforma continental. In E. Boschi. (Ed.), *El Mar Argentino y sus Recursos Pesquero, Tomo I: Antecedentes históricos de las exploraciones en el mar y las características ambientales* (pp. 119-132). Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Mar del Plata, Argentina.
- Piola, A. R. y Scasso, L. M. (1988). Circulación en el Golfo San Matías. *Geoacta*, 15(1), 33-51.
- Pisoni, J. P., Rivas, A. L., y Piola, A. R. (2015). On the variability of tidal fronts on a macrotidal continental shelf, Northern Patagonia, Argentina. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 119, 61–68. doi: 10.1016/j.dsr2.2014.01.019
- Podestá G. P., Brown O. B., y Evans, R. H. (1991). The annual cycle of satellite-derived sea surface temperature in the Southwestern Atlantic Ocean. *American Meteorological Society, Journal of Climate*, 4, 157-467. doi: 10.1175/1520-0442(1991)004<0457:TACOSD>2.0.CO;2
- Powell, B. S., Arango, H. G., Moore, A. M., Di Lorenzo, E., Milliff, R. F., y Foley, D. (2008). 4DVAR data assimilation in the Intra-Americas Sea with the Regional Ocean Modeling System (ROMS). *Ocean Modelling*, 23(3-4), 130-145. doi: 10.1016/j.ocemod.2008.04.008
- Provost, C., Garcia, O., y Garçon, V. (1992). Analysis of satellite sea surface temperature time series in the Brazil-Malvinas Current Confluence region: Dominance of the annual and semiannual periods. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C11), 17841-17858. doi: 10.1029/92JC01693
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C. y Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15, 1609-1625. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIIASAS>2.0.CO;2
- Rivas, A. L. (2010). Spatial and temporal variability of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean. *Continental Shelf Research*, 30(7), 752-760. doi: 10.1016/j.csr.2010.01.009
- Rivas, A. L., y Beier, E. J. (1990). Temperature and salinity fields in the northpatagonic gulfs. *Oceanologica Acta*, 13, 15-20.
- Rivas, A. L., y Pisoni, J. P. (2010). Identification, characteristics and seasonal evolution of surface thermal fronts in the Argentinean Continental Shelf. *Journal of Marine Systems*, 79(1-2), 134-143. doi: 10.1016/j.jmarsys.2009.07.008
- Rivas, A. L., Dogliotti, A. I., y Gagliardini, D. A. (2006). Seasonal variability in satellite-measured surface chlorophyll in the Patagonian Shelf. *Continental Shelf Research*, 26(6), 703-720. doi: 10.1016/j.csr.2006.01.013
- Saraceno, M. (2004). Brazil Malvinas Frontal System as seen from 9 years of advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 109(C5), C05027. doi: 10.1029/2003JC002127
- Scasso, L., y Piola, A. (1988). Intercambio neto de agua entre el mar y la atmósfera en el Golfo San Matías. *Oceanologica Acta*, 15(1): 13-31.
- Seckel, G. R. y Beaudry, F. H. (1973). *The radiation from sun and sky over the North Pacific Ocean. Trans. Amer. Geophys. Union*, 54, 1114.
- Severov, D. N. (1990). Particularidades de las condiciones oceanológicas del Atlántico Sudoccidental sobre la base de características temporales medias procedentes de una serie de años. *Frente Marítimo*, 6, 109-119.
- Shiklomanov, I. (1998). *World Water Resources-A new appraisal and assessment for the 21st century*. Paris, France: UNESCO.
- Simionato, C. G., Clara Tejedor, M. L., Campetella, C., Guerrero, R., y Moreira, D. (2010). Patterns of sea surface temperature variability on seasonal to sub-annual scales at and offshore the Río de la Plata estuary. *Continental Shelf Research*, 30(19), 1983-1997. doi: 10.1016/j.csr.2010.09.012
- Simionato, C. G., Vera, C. S., y Siegismund, F. (2005). Surface Wind Variability on Seasonal and Interannual Scales Over Río de la Plata Area. *Journal of Coastal Research*, 214, 770-783. doi: 10.2112/008-NIS.1

- Simionato, C. G., Nuñez, M. N., y Engel, M. (2001). The salinity front of the Río de la Plata—A numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters*, 28(13), 2641–2644. doi: 10.1029/2000GL012478
- Trenberth, K. E., y Stepaniak, D. P. (2004). The flow of energy through the earth's climate system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(603), 2677-2701. doi: 10.1256/qj.04.83
- von Storch, H., y Zwiers, F. W. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
- Wang, C., Xie, S. P., y Carton, J. A. (Eds.). (2004). *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*. doi: 10.1029/GM147
- Wick, G. A., Jackson, D. L., y Castro, S. L. (2004). Production of an enhanced blended infrared and microwave sea surface temperature product. *IEEE International IEEE International IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004*, 2, 835–838. doi: 10.1109/IGARSS.2004.1368534
- Yashayev, I. M., y Zveryaev, I. I. (2001). Climate of the seasonal cycle in the North Pacific and the North Atlantic oceans. *International Journal of Climatology*, 21(4), 401-417. doi: 10.1002/joc.585

Recibido: Marzo, 2018

Aceptado: Junio, 2019

IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS PARA DETECTAR VARIACIONES BRUSCAS EN SERIES DE TIEMPO GNSS

IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF NON- PARAMETRIC METHODS TO DETECT ABRUPT VARIATIONS IN GNSS TIME SERIES

Micaela Alejandra Carbonetti^{1,2}, Mauricio Alfredo Gende^{1,2}

1 Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP. Paseo del Bosque s/n. B1900FWA, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Calle 8 1467 B1904CMC, La Plata, Buenos Aires, Argentina
E-mail: carbonettimicaela@gmail.com

RESUMEN

Los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) proveen a sus usuarios de series de tiempo de coordenadas de alta precisión y permiten fácilmente vincular mediciones al Marco de Referencia Terrestre (ITRF). Asimismo dan una herramienta significativa a la comunidad científica para observar y modelar la dinámica del planeta Tierra. Para comprender mejor los fenómenos geodésicos a escala regional, existe una creciente demanda en la detección de desplazamientos milimétricos a sub-milimétricos, lo que requiere mejoras en la sensibilidad de las soluciones GNSS, y enfatizan la importancia de mantener la consistencia de los soluciones en el tiempo.

Se decidió hacer uso de métodos no paramétricos para contribuir a la localización de discontinuidades abruptas de manera automática. Estos tienen la ventaja frente a las aproximaciones funcionales, de no exigir conocer a priori el comportamiento de la señal. Se implementaron distintos algoritmos matemáticos de Cambio de Régimen (Regime Shift) y Análisis de Cambio Puntual (Change-point Analysis) para detectar offsets en las series de tiempo, llamados Promedio en Bloque, Promedio Secuencial y Suma Acumulativa. Posteriormente se hizo un análisis y comparación de los resultados obtenidos entre sí, y con un método clásico de maximización, denominado aquí estimador F , propuesto por Basseville y Nikiforov (1993).

Los distintos algoritmos fueron aplicados a series de tiempo de 21 estaciones pertenecientes a la red SIRGAS-CON, que presentaban discontinuidades conocidas de distintas magnitudes. Luego de aplicados los algoritmos se les impusieron condiciones adicionales a los resultados de manera de minimizar la cantidad de falsos positivos detectados, sin sacrificar la sensibilidad de la detección.

Todos los algoritmos propuestos fueron capaces de detectar los saltos en la gran mayoría de las estaciones analizadas. Su aplicación se vuelve más robusta al combinar las técnicas, y al cotejar para cada estación las ubicaciones de los offsets en las tres componentes. El método de Promedio Secuencial fue eficaz en un 87% de los casos analizados, mientras que el Promedio en Bloque fue exitoso en el 95% de ellos. El algoritmo de Promedio en Bloque fue el método más eficaz de los analizados para encontrar saltos en series de tiempo de coordenadas GNSS y cuantificarlos.

Palabras clave: GNSS, Detección de discontinuidades, Geodesia, Análisis de Series Temporales.

ABSTRACT

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) provide users with high precision coordinate time series and enable measurements to be easily link to the International Terrestrial Reference Frame

(ITRF). They also give a significant tool to the scientific community to observe and model the dynamics of planet Earth. To better understand geodetic phenomena at the regional level, there is an increasing demand on detecting milimetric to sub-milimetric displacements. This situation requires improvements in the sensitivity of GNSS time series and emphasizes the importance of maintaining the solutions consistency over time.

In order to contribute to the localization of abrupt discontinuities automatically, it was decided to use non-parametric methods instead of functional approximations, since they do not require knowing the behaviour of the signal beforehand. Different mathematical algorithms of regime shift and change-point analysis were implemented to detect offset changes in the time series, called Block Average, Sequential Average and Cumulative Sum. Subsequently, an analysis of the obtained results was made, as well as a comparison with a classical method of maximization, referred here as estimator F, proposed by Basseville and Nikiforov.

The algorithms were applied to time series of 21 stations belonging to the SIRGAS-CON network. Each one of them presented known discontinuities of different magnitudes. After applying the algorithms, additional conditions were imposed on the results in order to minimize the amount of false positives detected, without sacrificing the detection sensitivity.

All the proposed algorithms were able to detect the jumps in the great majority of the analyzed stations. Its application becomes more robust when combining the techniques, and when comparing, for each station the locations of the offsets in the three components. The Sequential Average method was effective in 87% of the cases analyzed, while the Block Average was successful in 95% of them. The Average Block algorithm was the most efficient method for finding and quantifying jumps in GNSS coordinate time series.

Keywords: GNSS, Detection of discontinuities, Geodesy, Time Series Analysis.

INTRODUCCIÓN

Las series de tiempo GNSS han logrado incrementar su precisión durante la última década y son una de las herramientas fundamentales para materializar el Sistema de Referencia Terrestre a nivel global y regional, por su amplia distribución espacial y por su bajo costo de mantenimiento.

Las estaciones permanentes GNSS tienen en la geodesia un rol preponderante al monitorear la evolución de las coordenadas sobre la superficie terrestre (Bock and Melgar, 2016). Es por esto que las mismas son permanentemente evaluadas y mejoradas. A medida que la longitud de las series de tiempo aumenta, el efecto acumulativo que se produce debido a discontinuidades abruptas puede alterar significativamente las estimaciones de las coordenadas. Si no se corrigen, estas discontinuidades pueden dominar los errores en las estimaciones de la velocidad (Williams, 2003b). La precisión de las series de tiempo debe mantenerse estable para testear la competencia de los modelos geodinámicos de velocidades actuales, de forma de garantizar la consistencia del marco de referencia en el tiempo (Griffiths y Ray, 2016).

Por otra parte, la localización y caracterización de discontinuidades abruptas es fundamental para poder entender los procesos físicos que se derivan de las variaciones temporales de las coordenadas. Se han utilizado series temporales GNSS para estudiar numerosos efectos geofísicos como la deformación causada por terremoto pre, co- y post-sísmicos (Montillet et al., 2015, Bock et al., 1997), el ajuste isostático y el postglacial (Milne et al., 2001), el efecto de la carga hidrológica (Bevis et al., 2005, Tregoning et al., 2009), atmosférica (Petrov and Boy, 2004) y mareal (Bos et al., 2015). A modo de ejemplo, las deformaciones de la corteza debido a la carga atmosférica pueden alcanzar los 3 milímetros para la componente horizontal y son del orden de la decena de milímetros para la componente vertical (Petrov and Boy, 2004). Asegurar que las series de coordenadas GNSS se mantengan en precisiones milimétricas es una exigencia concreta de la comunidad científica para poder medir señales geofísicas pequeñas.

Hay numerosos trabajos dedicados a la localización de offsets en señales GNSS (Lavielle and Ludena, 2000; Rodionov, 2004; Perfetti, 2006; Montillet et al., 2015; Griffiths and Ray, 2016). Sin embargo, aún se utiliza con frecuencia la inspección directa de los datos de la estación para identificar discontinuidades en series de tiempo (Gazeaux et al, 2013), lo que se vuelve impráctico para redes de gran tamaño. En este trabajo buscamos analizar y comparar métodos que nos permitan encontrar automáticamente discontinuidades en las series de tiempo y analizar su sensibilidad, indicando el orden de magnitud de las discontinuidades que cada método propuesto es capaz de detectar.

Las discontinuidades en las series de coordenadas pueden atribuirse tanto a causas naturales como la ocurrencia de terremotos, así como a cambios en el instrumental o en el software utilizado para su procesamiento. Sin embargo hay alrededor de un tercio de las discontinuidades que tienen aún una causa desconocida (Gazeaux et al 2013). Detectar el salto es el primer paso para buscar su origen y eventualmente corregirlo si no es consecuencia de un desplazamiento real de la corteza.

A continuación, se expondrá la descripción de los algoritmos, el análisis y la cuantificación de los saltos encontrados en series de tiempo GNSS, que fueron abordados por un grupo de técnicas matemáticas que se denominan de Cambio de Régimen (Regime Shift) y Análisis de Cambio Puntual (Change-point Analysis).

DATOS UTILIZADOS

La fuente de información utilizada en el siguiente análisis corresponde a las series de coordenadas provistas por la red del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). La definición de SIRGAS es idéntica a la del Sistema Internacional de Referencia Terrestre y su realización es una densificación regional del Marco Internacional de Referencia Terrestre, en América Latina y El Caribe (Sánchez et al., 2013).

En la actualidad SIRGAS es materializado por una red de cerca de 400 estaciones GNSS de funcionamiento continuo con coordenadas de alta precisión, y sus variaciones a través del tiempo están dadas por un modelo de velocidades lineales a trozos. Esta realización recibe el nombre SIRGAS de Operación Continua (SIRGAS-CON) y es calculada semanalmente por los centros de procesamiento y combinación de SIRGAS. Las coordenadas semanales de las estaciones SIRGAS-CON se refieren a la época de observación y al mismo marco de referencia utilizado por el IGS para el cálculo de las órbitas finales de los satélites GNSS.

En el presente trabajo se tomaron como series de tiempo a las soluciones semanales ajustadas de estaciones pertenecientes a la red SIRGAS-CON, en las coordenadas de latitud, longitud y altura. La extensión temporal de las mismas es variable, pero en todos los casos las mediciones están acotadas entre la semana GPS 1000 y la 1650. Las soluciones semanales semilibres calculadas hasta la semana GPS 1400 (noviembre de 2006) han sido reprocesadas utilizando el IGS05 como marco de referencia. Las soluciones semanales hasta la semana 1650 (comprendidas entre el 5 de noviembre de 2006 y el 16 de abril de 2011) se refieren directamente al IGS05.

Siendo el objetivo principal implementar y comparar distintas técnicas matemáticas para identificar discontinuidades en las series de datos GNSS, se les exigió a las mismas que presentaran saltos comprobados, aunque de magnitudes variables, en una o más de sus componentes. Asimismo, la longitud de las series debía superar los cuatro años de datos, y en el caso de presentar gaps, estos no debían superar el 20% de la cantidad de muestras de la serie. Este conjunto de criterios redujo el número de estaciones de la red SIRGAS-CON a 21, cuya distribución espacial está representada en la Figura 1.

DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Las posiciones de las estaciones GNSS no son constantes sino que se ven modificadas por una serie de fenómenos físicos de diferentes magnitudes, tanto estacionales como esporádicas.

Durante el procesamiento de los datos, los centros de cómputo SIRGAS corrigen a las mediciones por la respuesta elástica de la corteza terrestre a las mareas oceánicas y atmosféricas, y aplican correcciones de los centros de fase de las antenas publicados por el IGS, por lo que las series de tiempo se ven libres de estas perturbaciones (Sánchez et al., 2013). Sin embargo, el efecto sobre la corteza debido a la carga por redistribución de masas de agua, así como por variaciones atmosféricas no mareales provenientes por ejemplo de cambios de temperatura, condiciones meteorológicas, cambios bruscos del relieve subyacente, entre otros, están aún presentes en las series de tiempo. Asimismo, las series de coordenadas se ven modificadas por acontecimientos abruptos como terremotos, cambios en el instrumental, etc. La superposición de estos eventos hace que no sea posible conocer a-priori el comportamiento de la serie, tanto en las coordenadas horizontales como en la vertical, a pesar que esta última se caracteriza por una marcada estacionalidad en la gran mayoría de las estaciones analizadas.

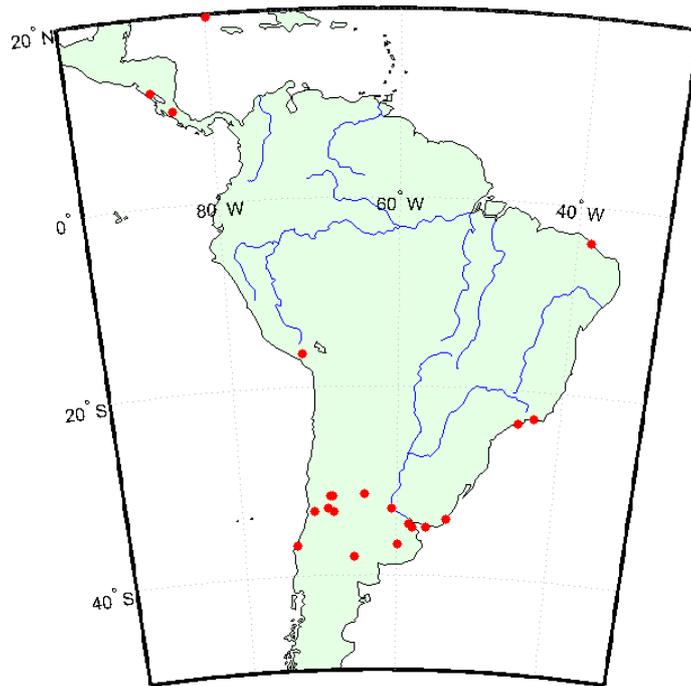


Figura 1 Distribución espacial de las 21 estaciones SIRGAS-CON utilizadas.
Figure 1 Spatial distribution of 21 SIRGAS-CON stations.

Es por esta razón que se propuso la búsqueda de discontinuidades abruptas mediante algoritmos que no requieran hacer un ajuste funcional o paramétrico de las series de tiempo GNSS. En este sentido, abordar esta problemática con métodos no paramétricos permite la detección de saltos a partir de estimadores estadísticos que se derivan de valores provistos por la misma serie, casi exclusivamente. El único parámetro externo que se debe incorporar es la longitud de las ventanas elegida para el desarrollo del algoritmo, cuyo valor se puede optimizar haciendo pruebas sucesivas. Por lo tanto, la principal ventaja sobre los métodos de ajuste funcional es que no se requiere hacer una suposición de la forma de la serie de coordenadas para detectar las discontinuidades.

En el análisis estadístico, la detección de puntos de cambio intenta identificar tiempos en los que cambia la distribución de probabilidad de una serie temporal (Taylor, 2000). En general, el problema se refiere tanto a ser capaces de detectar si ha ocurrido un cambio o no, como a identificar el tiempo de ocurrencia.

Se buscó detectar saltos aplicando algoritmos estadísticos de cambio de régimen, utilizando tanto ventanas fijas en un caso, como un análisis secuencial en otro. Dichos algoritmos involucran la comparación de valores medios de ventanas adyacentes que se desplazan sobre los datos. De acuerdo al método las mismas se solapan o no. La desventaja que presentan es que son susceptibles al tamaño de ventana elegida para efectuar los cálculos. Cualquier método que busque discontinuidades debe hacer una relación de compromiso entre la tasa de ocurrencias de falsas alarmas y asegurarse que toda discontinuidad sea encontrada. Es por esta razón que la búsqueda de la longitud de la ventana se vuelve un problema crítico.

Posteriormente se utilizó un análisis de cambio puntual para analizar si los resultados coincidían, eliminar los falsos positivos que se pudieran haber encontrado, y dar una medida de la probabilidad de que el cambio encontrado se haya producido.

Promedio en Bloque

En primer lugar se implementó el algoritmo de Promedio en Bloque. Este método encuentra saltos a partir de la comparación del valor promedio de dos ventanas adyacentes de longitud ajustable con un valor umbral elegido. En este caso, las ventanas no deben solaparse. El umbral fue determinado a partir del desvío estándar de cada una de las ventanas consideradas. Posteriormente se comparan los saltos encontrados en las tres componentes para hallar el resultado final.

Es importante notar que una vez definida la longitud de la ventana, solo podremos encontrar saltos entre los bloques, lo que conlleva a una estimación aproximada de la posición del salto, que tiene como error la cantidad de muestras de la ventana. Se puede repetir el procedimiento, cambiando el valor inicial en el que se toma la primera ventana, de manera de independizarse de ese problema. En esos casos el salto final quedará determinado por la variación más significativa dentro de cada ventana temporal.

Para hacer aún más robusto al método se recorren los datos en sentido ascendente y descendente. A los saltos encontrados se les exige como condiciones que el salto figure en el cálculo hacia adelante y hacia atrás, que en ambos cálculos la diferencia entre los valores medios sea del mismo orden y que el offset sea mayor que un 95% de las variaciones semanales. Esta serie de condiciones permitieron reducir el número de offsets que el programa registraba, de manera de minimizar la cantidad de falsos positivos.

Promedio Secuencial

En segundo lugar se implementó el algoritmo de Promedio Secuencial. Este método también compara el valor promedio de dos ventanas adyacentes, y nuevamente la elección de la longitud de la ventana tiene un rol significativo para encontrar los resultados óptimos. Sin embargo, a diferencia del algoritmo anterior, en este caso los datos se analizan secuencialmente, permitiendo que las ventanas se solapen entre sí.

El algoritmo comienza tomando una ventana inicial, a la que se le calcula su valor promedio y un estimador del desvío no sesgado. A partir de estos datos se calculan unos límites superior e inferior sumando o restándole a la media local un múltiplo del desvío. Luego, se analiza punto a punto si los elementos de la serie de tiempo exceden por exceso o por defecto los límites propuestos. (Riley, 2008)

Cuando se encuentra un posible offset, el siguiente bloque de datos es examinado para confirmar o rechazar el salto. Se toma una nueva ventana que parte desde el punto encontrado y que es de la misma longitud que la ventana inicial, y se le calcula el promedio local. Posteriormente se testea si el promedio local supera los límites impuestos. En este caso el salto es confirmado y se utiliza a este valor medio como referencia de los nuevos límites, desde esa posición en adelante.

En este algoritmo se analizan los datos en forma ascendente y descendente, con el fin de detectar posibles offsets que solo cumplen las condiciones especificadas en una sola dirección. Y a las discontinuidades encontradas también se les exige que superen al 95% de las variaciones semanales.

Suma Acumulativa

El método de Suma Acumulativa (CUSUM) es un algoritmo de Análisis de Cambio Puntual (Change-point Analysis, CPA) que se implementa en datos ordenados cronológicamente, para analizar los cambios en los valores medios, y localizar tanto visualmente como matemáticamente saltos en las series de tiempo (Basseville and Nikiforov, 1993). El método permite identificar si han ocurrido uno o más cambios abruptos, y para cada posible valor encontrado, proporcionan un nivel de confianza que indica la probabilidad de que se haya producido un salto y un intervalo de confianza, que indica cuándo puede haber ocurrido ese cambio. Si bien este método no es un sustituto de los otros algoritmos descritos anteriormente, puede proporcionar información adicional y utilizarse de manera complementaria.

Cuando se analizan conjuntos de datos especialmente grandes, este tipo de algoritmo es preferible para controlar la representación gráfica de los datos. Una desventaja del método CUSUM, es que no se puede implementar en series que aún estén recopilando información, sino que requiere que la serie esté completa. En cambio, los métodos secuenciales pueden ser utilizados a medida que se incorpora nueva información y la serie se va actualizando.

Dada una serie de datos ordenados cronológicamente x_1, x_2, \dots, x_n . En primer lugar se calcula el valor promedio de toda la serie. $(\bar{X} = 1/n \sum_{i=1}^n x_i)$. Se define a la serie Suma Acumulativa, de $n+1$ elementos, tomando como primer elemento al cero. Para cada uno de los elementos posteriores, se realiza la adición acumulativa entre el valor previo y la diferencia entre el dato i -ésimo y el valor promedio de toda la serie. La expresión general de esta función es, entonces:

$$\begin{cases} S_0 = 0 \\ S_i = S_{i-1} + (x_i - \bar{X}) \end{cases}, \text{ con } i = 1, \dots, n \quad \text{ec. (1)}$$

Al llegar al último elemento, estas diferencias se cancelan, de modo que el último elemento de la función siempre equivale a cero ($S_n = 0$). (Basseville and Nikiforov, 1993)

Al graficar la función S , se obtiene información del comportamiento de la serie original. Su pendiente punto a punto indica la importancia de cada valor respecto del promedio acumulado. Supongamos que durante un período de tiempo los valores tienden a estar por encima del promedio general. La mayoría de los valores agregados a la suma acumulada serán positivos y la suma aumentará. Por lo tanto, un segmento del gráfico con una pendiente positiva indica un período donde los valores tienden a estar por encima de la media general. Del mismo modo, un segmento con una pendiente hacia abajo indica un período de tiempo en el que los valores tienden a estar por debajo del promedio general. Un cambio abrupto en la pendiente indica la presencia del posible salto.

Para determinar un nivel de confianza del valor encontrado, se toma como estimador de la magnitud del cambio a la variable S_{diff} que representa la diferencia entre el máximo y el mínimo valor que toma la función Suma Acumulativa:

$$S_{diff} = \max_{i=1, \dots, n} S_i - \min_{i=1, \dots, n} S_i \quad \text{ec. (2)}$$

Posteriormente se reordena aleatoriamente la serie de datos iniciales un número grande de veces ($N > 1000$), haciendo un muestreo sin repetición, estableciendo una base de comparación para la estimación del salto. Sobre estas nuevas series se calcula la suma acumulada, así como la diferencia entre valor máximo y mínimo para la posición de interés. Una vez hecho esto, se comparan dicha diferencia en las series reordenadas con la diferencia original S_{diff} . El salto será considerado válido si la diferencia entre extremos es mayor en la serie original que en las re combinaciones, al menos en un 95% de las veces.

Estimador F

Se implementó otro método clásico, comúnmente implementado en la detección de discontinuidades, que se utiliza para series de tiempo off-line. El algoritmo consiste en el cálculo y la búsqueda de extremos de una función que depende para cada punto de la diferencia entre las medias hasta ese punto y posteriores al mismo (Williams, 2003b; Basseville and Nikiforov, 1993). Dicho estimador tiene la expresión:

$$F(p) = p \cdot (N - p) \cdot (\bar{X}_1 - \bar{X}_2)^2 \quad \text{ec. (3)}$$

, siendo

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^p x_i}{p} \quad \text{ec. (4)}$$

$$\bar{X}_2 = \frac{\sum_{i=p+1}^n x_i}{n - p} \quad \text{ec. (5)}$$

Este cálculo se basa en la idea de que una variación brusca de offset modifica el promedio antes y después del cambio. Al analizar cuán bien se ajustan los valores de la serie de tiempo a los dos promedios estimados para distintos valores de p , aquel valor que genere un mínimo o máximo de la función $F(p)$ será candidato a ser el último punto antes del cambio.

Cotejar los valores encontrados con este procedimiento clásico sirvió como comparación externa de los otros algoritmos implementados.

RESULTADOS

En la Figura 2 se ilustra la aplicación del método Promedio en Bloque. La serie de tiempo en color azul representa a la coordenada vertical de la estación MZAC en función de la semana GPS, una vez removida su media aritmética. Se marcaron con funciones cajón los bloques utilizados en una de las iteraciones. Puede observarse que las ventanas no se solapan. Superpuesto en color verde se observa el promedio de cada bloque considerado. Cuando la diferencia entre los promedios excede el valor umbral calculado para la serie de tiempo se determina la estimación de la posición del salto, marcado en el gráfico con una línea vertical roja. Se puede apreciar claramente que para las

muestras de la ventana posterior al salto hallado, el valor promedio no pertenece a la ventana anterior.

Al aplicar el método de Promedio en Bloque para las series de tiempo analizadas se pudieron ubicar las ventanas que contenían los offsets para todas las estaciones. En la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para las estaciones AREQ, CONZ, MEXI, MZAC en las coordenadas Este, Norte y Altura, expresadas en milímetros. El programa determina aquellos bloques que cumplen las condiciones para que se encuentre una discontinuidad abrupta, y marca su primer elemento en el gráfico con una línea vertical verde. Luego de aplicarse las restricciones se determina la posición del salto más probable, exigiéndole que se encuentre en más de una componente. El salto determinado queda marcado con una línea punteada vertical roja.

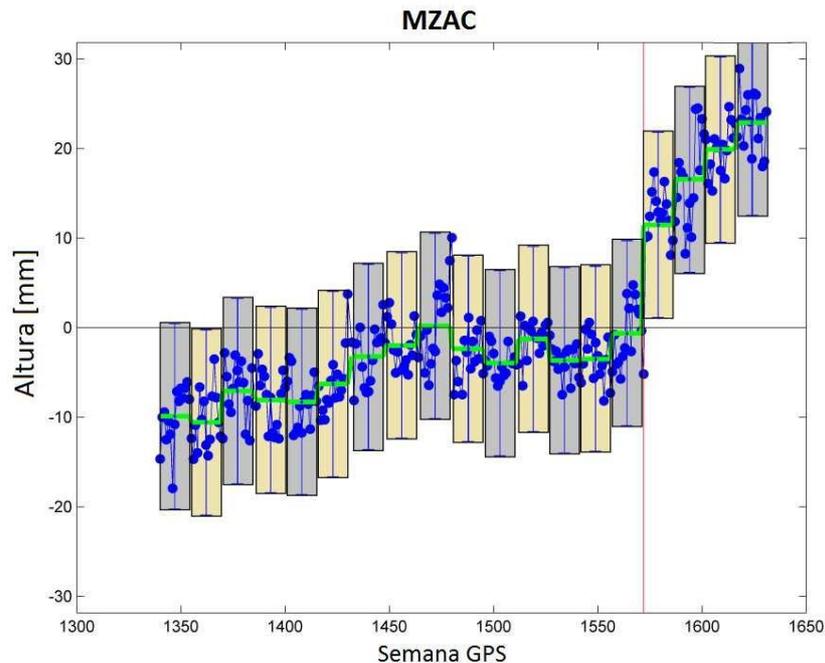


Figura 2 Aplicación del método Promedio en Bloque para la coordenada vertical sin media de la estación MZAC.
Figure 2 Implementation of the Block Average method for the vertical coordinate of station MZAC.

Posteriormente se implementó el método de Promedio Secuencial. En la Figura 4 se ilustra la aplicación del algoritmo para la coordenada Este de la estación IGM1, representado con una serie de puntos azules. En color gris se encuentra representada la primera ventana analizada, cuyo centro vertical es el promedio de la ventana, y su alto está acotado por los límites inferior y superior calculados, prolongados luego en líneas azules horizontales gruesas. Utilizando ventanas que se solapan secuencialmente, se estudian los puntos sucesivos. Cuando un punto excede dichos límites se analiza la media de la ventana que lo contiene, marcada en verde sobre la ventana local. Si la media está contenida por los límites azules, el salto es rechazado (caso marcado en el gráfico como "Posible Salto"). Si por el contrario la media excede los límites impuestos es confirmado (caso marcado en el gráfico como "Verdadero Salto"). Nuevos límites, ilustrados con líneas azules horizontales, son calculados desde ese punto en adelante.

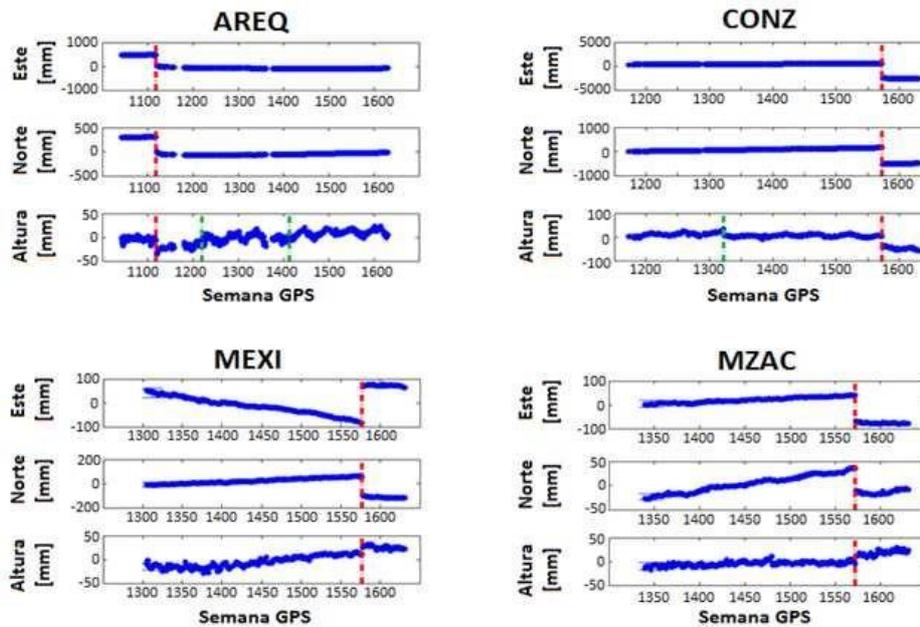


Figura 3 Resultados del método Promedio en Bloque en las coordenadas Este, Norte y Altura para las estaciones AREQ, CONZ, MEXI y MZAC.
Figure 3 Results of the Block Average method for the coordinates East, North and Height on AREQ, CONZ, MEXI and MZAC stations.

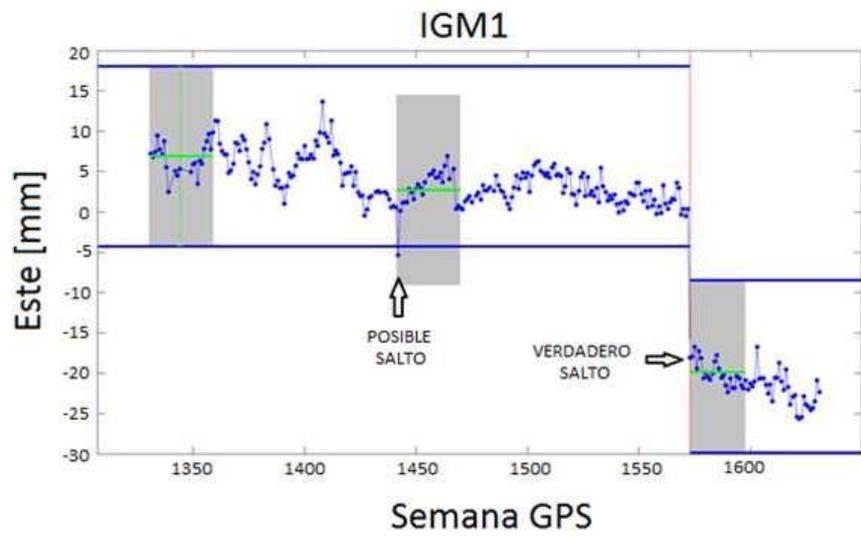


Figura 4 Aplicación del método Promedio Secuencial para la coordenada Este de la estación IGM1.
Figure 4 Implementation of the Sequential Average method for the East coordinate of the IGM1 station.

El análisis de las componentes Este, Norte y Altura se muestra en la Figura 5. Se eligieron las mismas estaciones para hacer luego un análisis comparativo entre los métodos. Las coordenadas están representadas en azul. Y se muestran en líneas verticales verdes los posibles saltos hallados, y en líneas verticales rojas los saltos verdaderos.

El método de Suma Acumulativa permite calcular y luego visualizar con facilidad donde pudo haber ocurrido un cambio abrupto de la serie de tiempo. En la Figura 6 se puede observar en color azul la función Suma Acumulativa en función de la Semana GPS, para las estaciones AREQ, CONZ, MEXI, MZAC. Se puede notar a simple vista un cambio abrupto en el comportamiento de la función, dado por un máximo o un mínimo absoluto. Superpuestas en color rojo están representadas, a modo de ejemplo, las funciones Suma Acumulada de 100 muestras reordenadas aleatoriamente de la serie

original. Esto nos permite ver a simple vista, que el comportamiento de cambio abrupto que estamos detectando en la serie Suma, es en efecto un cambio real de la serie de tiempo original.

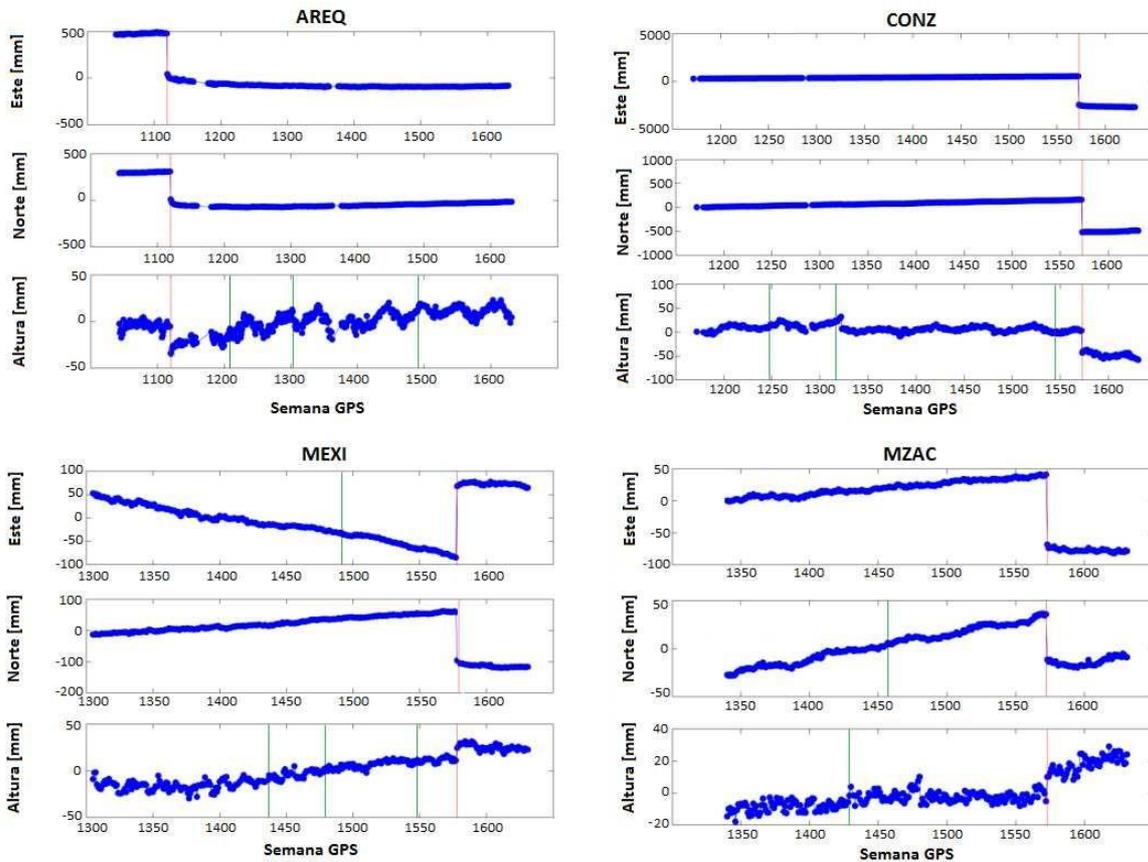


Figura 5 Resultados del método Promedio Secuencial en las coordenadas Este, Norte y Altura para las estaciones AREQ, CONZ, MEXI y MZAC.

Figure 5 Results of the Sequential Average method for the coordinates East, North and Height on AREQ, CONZ, MEXI and MZAC stations.

En la Tabla 1 se muestran para cada una de las estaciones los órdenes de magnitud de los saltos de mayor magnitud detectados en cada una de las componentes de las coordenadas con el método de Promedio en Bloque. En la última columna además se asocia a cada salto ubicado en el tiempo por la semana GPS, con su origen dado por un evento sísmico de magnitudes significativas.

- El 23 de junio de 2001 corresponde a un sismo de magnitud 8.4 en el sur de Perú.
- El 27 de febrero de 2010 corresponde a un terremoto con epicentro en el mar chileno que alcanzó una magnitud de 8,8 M_w .
- El 8 de enero de 2009 corresponde al sismo de Costa Rica que tuvo una magnitud de 6,1 M_w según el USGS.
- El 4 de abril de 2010, corresponde al Terremoto de Sierra El Mayor-Cucapah, que alcanzó una magnitud de 7,2 M_w .

Hay 4 estaciones en las que se evidencia un salto como resultado de los algoritmos, a la vez que es corroborado visualmente por los analistas, y sin embargo, estas discontinuidades no se deben a eventos sísmicos. Las mismas pueden ser atribuidas a cambios en el hardware del equipo de medición, así como a cambios en la estrategia de procesamiento de la información.

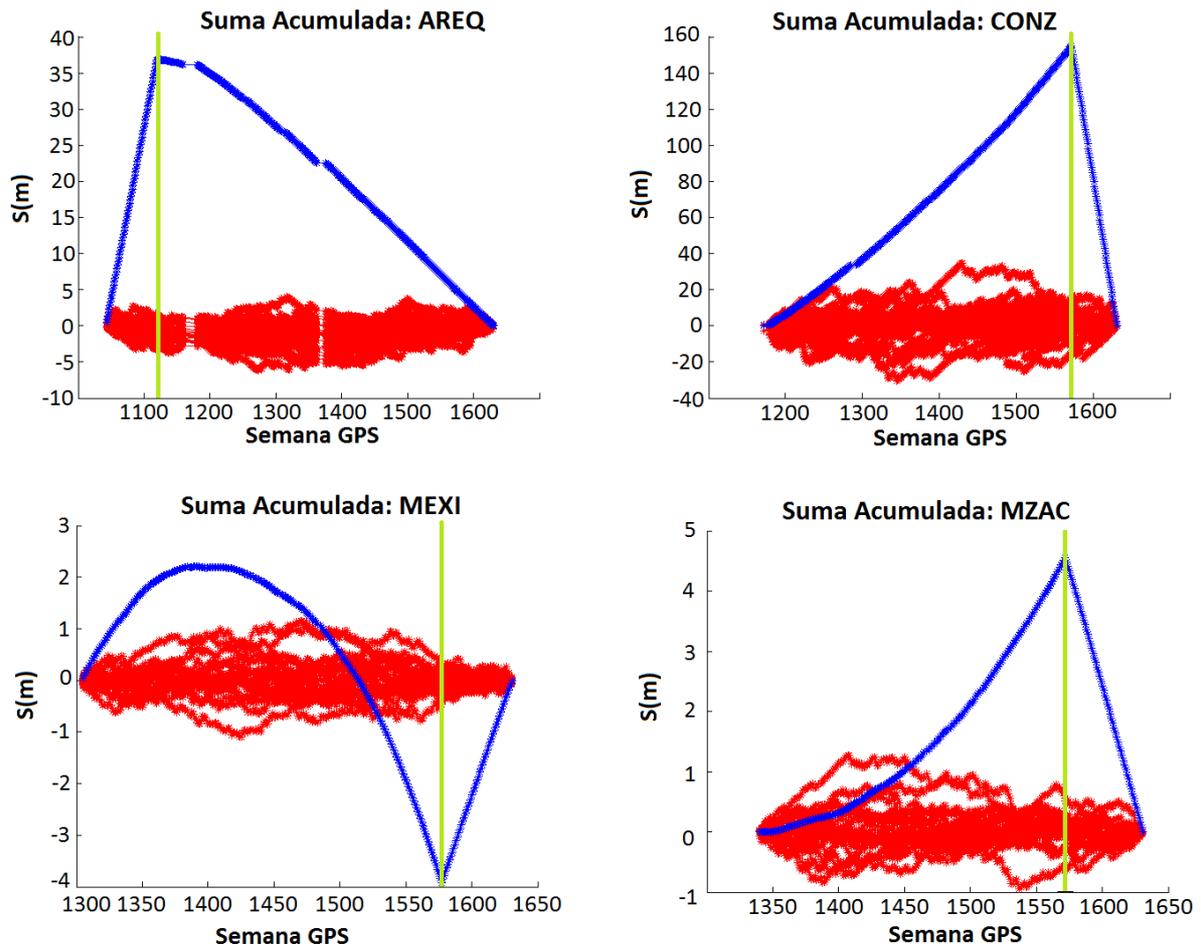


Figura 6 Gráficos de Suma Acumulativa, componente este, de las estaciones AREQ, CONZ, MEXI y MZAC.
Figure 6 Cumulative Sum graphs for the East component of AREQ, CONZ, MEXI and MZAC stations.

DISCUSIÓN

Haciendo una comparación entre los métodos mencionados podemos decir que el algoritmo de Promedio en Bloque es el más sencillo de implementar, tiene bajo costo computacional y es el que mejor maneja las pendientes pronunciadas (o drift) si las hubiera en los datos de entrada, ya que trabaja solo con los promedios de cada ventana.

La limitación más significativa del algoritmo de detección de salto es que utiliza ventanas de análisis de un tamaño fijo, aunque seleccionable. En consecuencia, la magnitud de los saltos detectados no son necesariamente las de los datos, sino que responden simplemente al cambio en el valor medio en el límite de las dos ventanas de análisis.

El parámetro crítico a considerar para que el método funcione de forma óptima es el tamaño de la ventana. Al modificar la cantidad de muestras en las ventanas a comparar, cambia el rango que se utiliza para confirmar o rechazar un salto. Si se aceptan ruidos más grandes se puede dificultar la detección de saltos más pequeños. Para elegirlo se evalúa la relación de compromiso entre resolver adecuadamente las discontinuidades y un mejor promedio del ruido. El valor óptimo encontrado fue, en la mayoría de los casos, el 8% de la cantidad de datos disponibles y, en todos los casos, superior al 5% de los valores de la muestra.

Como el programa detecta discontinuidades solo entre ventanas adyacentes, esto implica que el salto puede ser detectado sólo en ciertos lugares en el registro. Esta limitación fue salvada cambiando la posición inicial de las ventanas, de manera iterativa, de forma de pasar por todos los puntos del registro.

	Este (mm)	Norte (mm)	Altura (mm)	Evento Sísmico
AREQ	433,2	297,8	27,5	23/06/01
AZUL	23,8	1,66	13,4	27/02/10
BRFT	14,3	5,9	1,6	-
CBSB	6,7	1,2	0,4	-
CFAG	33,5	16,8	1,2	27/02/10
CONZ	2977,3	681,3	46,2	27/02/10
ETCG	5,8	15,3	5,4	08/01/09
IGM1	18,4	4,21	8,22	27/02/10
LHCL	66,4	6,2	3,79	27/02/10
LPGS	17,4	1,66	0,72	27/02/10
MEXI	152,5	155,2	13,3	04/04/10
MZAC	109,3	47,2	15,2	27/02/10
MZAE	106,5	37,9	17,5	27/02/10
ONRJ	8,0	5,6	9,5	-
SANT	257,8	144,5	20,5	27/02/10
UBAT	30,7	3,5	1,2	-
UCOR	23,0	10,6	0,7	27/02/10
UNRO	20,1	6,5	3,2	27/02/10
UNSJ	29,6	17,1	0,1	27/02/10
UYMO	12,1	1,3	9,5	27/02/10
UYRO	7,1	0,5	5,8	27/02/10

Tabla 1 Estimaciones de la magnitud de los saltos detectados con el método de Promedio Secuencial, en las 3 componentes de cada estación analizada, y la fecha del evento sísmico asociado si lo tienen.

Table 1 Estimates of the magnitude of the jumps detected with the Sequential Average method, in the 3 components of each station analysed, and the date of the associated seismic events.

Analizando la totalidad de las series de tiempo con este método se observa que el número de casos favorables que detecta es significativamente menor a los otros métodos. Por lo que se lo considera el más eficaz en reducir la cantidad de falsos positivos. La componente vertical, por su gran variabilidad, es aquella en la que se detectan más saltos posibles. Sin embargo es capaz de confirmarlos o rechazarlos exigiéndole condiciones adicionales, como estar presente en más de una coordenada.

Para una misma estación, las componentes horizontales tienen valores similares, tanto el orden de magnitud de sus variaciones semanales como en el de sus parámetros estadísticos, pero no ocurre lo mismo en la coordenada vertical. En la Figura 3 se puede ver el caso de la estación Arequipa (sup. derecha), en la que el salto en la componente vertical no es confirmado debido a que la variación de la altura presenta una gran variabilidad, por lo que al exigirles a los posibles candidatos que la discontinuidad supere cierto valor umbral, dicha condición no se verifica. En estos casos, la detección en las otras dos coordenadas y el análisis del observador son necesarios para confirmar el salto.

El método de Promedio Secuencial tiene la capacidad de detectar un salto en cualquier punto en el registro de datos, excepto en las primeras n muestras de la serie (siendo n el largo de la ventana elegida). Para salvar esta dificultad se puede realizar el análisis de los datos en ambas direcciones.

Al analizar los resultados que obtenemos con este método podemos apreciar que encuentra varios falsos positivos, especialmente en la componente vertical que tiene una variación semanal más marcada que el resto. Al igual que en el algoritmo anterior se observa que las condiciones externas que se les exigen a los posibles candidatos son fundamentales para minimizar la cantidad de discontinuidades encontradas. En especial el requisito de estar presente en más de una componente.

Una desventaja del método Promedio Secuencial es que su efectividad depende fuertemente del promedio calculado al principio de cada régimen, por lo que nuevamente es significativo el tamaño de

la ventana utilizada. En este trabajo se probaron con valores que variaban desde el 5 al 15% de la cantidad de muestras de la serie de tiempo. El valor óptimo que se encontró fue, en la mayoría de las estaciones cercano al 8%. Otra dificultad que se presenta es implementarlo en estaciones con pendientes pronunciadas, ya que a partir de un cierto valor, el mismo comportamiento de la serie genera que tanto un punto como la media de la ventana subsiguiente se excedan de los parámetros iniciales.

Analizando ahora el último método, la principal ventaja del método Suma Acumulativa es que nos permite identificar a simple vista, a partir de su gráfico, la posición de los saltos más significativos y validar el resultado obtenido por los otros métodos en caso de que haya encontrado más de un salto. Y dicha información se puede verificar mediante la comparación con la serie reordenada para obtener un nivel de confianza. El salto hallado será considerado válido si la diferencia entre extremos es mayor en la serie original que en las recombinaciones en al menos un 95% de las veces. La desventaja es que la confiabilidad se vuelve significativa si comparamos con un número grande de series (del orden de 1000) y eso genera un mayor costo computacional. Este método puede ser considerado complementario de los anteriores ya que no permite cuantificar la dimensión del salto por sí mismo.

Implementando este método a continuación de los dos anteriores, se puede resolver con mayor efectividad el problema de encontrar la ubicación de los saltos, ya que se excluyen aquellos valores hallados previamente que eran falsos positivos.

En la Figura 7 se observan dos gráficos para cada una de las estaciones AREQ, CONZ, MEXI, MZAC. En la imagen superior está representada la coordenada Este en función de la semana GPS, mientras que en la imagen inferior está graficado el estimador F para el mismo período de tiempo. Se puede apreciar que el extremo del estimador F coincide en el tiempo con la posición del salto en la coordenada.

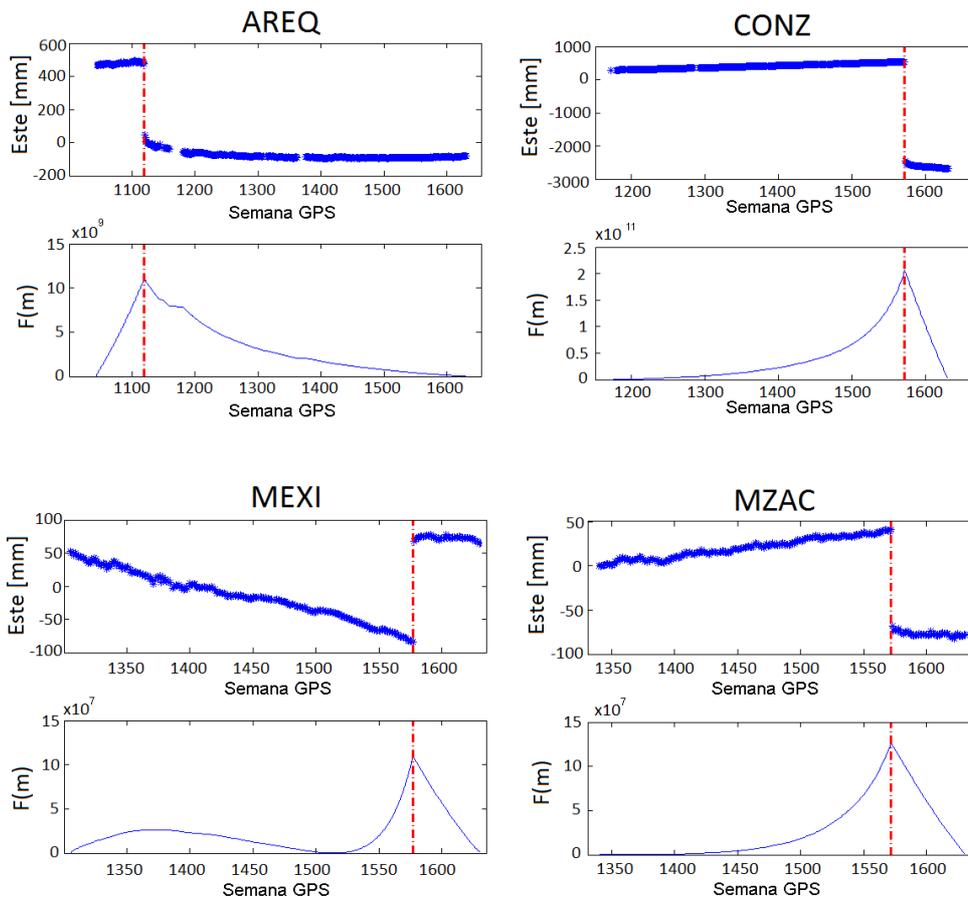


Figura 7 (Arriba) Gráficos de la componente este, de las estaciones AREQ, CONZ, MEXI y MZAC. (Abajo) Estimador F en función del tiempo.

Figure 7 (Above) East component graphs of AREQ, CONZ, MEXI and MZAC stations. (Below) Graph of F-estimator over time.

La principal ventaja de este método es su sencilla implementación automática y su bajo costo computacional. Sin embargo, no funciona adecuadamente en series de tiempo con una marcada tendencia lineal.

Otra ventaja de los métodos no paramétricos frente al estimador F, es su capacidad de encontrar más de una posible discontinuidad en cada serie de tiempo. Como se ilustra en la Figura 8, el método de Promedio en Bloque es capaz de resolver dos saltos en las coordenadas horizontales de la estación UCOR, mientras que el estimador F solo encuentra el más significativo de ellos para cada coordenada. En este caso, como las posiciones del salto encontradas con el estimador F son diferentes entre las dos coordenadas horizontales, en este caso el método no resolvería el problema.

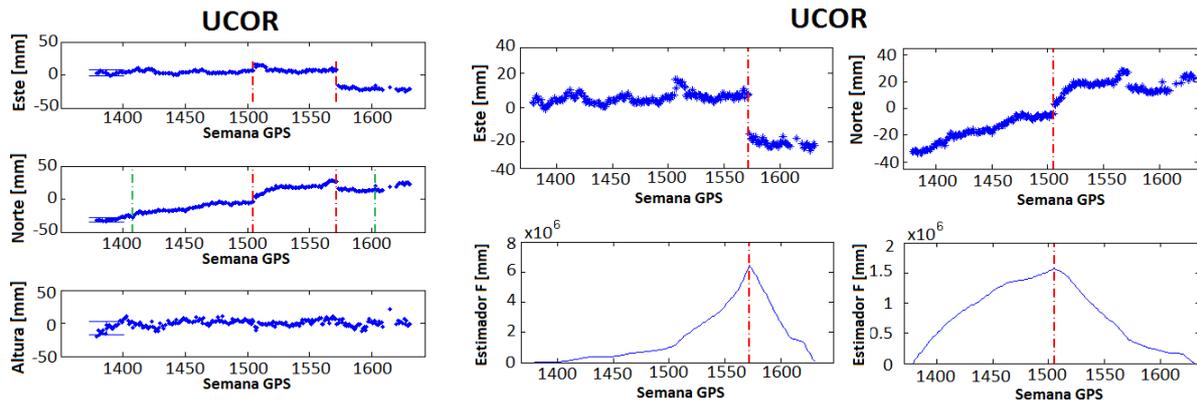


Figura 8 (Izquierda) Series de tiempo para la estación UCOR. Se puede observar que el algoritmo de Promedio en Bloque es capaz de resolver dos saltos en las coordenadas horizontales. (Derecha) Coordenada Este y Norte de la misma estación. Se marca el único salto hallado con el estimador F.

Figure 8 (Left) Time series for the UCOR station. It can be observed that the Average Block algorithm is able to solve two jumps in the horizontal coordinates. (Right) East and North coordinates of the same station. Only one jump is found with the estimator F.

CONCLUSIONES

Analizando la variabilidad de los datos de entrada, se observa que en las coordenadas horizontales Este y Norte la variación semanal es, en el 95% de los casos, menor a los 3mm. En la coordenada vertical, la variación semanal es, en el 95% de los casos, menor a los 8mm para la gran mayoría de las estaciones.

Los algoritmos Promedio en Bloque y Promedio Secuencial, junto con un gráfico de Suma Acumulativa, fueron razonablemente eficaces para encontrar saltos en series de tiempo de coordenadas GNSS. Su aplicación se vuelve más robusta al combinar las técnicas y al cotejar para cada estación las ubicaciones de los offsets en las diferentes componentes.

El parámetro crítico de los primeros métodos fue la longitud de la ventana y se buscó un compromiso entre aceptar señales con mayor cantidad de ruido y una buena resolución de las discontinuidades. Este se vuelve determinante para la detección del salto, necesitando en todos los casos una cantidad mayor a 12 muestras, valor que ronda el 8% de la longitud de la serie de datos.

Para optimizar el resultado y descartar falsos positivos, a los saltos encontrados se les exigieron distintas condiciones para aceptarlos como verdaderos. En particular se consideraron aquellos cuya amplitud superara un valor umbral. El mismo fue calculado, ordenando de forma creciente todas las variaciones semanales de cada componente, y estableciendo como valor de corte aquel que superara al 95% de las variaciones. Otra condición que se impuso a los resultados fue optar, en caso de existir saltos consecutivos, por aquellos que estuvieran presentes en ambas coordenadas horizontales y cuya amplitud fuera de mayor consideración. Estos requisitos razonables permitieron mejorar la calidad de las soluciones encontradas.

En la Figura 9 están representadas la cantidad de falsos positivos que obtienen cada uno de los métodos implementados para la determinación del salto en la coordenada Este. El Promedio Secuencial encuentra el salto con buena eficacia, pero en estaciones con gran deriva encuentra también otros saltos, en puntos que simplemente se salieron de los límites impuestos por la pendiente misma de la señal. El método de Suma Acumulativa encuentra la solución verdadera en la mayoría

de los casos, pero también presenta gran cantidad de falsos positivos. El método del Estimador F es eficaz para aquellas estaciones cuyas coordenadas se mantienen cercanas a un valor constante antes y después del salto, se vuelve ineficaz si las series temporales presentan una marcada pendiente agregando otro punto posible de discontinuidad. La principal desventaja de estos dos últimos métodos es que ambos deben ser apoyados por un análisis visual del gráfico, en detrimento de la automatización de la búsqueda de discontinuidades. A su vez no permiten cuantificar el salto encontrado.

Tanto el algoritmo de Promedio en Bloque como el Promedio Secuencial son capaces de encontrar las coordenadas de los saltos en las estaciones estudiadas para la mayoría de las estaciones. A su vez, ambos métodos son capaces de resolver más de un salto para cada serie de coordenadas. Teniendo en cuenta la totalidad de los casos analizados se puede concluir que el método de Promedio Secuencial fue eficaz en un 87%, siendo superado por el método Promedio en Bloque, que encontró con éxito las discontinuidades en el 95%.

La problemática que el algoritmo de Promedio Secuencial no es capaz de resolver adecuadamente, se da para las series de tiempo con pendientes pronunciadas. Este drift en los datos de entrada, provoca que la media aumente (o disminuya) paulatinamente, y genera que eventualmente se salga del intervalo definido a partir de la ventana de entrada.

Se puede observar que el Método de Promedio en Bloque encuentra la solución verdadera generando la menor cantidad de soluciones espurias, y por lo tanto es el más eficaz a la hora de detectar discontinuidades automáticamente.

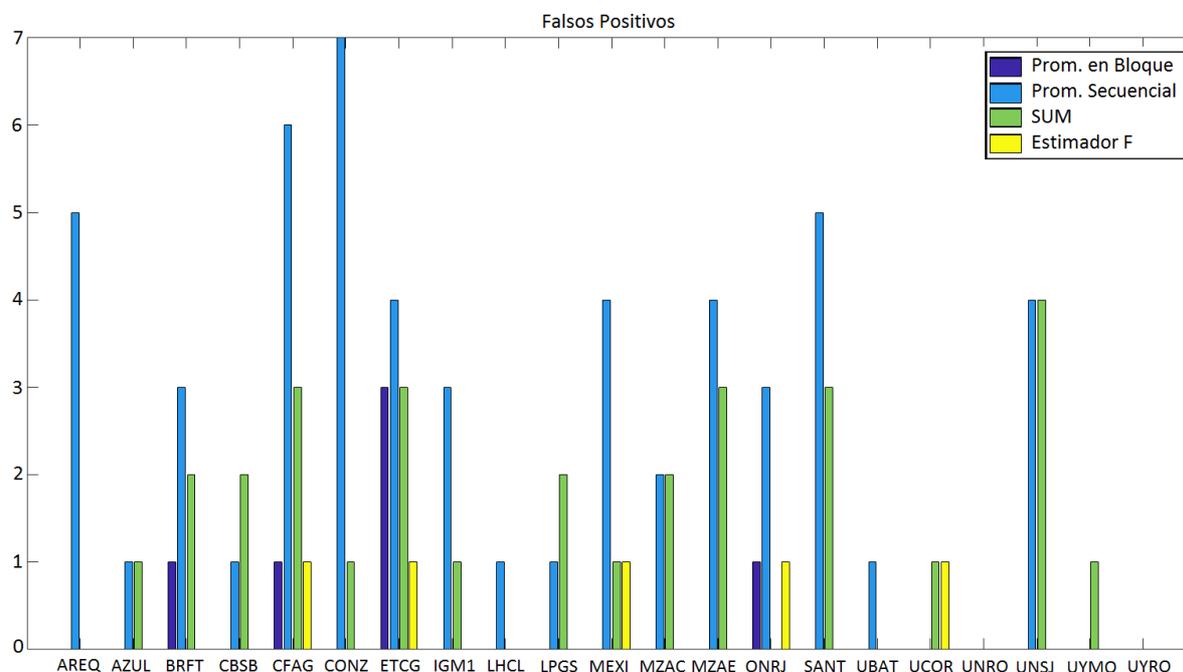


Figura 9 Gráfico de barras que muestra el número de falsos positivos hallados con cada método en la coordenada horizontal Este para cada estación analizada.

Figure 9 Bar graph showing the number of false positives found with each method in the East horizontal coordinate of every station analyzed.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la red SIRGAS y a sus centros de procesamiento por la provisión de las soluciones semanales de coordenadas.

REFERENCIAS

- Basseville, M., y Nikiforov, I. V. (1993). *Detection of abrupt changes: Theory and application*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Bevis, M. (2005). Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. *Geophysical Research Letters*, 32(16), L16308. doi: 10.1029/2005GL023491

- Bos, M. S., Penna, N. T., Baker, T. F., y Clarke, P. J. (2015). Ocean tide loading displacements in western Europe: 2. GPS - observed anelastic dispersion in the asthenosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(9), 6540–6557. doi: 10.1002/2015JB011884
- Bock, Y., Wdowinski, S., Fang, P., Zhang, J., Williams, S., Johnson, H., ... Gurtner, W. (1997). Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Continuous measurements of regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B8), 18013–18033. doi: 10.1029/97JB01379
- Bock, Y., y Melgar, D. (2016). Physical applications of GPS geodesy: A review. *Reports on Progress in Physics*, 79(10), 106801. doi: 10.1088/0034-4885/79/10/106801
- Gazeaux, J., Williams, S., King, M., Bos, M., Dach, R., Deo, M., ... Webb, F. H. (2013). Detecting offsets in GPS time series: First results from the detection of offsets in GPS experiment: DETECTING OFFSETS IN GPS TIME SERIE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2397–2407. doi: 10.1002/jgrb.50152
- Griffiths, J., y Ray, J. (2016). Impacts of GNSS position offsets on global frame stability. *Geophysical Journal International*, 204(1), 480–487. doi: 10.1093/gji/ggv455
- Lavielle, M., Ludeña, C., y Ludena, C. (2000). The Multiple Change-Points Problem for the Spectral Distribution. *Bernoulli*, 6(5), 845. doi: 10.2307/3318759
- Milne, G. A. (2001). Space-Geodetic Constraints on Glacial Isostatic Adjustment in Fennoscandia. *Science*, 291(5512), 2381–2385. doi: 10.1126/science.1057022
- Montillet, J.-P., Williams, S. D. P., Koulali, A., y McClusky, S. C. (2015). Estimation of offsets in GPS time-series and application to the detection of earthquake deformation in the far-field. *Geophysical Journal International*, 200(2), 1207–1221. doi: 10.1093/gji/ggu473
- Perfetti, N. (2006). Detection of station coordinate discontinuities within the Italian GPS Fiducial Network. *Journal of Geodesy*, 80(7), 381–396. doi: 10.1007/s00190-006-0080-6
- Petrov, L. (2004). Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations. *Journal of Geophysical Research*, 109(B3), B03405. doi: 10.1029/2003JB002500
- Riley, W. J. (2008). Algorithms for frequency jump detection. *Metrologia*, 45(6), S154–S161. doi: 10.1088/0026-1394/45/6/S21
- Rodionov, S. N. (2004). A sequential algorithm for testing climate regime shifts: ALGORITHM FOR TESTING REGIME SHIFTS. *Geophysical Research Letters*, 31(9), n/a-n/a. doi: 10.1029/2004GL019448
- Rodionov, S.N. (2005). A brief Overview of the regime shift detection methods. Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean. *Journal of Large-scale disturbances and recovery in aquatic ecosystems: challenges for management toward sustainability*, 17-24.
- Sánchez, L., Seemüller, W., Drewes, H., Mateo, L., González, G., da Silva, A., ... Cimbaro, S. (2013). Long-Term Stability of the SIRGAS Reference Frame and Episodic Station Movements Caused by the Seismic Activity in the SIRGAS Region. In Z. Altamimi y X. Collilieux (Eds.), *Reference Frames for Applications in Geosciences* (Vol. 138, pp. 153–161). doi: 10.1007/978-3-642-32998-2_24
- Taylor, W.A. (2000). Change point analysis: a powerful new tool for detecting changes. Deerfield, IL: Baxter Healthcare Corporation. Recuperado de <http://www.variation.com/cpa/tech/changepoint.html>
- Tregoning, P., Watson, C., Ramillien, G., McQueen, H., y Zhang, J. (2009). Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS: HYDROLOGIC DEFORMATION FROM SPACE. *Geophysical Research Letters*, 36(15), n/a-n/a. doi: 10.1029/2009GL038718
- Williams, S. D. P. (2003). Offsets in Global Positioning System time series: OFFSETS IN GPS TIME SERIES. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6). doi: 10.1029/2002JB002156

Recibido: Abril, 2018

Aceptado: Septiembre, 2019

MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES PARA LA SUBREGIÓN A1 DEL PLAN MAESTRO DEL RIO SALADO Y PARA LA CIUDAD DE JUNIN

DIGITAL ELEVATION MODEL FOR THE A1 SUB-REGION OF THE SALADO RIVER MASTER PLAN AND FOR THE CITY OF JUNIN

María Eugenia Gomez^{1,2}, Raul Perdomo^{1,2}, Lautaro Simontacchi¹, Santiago Perdomo^{1,2}, María Florencia Tavarone¹, Daniel Del Cogliano^{1,2}, Martín Vazquez¹, Nicolás Tessone¹

1 Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata. Paseo del Bosque S/N, La Plata - Argentina.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Godoy Cruz 2290, CABA - Argentina
Email: megomez@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

El presente trabajo presenta un modelo digital de elevaciones (MDE) para la subcuenca A1, perteneciente a la cuenca del Río Salado y otro MDE para la ciudad de Junín. Es decir, el trabajo se dividió en dos regiones; una macro (nivel de cuenca) y una mucho más pequeña (ciudad de Junín). La elaboración de los MDE para cada región implicó analizar modelos de terreno globales derivados de la misión SRTM y del sensor ASTER, analizar su error en vertical y validar la información. Esto fue realizado a partir de puntos de control (GCP, por sus siglas en inglés) representados por puntos de GPS/nivelación para el caso del MDE de la cuenca, o con ménsulas ubicadas en la ciudad de Junín para el caso del MDE correspondiente al caso urbano de esta ciudad. También fue necesario incorporar herramientas como modelos geopotenciales globales y el modelo de transformación de alturas tdaGEOBA.

Los principales resultados alcanzados pueden resumirse del modo siguiente: 1-el modelo SRTM3 resultó ser el más apropiado para modelar la topografía a nivel de la subcuenca A1; 2-el modelo de geoide global EGM08 corregido por una constante constituye un herramienta muy precisa para extrapolar el modelo tdaGEOBA al sur de Santa Fe; este último resultó adecuado para corregir a los MDE (una vez desafectados del modelo de geoide EGM96) en la toda la región de estudio; 3- en las zonas llanas de esta región el modelo SRTM3 corregido presenta errores con una desviación estándar muy cercana al metro; 4- la ciudad de Junín cuenta con un sistema de ménsulas que permitieron construir un MDE urbano con una precisión decimétrica.

Palabras clave: Cuenca del Río Salado, Plan Maestro del Río Salado, modelo digital de elevaciones, geoide, tdaGEOBA

ABSTRACT

The present work presents a digital elevation model (DEM) for sub-basin A1 that is included in the Salado River basin and another DEM for the city of Junín. Thus, the work was divided into two regions; a macro (basin level) and a much smaller one (city of Junín). The building of DEMs for each area involved the analysis of global terrain models derived from SRTM mission and ASTER sensor, the study of their vertical error and the validation of the information. This was done through ground control points (GCP), represented by GPS/leveling points for the sub-basin DEM case and with altimetric points for the city of Junín. It was also necessary to use tools such as global geopotential models and the tdaGEOBA height transformation model.

The main results achieved can be summarized as follows: 1-the SRTM3 model was the most suitable to model the topography at sub-basin level A1; 2-the global geoid model EGM08 corrected by

a constant value is a very accurate tool to extrapolate tdaGEOBA to the south of Santa Fe province; the latter was suitable to correct the SRTM3 model (once disaffected from the EGM96 geoid model) in the entire study region; 3 - in flat areas the corrected SRTM3 model showed errors with a submetric standard deviation; 4- the city of Junín has a network of altimetric points that allowed to obtain an urban DEM with a decimetric precision, which is consistent with the corrected SRTM3 in countryside places.

Keywords: Salado River Basin, Master Plan of Salado Basin, digital elevation model, geoid, tdaGEOBA

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca en un proyecto FONARSEC (Fondo Argentino Sectorial), financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) cuyo objetivo es el establecimiento de un sistema de alerta y soporte de decisiones ante un eventual riesgo hídrico en la cuenca alta del Río Salado (subregión A1 del Plan Maestro Integral Cuenca del Río Salado, PMRS, MOSP 1999). Este es un plan de manejo integral de la cuenca, definida ésta según límites políticos, de manera tal que se considera a los límites de la provincia de Buenos Aires como borde externo de la cuenca. Las subregiones hídricas en que se divide, también están delimitadas políticamente (Fig.1).



Figura 1 Croquis de las subregiones del PMRS. En azul se señala la subregión A1 y con un punto rojo, la ciudad de Junín ubicada en el límite de la misma (Adaptado de MOSP, 1999).

Figure 2 Sketch of PMRS subregions. A1 subregion is depicted in blue while the city of Junín is marked with a red point in the border of the subregion. (Adapted from MOSP, 1999).

El primer problema planteado en este trabajo fue el de la región de estudio ya que el propósito era trabajar a nivel de cuencas o subcuencas, definidas por su sistema de drenajes y no de subregiones determinadas políticamente. Por ello se consideró como región de estudio la subcuenca definida según el trabajo de Gómez et al. (2017), la que contempla una redefinición de los límites de la cuenca del río Salado y sus subcuencas. La subregión A1 según el PMRS tiene una superficie de 12.427,81 km², distribuida sólo en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, mientras que el área de estudio utilizada en este trabajo tiene una superficie de 17.742,85 km² e incluye el sur de la provincia de Santa Fe.

De acuerdo con el proyecto, una de las primeras actividades consistió en la elaboración y validación de un modelo digital de elevaciones (MDE) para toda la región.

Un MDE es una representación en 3D de la superficie de la Tierra libre de vegetación y edificios, donde la unidad básica es un valor de altura z , al que acompañan correspondientes valores de x e y , expresados en un sistema de proyección geográfica para una precisa georeferenciación (Felicísimo, 1994). Para este trabajo, x e y representan la latitud y longitud, respectivamente.

Este tipo de productos se utilizan para múltiples aplicaciones en el contexto de estudios asociados al cambio climático y riesgo hídrico (Moore et al., 1991; Gamett, 2010), entre otras. Participan en la determinación de usos de suelo, modelos hidrológicos, obras hidráulicas, a partir de los cuales se pueden generar modelos de inundación y sus alcances (Hirabayashi et al., 2013). En particular son útiles para la determinación morfométrica de cuencas como se presenta en los trabajos de Gaspari et al. (2012) y Castillo et al. (2015).

Un MDE puede obtenerse de distintas maneras, ya sea a partir de métodos directos o indirectos. Dentro de los directos se encuentran los obtenidos con altimetría radar, LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), GPS (Global Positioning System), nivelación, o estación total. Entre los indirectos encontramos a la digitalización de curvas de nivel y a la fotogrametría. En este último caso, los MDE se obtienen por restitución (Felicísimo, 1994).

En zonas pobladas, no muy extensas, a veces es posible contar con MDEs derivados de relevamientos LIDAR o fotogrametría (Krabill et al., 1984; Beumier y Idrissa, 2016). Pero en regiones de gran extensión como la cuenca del Río Salado o parte de ella, MDEs del tipo SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) pueden resultar apropiados para caracterizar la topografía. Sin embargo, este tipo de modelos contiene errores que se relacionan con la metodología propia de extracción de la elevación, con el procesamiento de la información colectada y con la influencia de la vegetación y otras estructuras como edificios. Estos errores deben ser analizados y mitigados, previo la utilización de un MDE ya que afectan a todas las componentes de la posición, tanto en vertical como en horizontal y en general ambas están correlacionadas (Fan 2016, Felicísimo 1994).

Para efectuar el control horizontal de un MDE es necesario contar con puntos de control de terreno (GCP, por sus siglas en inglés) con coordenadas conocidas y de calidad superior a las del MDE que representen estructuras identificables en el terreno (intersección de calles, de sembrados, etc). Este no es el caso que se presenta en este trabajo ya que no disponemos de puntos de esas características a lo largo y ancho de la subcuenca A1. Por otra parte, cuando se trata de determinar la morfometría de una cuenca, las variables son ponderadas espacialmente. En una cuenca con miles de hectáreas, cada dato tiene una importancia o peso relativo en relación a los demás datos. Por ello, un píxel de 30 a 90 m con una georeferenciación de error métrico en horizontal, como la que presentan los modelos mencionados, es suficiente para un estudio hidrológico. Estudios como el de Castillo et al. (2015) y Oñate Valdivieso et al. (2007) muestran que aun en zonas donde la elevación es muy variable, un modelo de mayor precisión horizontal que el SRTM3 (90 m de resolución) puede no mejorar la estimación de los parámetros morfométricos de una cuenca. Por esta razón, aún cuando no se ignora la posible correlación entre errores horizontales y verticales, en este trabajo pondremos el foco en el error relacionado con la componente vertical.

La precisión vertical requerida en este estudio es decimétrica-centimétrica de manera tal que represente correctamente la morfología de la subcuenca A1 y que no sólo brinde alturas físicas a partir de algún modelo de geoide, sino que además éstas estén referidas a la referencia vertical Argentina. Cabe recordar que el origen vertical de las alturas provistas por modelos derivados de las misiones SRTM o ASTER es el geoide del modelo geopotencial global EGM96 (Lemoine et al., 1996).

En nuestro país, trabajos de comparación entre modelos derivados de ASTER y SRTM muestran que estos tienen una calidad métrica cuando son comparados con alturas observadas con GNSS (Global Navigation Satellite System, Díaz et al., 2010) o cuando se los evalúa por medio de puntos altimétricos (Burgos, 2009; IGN, 2016).

El objetivo de este trabajo es la evaluación y consiguiente mejoramiento vertical de un MDE para la subcuenca A1 y otro para el casco urbano de la ciudad de Junín, incluida dentro de los límites de la subcuenca. Si bien la zona de estudio abarca toda la subcuenca A1 del Río Salado, el modelo de riesgo hídrico tendrá a la ciudad de Junín como zona de prueba. Es por esto que dividiremos el trabajo en dos escalas: a nivel de subcuenca (macro) y a nivel de la ciudad de Junín. En el primer caso nos centraremos en los MDE globales, mientras que en el segundo trabajaremos con un MDE generado a partir de información local.

REGION DE ESTUDIO Y BASE DE DATOS

La subcuenca A1

La Figura 2 muestra en rojo, la subcuenca A1 y sobre la misma también se ha volcado el modelo de elevaciones SRTM3 (Farr et al., 2007) y el sistema de drenajes de la región (Gaspari, com. pers.). Este último muestra que para un correcto modelado de los aportes hídricos resulta necesario extender la zona más allá de los límites que marca el PMRS. En el presente trabajo utilizaremos como área de investigación, la región marcada en rojo obtenida a partir del trabajo publicado por Gomez et al., (2017). Esta tiene una superficie de 17.742,85 km², incluye el sur de la provincia de Santa Fe y fue obtenida mediante el análisis de la topografía en conjunto con el sistema de drenajes.

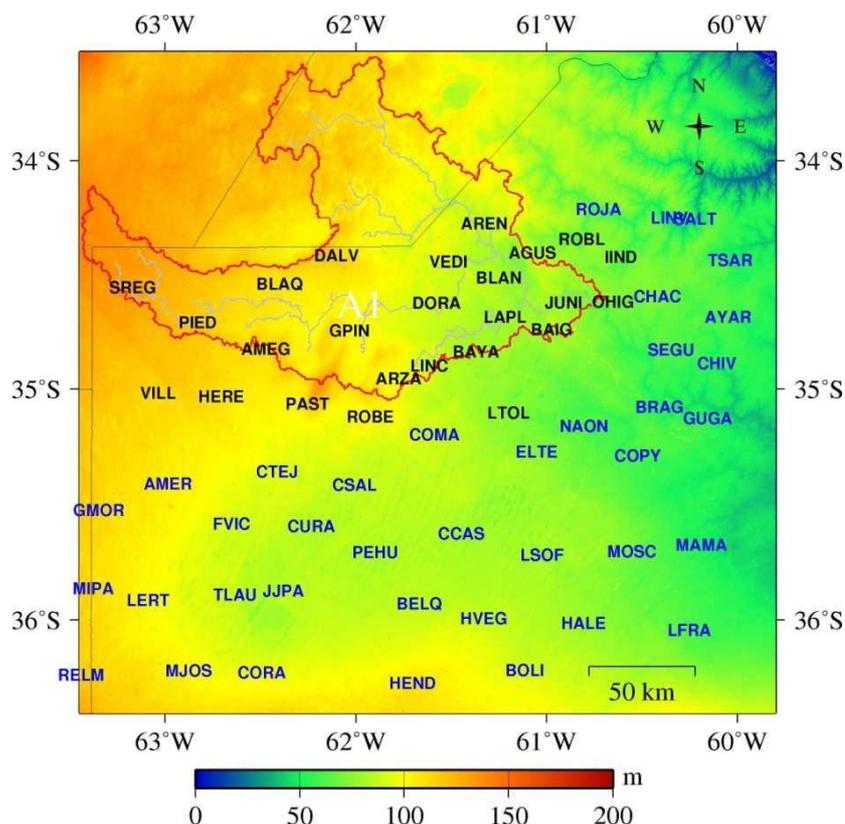


Figura 3 Topografía según SRTM3 en la región de estudio, incluido el sur de la provincia de Santa Fe. Sobre el mapa se ha volcado el sistema de drenajes de la zona en cuestión (celeste) y la denominada subcuenca A1 (rojo). Con letras negras se indican los puntos de GPS/Nivelación que se ubican sobre la subcuenca A1 y en azul aquellos aledaños, en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. La ciudad de Junín está representada por el punto JUNI ubicado a 7 km de la misma.

Figure 4 SRTM3 topography in the study region, including the south of Santa Fe province. The drainage system of the area (light blue) and the A1 sub-basin (red) have been overlapped. GPS/levelling points located on the A1 basin have been depicted in black and those points close to the sub-basin in the northwest of Buenos Aires province, have been marked in blue. The city of Junín is represented by the point called JUNI, located 7 km away from the city.

DATOS

Modelos del tipo SRTM

Se hace referencia a los modelos derivados de la misión SRTM. Esta fue un proyecto conjunto entre la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), la *National Geospatial Intelligence Agency* (NGA) y las agencias espaciales alemana e italiana, DLR y ASI, respectivamente (Far et al., 2007). Su objetivo era obtener un modelo de topografía con cobertura casi global por medio de

interferometría por radar de apertura sintética (InSar por su acrónimo en inglés). A bordo del transbordador *Endeavor* que sobrevoló la Tierra durante 11 días (11 al 22 de febrero de 2000), se montaron dos instrumentos InSAR (Radar Interferométrico de Apertura Sintética) separados por aproximadamente 60 m (Burgos, 2009): uno para la banda X (3 cm) y otro para la banda C (6 cm). Estos colectaron datos entre las latitudes -56° y 60° (Farr et al., 2007).

Como parte de la misión, se realizó una campaña global de datos observados con GPS en modo KGPS (GPS cinemático) que servían como puntos de control en el terreno. En total se colectaron un total de 9,4 millones de muestras, distribuidas sobre los seis continentes cuya posición tenía una exactitud media aproximada de 0.5m (Rodríguez et al., 2005).

El máximo error absoluto estimado en altura es 16 m aproximadamente y 20 m en horizontal, según Rodríguez et al. (2006).

De la misión se derivaron varios modelos con distintas calidades y resoluciones. Entre los que analizaremos en este trabajo se encuentran SRTM3 (versión 4.1) y MDE-Ar (Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina), de 90 y 45 m respectivamente. MDE-Ar fue publicado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) en 2014. Es un producto derivado del modelo SRTM1 (de 30 m de resolución) provisto por la NGA al IGN de Argentina, quien mediante técnicas de filtrado, relleno e inclusión de datos en zonas de lagos, generó un modelo con una resolución de 45 m con una exactitud vertical de 3,23 m estimada a partir de la evaluación sobre aproximadamente 9000 puntos altimétricos distribuidos en nuestro país (IGN, 2014).

El SRTM3 fue obtenido del sitio del CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research), mientras MDE-Ar fue descargado desde la página web del IGN.

ASTER

Se hace referencia a los modelos derivados del sensor ASTER. Este es un sensor que fue lanzado al espacio a bordo del satélite Terra en 1999. Este trabaja en tres bandas en el visible e infrarrojo cercano, seis bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta y cinco bandas en el infrarrojo térmico que le permiten alcanzar diferentes resoluciones. En 2009 y 2011, la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI, por sus siglas en inglés) publicaron los modelos digitales de elevación global GDEM1 y GDEM2 respectivamente.

La metodología utilizada para la generación del modelo topográfico consistió en la adquisición de pares de imágenes estereoscópicas. La primera versión fue producto de una compilación de 1,2 millones de imágenes estéreo y la segunda (versión utilizada en este trabajo) incorporó 260.000 imágenes más. Tiene una cobertura global de -83° a 83° . En este trabajo utilizaremos GDEM2 que, de acuerdo con NASA (2011), tiene una exactitud en altura mejor que 20 m en absoluto y se estima que, en horizontal, la precisión absoluta es de 7 m. En este trabajo hemos utilizado la versión 2, de 30 m de resolución, disponible en: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>.

Los errores mencionados para todos los modelos deben controlarse localmente ya que en muchos casos representan errores promedio obtenidos con puntos GNSS pobremente distribuidos (sobre todo en Sudamérica y otras regiones) y en algunos casos con puntos GNSS cuyas coordenadas tienen calidades decimétricas (Rodríguez et al, 2005).

Tanto las observaciones de las misiones ASTER o SRTM, como las mediciones GNSS requieren de la utilización de modelos geopotenciales globales o de un modelo de geoide local (según el caso) para transformar sus alturas elipsoidales en ortométricas. El estudio del comportamiento de estos modelos es fundamental si se quiere obtener una referencia altimétrica común.

Modelos geopotenciales globales

EGM96 (Lemoine et al., 1997) y EGM08 (Pavlis et al., 2012) son dos modelos geopotenciales globales elaborados por la NGA (National Geospatial Intelligence Agency) de Estados Unidos. Ambos fueron pioneros en su momento. El EGM96 fue el primer modelo en alcanzar un desarrollo en armónicos esféricos del campo gravitacional de grado y orden 360, mientras el EGM08 fue el primer en alcanzar grado y orden 2159, lo que implicaba resoluciones de 50 y 9 km, respectivamente.

EGM08 superó ampliamente en resolución y calidad al EGM96 y a muchos modelos de su época (Pavlis et al., 2012).

Evaluaciones llevadas a cabo en la región de estudio, sobre 65 puntos de GPS/nivelación, indican un desvío estándar de 0,18 m en vertical para el EGM96, en tanto el modelo EGM08 presenta un desvío estándar que no supera los 0,05 m. Por esta razón, en las siguientes secciones se utilizará el

modelo EGM08 cuando no hubiere información observacional de ondulaciones geoidales, previo análisis de la información de la región.

Estos valores concuerdan con las precisiones estimadas para cada uno de los modelos que va de 0,05 m a 0,10 m para el EGM08 (Pavlis et al., 2012) y de 0,5 m a 1 m para el EGM96 (Kenyon et al., 2007).

El modelo de Transformación de Alturas tdaGEOBA

Es un modelo que permite transformar alturas elipsoidales referidas a POSGAR07 en cotas sobre el nivel medio del mar (s.n.m.m). Fue realizado en base a la información de GPS /nivelación de 400 puntos distribuidos sobre la provincia de Buenos Aires los que permitieron obtener una grilla de ondulaciones geoidales para toda la provincia.

Para realizar la transformación se vale de la ecuación de Heiskanen y Moritz (1967)

$$H = h - N \quad \text{ec. (1)}$$

Donde H es la cota que queremos determinar, h es la altura elipsoidal obtenida con GPS y N es la ondulación geoidal que provee el modelo. Si bien en el presente caso, H no es una altura ortométrica, se asume que se aproxima en el orden de 1 cm, en provincia de Buenos Aires (Valenti, 2012).

El error estimado para la determinación de cotas o alturas con este modelo es de 0,03 m (Perdomo et al., 2012).

Puntos de control

Sobre la Figura 2 se muestran los GCP utilizados a priori para el análisis. Conforman un total de 65 puntos de GPS/nivelación, es decir cuentan tanto con coordenadas geodésicas como con cota. De éstos, aproximadamente 25 (señalados en negro) se ubican sobre la subcuenca A1, y el resto aporta información de todo el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Las coordenadas geodésicas tienen una exactitud de 2 cm en horizontal y 3 cm en altura (Perdomo et al, 2012, Gómez 2006), mientras la cota derivada de la nivelación tiene una exactitud aun mejor que el centímetro en regiones como la de estudio. De esta manera, los GCP tienen una calidad superior a la de los MDE que se pondrán a consideración para su utilización en la subcuenca A1.

Ménsulas localizadas en la ciudad de Junín

Como se comentó en la introducción, el proyecto en el que se enmarca esta investigación requiere un detalle mayor para la zona urbana de la ciudad de Junín.

Los MDE listados anteriormente no están por completo libres de vegetación ni edificaciones lo que ocasiona que la altura del pixel es muchas veces el promedio de las alturas de construcciones o vegetación circundantes. Por ello, para la ciudad de Junín se optó por la generación de un MDE a partir de la información altimétrica de ménsulas distribuidas por la ciudad (ver Fig. 3). Su ubicación y cotas fueron provistas por la Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Junín. Las mismas pertenecen a la dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires (GE) y a Obras Sanitarias de la Nación (OS).

Las ménsulas se ubican sobre paredes por lo que el paso del tiempo y las modificaciones edilicias son responsables de su desaparición en muchos casos. Por otra parte se desconoce su altura al piso. Este último dato es importante ya que las ménsulas contienen información de cota que, si lo que se quiere obtener es un MDE, debe ser reducida a nivel del suelo.

Para esto se realizaron cinco campañas de reconocimiento y medición de la altura entre el piso y las ménsulas. Se reconocieron un total de 55 ménsulas en buen estado de conservación, lo que implica que tampoco han sido desplazadas de su posición original. Sólo las veredas han sufrido cambios, razón por cual la medición de la altura al suelo fue imprescindible.

Puntos GPS cinemático

Con el fin de aportar información de borde de la ciudad de Junín, se realizó un relevamiento GPS cinemático en la zona de circunvalación (Fig. 3). Fue vinculado a POSGAR07 por medio del punto JUNI perteneciente a esta red y localizado a unos 8 km al sudeste de la ciudad.

En este y todos los casos mencionados en este trabajo se utilizaron 2 receptores geodésicos TRIMBLE 4700 y R5, de doble frecuencia. Las coordenadas geodésicas han sido vinculadas a POSGAR07, lo que explica junto con el método de observación, la calidad de las posiciones estimada en 5 cm.

Estos puntos al igual que las ménsulas ubicadas en la ciudad de Junín, servirán tanto para la determinación del MDE urbano como para su validación haciendo uso de la metodología que se describirá más adelante.

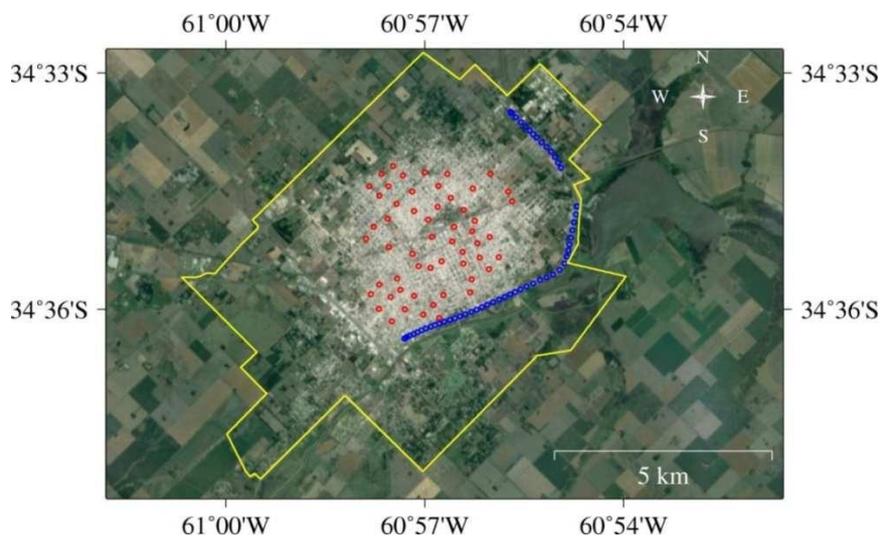


Figura 3 Distribución espacial de las ménsulas en la ciudad de Junín (rojo). En amarillo, los límites de la ciudad de Junín junto con el trayecto GPS cinemático (azul) volcados sobre imagen Landsat (Datos del mapa: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).

Figure 3 Spatial distribution of altimetric information in the city of Junín (red). The boundaries of the city are depicted in yellow together with the GPS kinematic trajectory (blue) on a Landsat image. (Map data: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).

METODOLOGÍA y ANÁLISIS

La referencia vertical de los MDE seleccionados

Tanto los modelos ASTER como SRTM, son originalmente geométricos y refieren sus observaciones en altura al geode del EGM96 (Lemoine et al., 1998) para que las alturas puedan considerarse ortométricas (Rodríguez et al., 2005). Para esto hace uso de la ec. (1), donde ahora H representa la altura provista por cualquiera de los MDE mencionados. N es la ondulación geoidal derivada del modelo geopotencial EGM96, y h es la altura elipsoidal que resulta de la medición altimétrica propia de cada misión.

El modelo tdaGEOBA (Perdomo et al., 2012) ha sido masivamente utilizado en los últimos años en la provincia de Buenos Aires para transformar alturas elipsoidales medidas con GPS en el marco POSGAR07 (IGN, 2008) al sistema altimétrico nacional materializado por cotas altimétricas de mojones IGN de las redes de alta precisión, y en algunos pocos casos, topográficos.

El procedimiento ya utilizado en nuestro país (Simontacchi, 2011; Galvan, 2014) para mejorar el modelo SRTM3, pero sobre todo, para aproximarlos mejor al sistema altimétrico nacional, ha consistido en restar a las alturas SRTM3 el valor de la ondulación geoidal del EGM96 en cada punto, y sumar la contribución de un modelo local o un modelo global más ajustado al sistema altimétrico nacional.

En este caso, se propone desactivar los MDE del EGM96 y agregar la contribución del modelo de transformación de alturas tdaGEOBA. Para esto es necesario estimar y analizar las diferencias $N_{tdaGEOBA} - N_{EGM96}$, las cuales se muestran en la Figura 4.

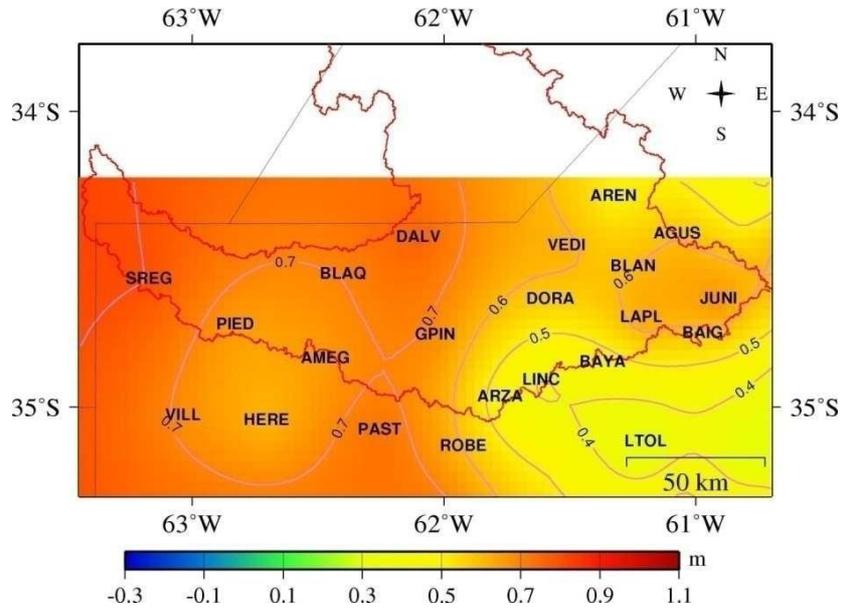


Figura 4 Diferencias de ondulaciones geoidales, *NtdaGEOBA-Negm96*. Isolíneas cada 0,10 m.
Figure 4 *NtdaGEOBA-Negm96* geoid undulation differences. Level curves each 0.10 m.

La grilla mostrada en la Figura 4 fue obtenida a partir de la interpolación de las diferencias *NtdaGEOBA-Negm96* sobre los puntos de GPS/nivelación. El método de interpolación utilizado es el de mínima curvatura con tensión de 0,25, apropiado para la interpolación de observables del campo de la gravedad (Smith and Wessel, 1990). La diferencia con relación a *tdaGEOBA* es de 0,58 con un desvío estándar (DS) de 0,13 m acorde a los valores esperados para el EGM96. A diferencia de otras cantidades como las asociadas a la topografía, las ondulaciones geoidales y sus diferencias son cantidades que varían muy suavemente con el terreno.

Esta figura no muestra las diferencias sobre toda la subcuenca A1 porque al momento no se contaba con información. Si bien la variación de estas diferencias es suave, se aprecia un gradiente de sudeste a noroeste. Por ello, no debe extrapolarse en ningún caso esta corrección fuera de la región sin realizar un análisis particular en cada caso. Precisamente, dado que los puntos que contribuyen a *tdaGEOBA* ubicados más al norte son DALV, AREN, BLAQ y VEDI (Fig. 2), la extrapolación de este modelo al sur de Santa Fe merece una consideración particular.

Si se evalúa de la misma manera al modelo EGM08 (Pavlis et al., 2012), se tiene una diferencia promedio de 0,24 m con un DS de 0,04 m con respecto a *tdaGEOBA* (Fig. 5) obtenida sobre 65 puntos localizados en el noroeste de la provincia de Buenos Aires.

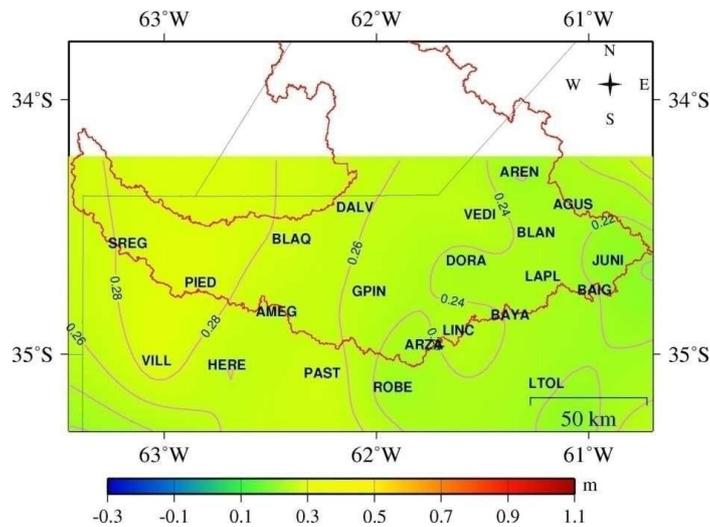


Figura 5 Diferencias de ondulaciones geoidales, *NtdaGEOBA-Negm08*. Isolíneas cada 0,02 m.
Figure 5 *NtdaGEOBA-Negm96* geoid undulation differences. Level curves each 0.02 m.

En este caso, las variaciones son mucho menores que para el caso del EGM96 lo cual es respaldado por el trabajo de Pacino y Tocho (2009) que sugiere que este comportamiento se mantiene en la provincia de Santa Fe. Por esta razón, en la zona sur de esta provincia, se adoptó como valor de ondulación geoidal, equivalente a la producida por tdaGEOBA, a la del EGM08 corregido por los 0,24 m (ec. 2 b). De esta manera, las diferencias *Negm96-NtdaGEOBA* para toda la subcuenca A1 se construyen de la siguiente manera:

$$Negm96 - NtdaGEOBA = \begin{cases} Negm96 - NtdaGEOBA & (a) \text{ en } pcia. \text{ de Buenos Aires} \\ Negm96 - \frac{Negm08 + 0,24}{Negm08 \text{ corregido}} & (b) \text{ en el sur de Santa Fe} \end{cases} \quad \text{ec. (2)}$$

A continuación se grafican las diferencias *Negm96- NtdaGEOBA* para toda la subcuenca A1, obtenidas usando la ec. (2). Estas serán utilizadas, más adelante, para cambiar la referencia vertical de los MDE.

Obtención de un MDE para la ciudad de Junín

La vinculación de la información de las ménsulas con el resto del trabajo, requería de observaciones GPS sobre las mismas, por lo que se utilizó un nivel óptico marca Wild Heerbrugg, para trasladar su cota (*H*) a un punto auxiliar que fuera observable con GPS. En todos los casos, la observación y procesamiento de los datos GPS fueron realizadas en modo diferencial. Se observaron un total de 7 ménsulas bien distribuidas: 4 de la Dirección de Geodesia y 3 de Obras Sanitarias.

La metodología de trabajo fue la siguiente:

- elección de un punto cercano (aproximadamente 50 m) a cada ménsula que fue observado con GPS, doble frecuencia y en modo estático. Su coordenada fue referida a POSGAR07 a partir de un punto colocado en el predio del rectorado de UNNOBA (Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires) y que fue vinculado a este marco a través del punto JUNI perteneciente a la Red Geodésica de la Provincia de Buenos Aires.
- traslado de la cota de la ménsula al punto de observación GPS con un nivel óptico.

La doble información de altura sobre estos puntos auxiliares permitió estimar la ondulación del geoide sobre cada uno de ellos y compararla con la solución provista por tdaGEOBA. Esto permitió corroborar que las cotas de las ménsulas de Obras Sanitarias, presentan una diferencia sistemática de 0,550 m en el sentido ($H_{OS} - H_{OIGN}$), que se corresponde con la diferencia que existe entre el “cero” del Ministerio de Obras Públicas (OMOP) y el “cero” del IGN (OIGN) que es de 0,556 m (<http://www.sspyv.gov.ar/niveles%20de%20referencia.pdf>). Es decir, obedece a una diferencia de origen entre ambos sistemas de ménsulas.

A continuación, se decidió llevar todo al OIGN ya que esta conforma la referencia oficial.

Punto	$H_{obs} - H_{tdageoba}$ [m]	σ_h GPS [m]	σ_u GPS [m]	σ_{niv} [m]
GE07	0,000	0,008	0,019	0,0020
GE23	2,214	0,007	0,012	0,0005
GE25	0,024	0,004	0,007	0,0015
GE32	0,019	0,007	0,013	0,0010
OS06	0,547	0,005	0,008	0,0000
OS25	0,565	0,005	0,01	0,0050
OS31	0,537	0,01	0,021	0,0005

Tabla 1 Diferencias entre las alturas observadas y las obtenidas con tdaGEOBA sobre los puntos auxiliares a las ménsulas consideradas. También se indican los errores en horizontal (σ_h) y vertical (σ_u) de las coordenadas, y el asociado a la nivelación (σ_{niv}).

Table 1 Differences between the observed heights and those obtained with tdaGEOBA on the auxiliary points related to the considered altimetric information. Also the horizontal (σ_h) and vertical (σ_u) errors of the coordinates are indicated together with those associated to the leveling (σ_{niv}) network.

El punto asociado a la ménsula GE23 ha sido excluido del análisis ya que tanto la observación de los datos GPS como los de nivelación no presentan errores que justifiquen esa diferencia. Estos posibles errores han sido descartados teniendo en cuenta distintos software y servicios de procesamiento GPS. En cuanto al desnivel obtenido, este tampoco justifica la diferencia que muestra la segunda columna de la Tabla 1. Se asume que existe un error en la cota provista o que la ménsula fue movida.

RESULTADOS Y DISCUSION

Verificación de la corrección propuesta a los MDE previo a su aplicación

En Julio de 2016 se midieron tres nuevos puntos altimétricos con GPS en el sur de Santa Fe, RUF1, TARR y SGRÉ con el fin de validar la extensión de tdaGEOBA a esa región (utilizando el EGM08 corregido; sección anterior). Las coordenadas quedaron referidas a POSGAR07 a través de la estación permanente RUF1 a la cual se vincularon las observaciones.

La Tabla 2 muestra la comparación entre las N observadas en dichos puntos y las *Negm08corregido*, lo que se traduce, de acuerdo con la ec. (1), en diferencias entre cotas IGN y las que resultan de la altura GPS elipsoidal transformada en ortométrica con el EGM08 corregido. El resultado es plenamente satisfactorio ya que estas diferencias en ningún caso alcanzan el cm.

Los resultados mostrados en la Tabla 2, permiten concluir que la metodología y la corrección propuesta (ec. 2 y Fig. 6) es apropiada y extrapolable a otras regiones siempre que se cuente con la información de ambos modelos geopotenciales globales y se tenga acotada la diferencia entre unos de ellos y los valores observados en regiones aledañas.

Validación de los MDE

La selección del MDE está condicionada por los resultados de la evaluación sobre los GCP. El número, la calidad y distribución de los mismos condiciona según Li (1991) la fiabilidad con que se determinan estadísticos como la media y el desvío estándar. En el anexo se encuentran las fórmulas utilizadas aquí para estimar la fiabilidad del promedio y del desvío estándar.

Con relación a la calidad, el error de las coordenadas y la altura de los GCP son mucho menor al error de los MDE, de manera que no condicionan su estimación del error. En cuanto a la distribución, este es un aspecto un poco más subjetivo según Li (1991). En este caso se ha utilizado una distribución de puntos que cubre la región de análisis y con una equidistancia promedio de 300 km que se mantiene entre ellos. Con el fin de seleccionar un único modelo para determinar la morfología de la región, se utilizaron GCP ubicados en el noroeste de la provincia de Buenos Aires. Estos son 65 puntos de GPS/nivelación, con la calidad descrita más arriba y que permiten estudiar la calidad de los MDE en vertical tal como lo muestran Rodríguez et al. (2005) y en Argentina, Burgos (2009) entre otros. De los 65 puntos, sólo 25 se encuentran en la subregión A1 del PMRS, que constituye el 70% de subcuena A1. Esta decisión de ampliar la región se debió a que las estadísticas son mejores y más representativas cuando se considera un número mayor de puntos.

Sobre los puntos se evaluaron las alturas arrojadas por los tres modelos seleccionados. La evaluación se realizó por medio de la herramienta *gdtrack* del software GMT v4.5.8 (Generic Mapping Tools - Smith and Wessel, 2012).

La Tabla 3 muestra los estadísticos de las diferencias a nivel de las alturas entre las derivadas de los MDE presentados y las de los puntos altimétricos.

Los resultados de la Tabla 3 son mejores que lo esperado para cada modelo. La estadística indica que de los tres modelos, el que mejores valores presenta es el SRTM3, le sigue MDE-Ar y muy por debajo de encuentra el modelo GDEM2. En la Figura 7 se aprecia el valor medio de las diferencias y el error lineal estimado, según anexo, con una probabilidad del 90%.

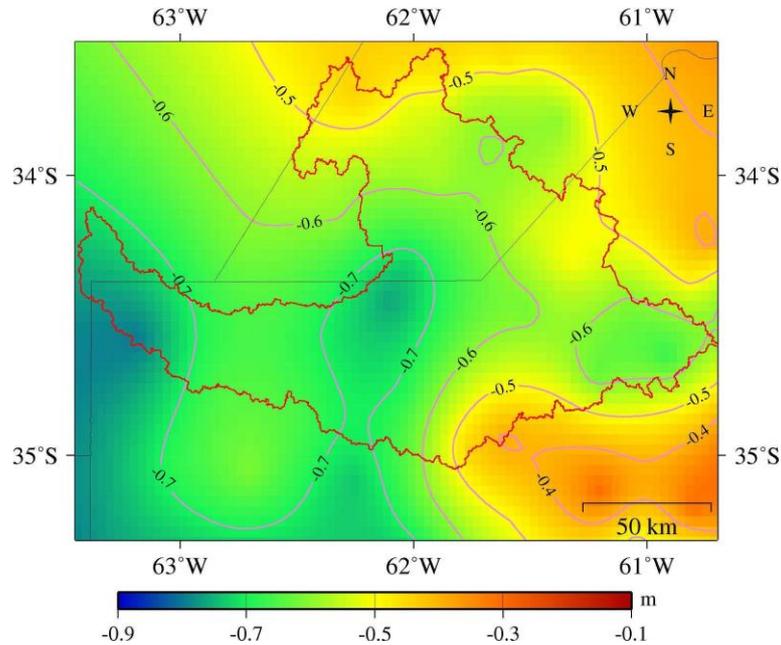


Figura 6 Diferencias de ondulaciones geoidales *Negm96- NtdaGEOBA*. Isolneas cada 0,1m.
Figure 6 *Negm96- NtdaGEOBA* geoid undulations differences. Level curves each 0.1 m.

Punto	Latitud	Longitud	h[m]	H [m]	Nobs [m]	<i>Negm08 corregido</i> [m]	$\frac{N}{(O-C)}$ [m]
RUF1	-34° 15'50,9063"	-62° 41'19,6936"	135,210	115,901	19,305	19,300	0,005
SGRE	-34° 17'31,6836"	-62° 02'23,6546"	130,580	111,900	18,680	18,671	0,009
TARR	-34° 11'20,6648"	-62° 32'30,8147"	141,050	121,836	19,213	19,209	0,004

Tabla 2 Se presentan los resultados de tres nuevos puntos acotados (con H IGN) en el sur de Santa Fe. La primera columna refiere a la designación del punto que guarda relación con la localidad más próxima; RUF1 en Rufino, SGRE cercano a San Gregorio y TARR frente a la estación Tarragona. Las siguientes tres columnas muestran las coordenadas elipsoidales calculadas en forma relativa a la estación fija RUF1 (red RAMSAC), a continuación la cota IGN (H) y luego la diferencia $h - H$ denominada *Nobs*. La siguiente columna muestra el valor de ondulación geoidal calculado con el modelo EGM08 (corregido de +0,24 m) para estos puntos, y finalmente la diferencia entre el *Nobs* y *Negm08corregido*.

Table 2 The results of three new altimetric points located in the south of Santa Fe province are shown. The first column refers to the designation related to the closest city, RUF1 in Rufino, SGRE near San Gregorio, and TARR in front of Tarragona station. The next three columns show the ellipsoidal coordinates calculated relative to the fixed station RUF1 (RAMSAC network), then the orthometric height (H) and then the $h-H$ difference called *Nobs*. The next column shows EGM08 geoidal undulation (corrected from +0.24 m) for these points, and finally the difference between *Nobs* and *Negm08*.

Estadístico/valor	Hobs- H_{SRTM3}	Hobs- H_{GDEM2}	Hobs- H_{MDE-Ar}
DS [m]	1,40	6,70	1,58
Media [m]	-0,63	-0,41	-0,62
Máximo [m]	2,87	13,43	3,84
Mínimo [m]	-3,59	-23,17	-4,73
RMSE[m]	1,52	6,67	1,66
EL (90%)	0,25	0,53	0,26
Nro de puntos	65	65	65

Tabla 3 Estadísticos de las diferencias entre las alturas derivadas del SRTM3, GDEM2, MDE-Ar y las de los GCP (Hobs). El representa el error lineal (ver Anexo).

Table 3 Statistics of the differences between the heights derived from the SRTM3, GDEM2, MDE-Ar and those of GCP (Hobs). EL represents the linear error (see Appendix).

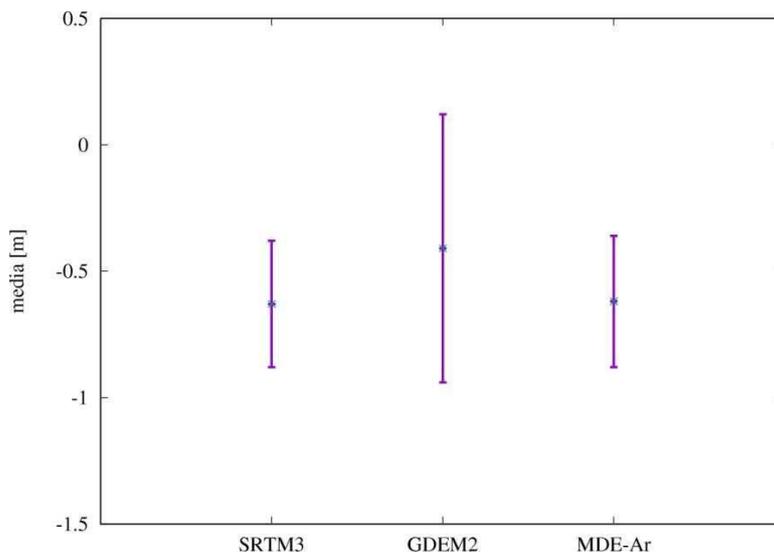


Figura 7 Valor medio para los tres MDE con un intervalo de confianza con probabilidad del 90% del RMSE.
Figure 7 Mean value for the three selected DEMs with a confidence interval with 90% probability of the RMSE.

De acuerdo con lo mencionado en secciones anteriores, la diferencia promedio *NtdaGEOBA-Negm96* es de +0,58 m sobre toda la subcuenca A1. De la estadística sobre los 65 puntos (Tabla 3) se infiere que si se reemplaza la referencia vertical por aquella obtenida con tdaGEOBA, el valor promedio de las diferencias se reduce a 0,05m en el caso del SRTM3 (es decir, -0,63 m + 0,58 m) y también tiende a cero para el caso de GDEM2 y MDE-Ar.

En función de este análisis y el realizado sobre el modelo EGM96, a la grilla de alturas de cada MDE se le sumó una grilla de diferencias *Negm96-NtdaGEOBA* de igual tamaño y resolución que la del MDE en cuestión dando lugar a lo que llamaremos *MDE corregido* donde en este caso, MDE hace referencia al SRTM3, GDEM2 o MDE-Ar, según corresponda.

Validación de los *MDE corregidos* y selección del MDE

La posibilidad de utilizar puntos con cota IGN para validar los MDE y estimar su precisión es una técnica ampliamente utilizada (Rodríguez et al., 2005; Rexer y Hirt, 2014; Gamett, 2010) y relativamente sencilla. Sin embargo, otros trabajos recientes sobre regiones llanas y libres de vegetación muestran que es posible esperar errores más pequeños (Simontacchi, 2011). Debido a que los puntos de GPS/nivelación se ubican próximos a los caminos, su cota no siempre es representativa del terreno circundante. Por eso, a estos puntos se le sumaron once (11) puntos auxiliares que se ubican a 200 a 300 m de los primeros, directamente sobre el terreno, lejos de vegetación alta y de construcciones de manera que su altura fuera representativa del terreno (Fig. 8). Estos fueron utilizados como GCP adicionales para evaluar cada uno de los *MDE corregido* y arrojaron los resultados que se muestran en la Tabla 4. En esta se presentan dos columnas (DH y DH2) por cada MDE. La primera incluye a los 11 puntos y la segunda (DH2) excluye a los puntos AGUX, GPIN y BAYX.

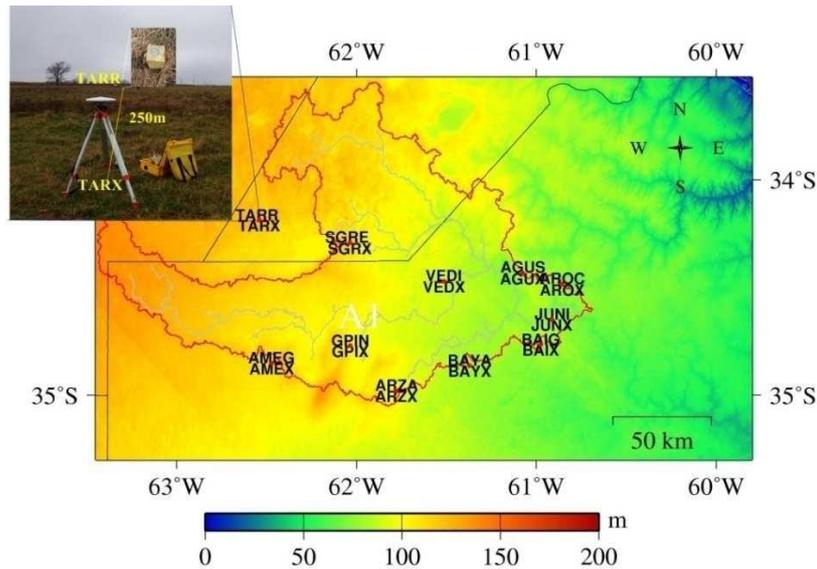


Figura 8 Ubicación de los puntos auxiliares sobre la subcuenca A1. Se acompaña con una imagen que muestra la relación entre la ubicación de los puntos auxiliares y la de los de GPS/nivelación correspondientes.

Figure 8 Location of auxiliary points on A1 sub-basin A1. An image showing the relationship between the location of these points and that of the corresponding GPS/leveling points is also included.

De todas las diferencias mostradas en la Tabla 4 que superan el metro, las que corresponden a los puntos AGUX, GPIX y BAYX pueden justificarse como errores asociados no sólo a los modelos, sino también a la determinación de la cota observada. El punto AGUX presenta una observación de campo de terreno suavemente ondulado. Y esto queda corroborado porque la diferencia de cota observada entre el punto AGUS y AGUX, distante apenas un centenar de metros es de 2,40 m. Esto indica que la elección del punto de chequeo no fue acertada.

Punto	<i>SRTM</i> corregido		<i>GDEM2</i> corregido		<i>MDE-Arc</i> corregido	
	DH [m]	DH2 [m]	DH [m]	DH2 [m]	DH [m]	DH2 [m]
AMEX	0,61	0,61	4,67	4,67	-6,51	-6,51
AROX	1,18	1,18	-0,32	-0,32	0,14	0,14
ARZX	-0,53	-0,53	0,68	0,68	0,85	0,85
BAIX	0,46	0,46	4,56	4,56	1,01	1,01
BAYX *	-1,27		-2,82		0,06	
GPIX *	3,34		0,30		5,33	
JUNX	-0,31	-0,31	-3,97	-3,97	3,27	3,27
SGRX	1,26	1,26	-3,80	-3,80	-0,96	-0,96
TARX	0,84	0,84	3,91	3,91	0,42	0,42
VEDX	1,06	1,06	4,13	4,13	1,88	1,88
AGUX*	-3,23		2,09		-0,56	
MEDIA	0,31	0,57	0,86	1,23	0,45	0,01
DS	1,67	0,67	3,32	3,66	2,93	2,91

Tabla 4 Estadística de las evaluaciones de los *MDE* corregidos. DH hace referencia a las diferencias entre la cota observada y la de los *MDE* corregidos, utilizando todos los puntos disponibles. DH2 representa lo mismo que DH pero habiendo eliminado de las estadística a los puntos AGUX, GPIX y BAYX marcados con (*).

Table 4 Statistics after the evaluation of the *corrected MDEs*. DH refers to the differences between the observed height and that of the *corrected MDEs*, using all available points. DH2 represents the same as DH but having eliminated AGUX, GPIX and BAYX points, marked with (*).

El punto GPIX presenta la misma observación y BAYX en cambio no presenta ninguna observación dudosa, pero el punto BAYA, que es el punto a partir del cual se mide la cota de BAYX, está semienterrado, sin hierros de protección y podría haber sido cambiado de lugar.

Eliminando los puntos en cuestión el DS se reduce (Tabla 4, DH2), siendo inferior al metro para el caso del *SRTMcorregido*. Si bien este orden submétrico es lo que se está buscando, debería incrementarse el número de puntos de estas características para concluir que el error es del orden pretendido.

Naturalmente no describe las ondulaciones de “corta longitud de onda”, y debe ser utilizado para evaluar el terreno en términos de variaciones de nivel suaves y que se presenten a lo largo de algunos centenares de metros. Es el caso que se presenta generalmente en la zona de estudio.

En todos los casos, sin embargo, el promedio de las diferencias es de varias decenas de centímetros. También se observa que la calidad de MDE-Ar en la región no es superior a la de SRTM3, sino más bien son muy similares. Teniendo en cuenta este resultado y que el costo computacional es menor debido a su menor resolución, hemos optado por utilizar este último MDE en lo que resta del trabajo. No obstante, similares resultados deberían obtenerse con MDE-Ar.

Junin: zona urbana

Una vez obtenidos los desniveles, las coordenadas, y definida la referencia vertical, el *MDEurbano* fue construido a partir de 55 ménsulas distribuidas en toda la ciudad de Junín y los puntos del trayecto cinemático cuya cota fue obtenida a partir del modelo tdaGEOBA. En los casos de cotas referidas al OMOP, se corrigió por la diferencia MOP-IGN. La calidad final de estas cotas queda establecida a partir de la calidad estimada según tdaGEOBA (0,03 m).

La construcción del MDE a partir de puntos discretos, implicó un estudio sobre los métodos de interpolación. El software utilizado fue Generic Mapping Tools (GMT) v4.5.8 y los métodos estudiados fueron dos: “splines in tension” con tensión 0,75 según lo recomendado por el software para el tratamiento de datos de topografía (Wessel and Smith, 2012) y triangulación de Delaunay (Watson, 1982; Lee and Shachter, 1980), utilizando la misma versión de GMT. También se analizaron tensiones que van de 0,5 a 0,9.

Para medir la capacidad de interpolación de cada método, se realizó un proceso de validación cruzada (Fotopoulos, 2003). El resultado de este procedimiento indicó que el método más apropiado era el de triangulación, siendo este el único que mostraba un desvío estándar de las diferencias, por debajo de 0,30 m sobre las diferencias. Así se construyó un *MDEurbano* de 50 m de resolución con una calidad en vertical apenas inferior a la deseada. En la Figura 9 se muestra la distribución espacial de los residuos de la validación y su valor medio con un intervalo de confianza con probabilidad del 95% del RMSE (0.22 m), asumiendo un error lineal (ver Anexo). De 122 puntos que conforman entre ménsulas y puntos del trayecto cinemático, el 50 % presentan diferencias con respecto a tdaGEOBA inferiores a los 0,14 m y el 82% inferiores a 0,16 m (ambas cantidades en valor absoluto).

Para cuantificar el acuerdo entre el *SRTMcorregido* y el MDE obtenido para la ciudad de Junín a partir de las ménsulas (*MDEurbano*), se generaron dos perfiles: uno en la dirección preponderante del gradiente de altura (SE->NO) y otro a 90 grados (SO->NE). En la parte superior de la Figura 11 se observa la dirección de ambos perfiles en el contexto de la ciudad de Junín. Debajo, se tienen las alturas del *SRTMcorregido* y las derivadas a partir de las ménsulas. Para cada perfil se graficaron las curvas (tendencias) que ajustan a cada uno y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (Fig 10). Se aprecia un acuerdo muy satisfactorio entre perfiles, siendo mayor la que se obtiene en la dirección SE->NO.

En la Figura 11, se aprecian las curvas de nivel obtenidas con la metodología descrita, sobre la topografía del *SRTMcorregido*. Se advierte una muy buena correlación entre los distintos niveles y la topografía del SRTM. Sobre la misma imagen se superpuso un trayecto cinemático.

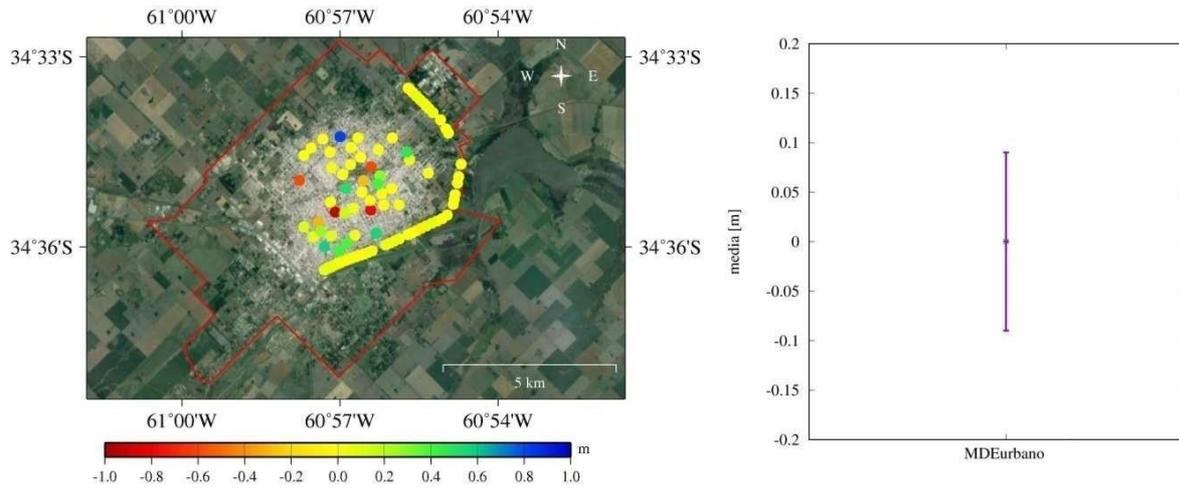


Figura 9 Distribución espacial de los residuos resultantes de la validación cruzada (izq.) junto su valor medio (der.) con un intervalo de confianza con probabilidad del 95% del RMSE (0,22 m).
Figure 9 Spatial distribution of the residuals as a result of the cross-validation process (left) together with its mean value (right) with a confidence interval with 95% probability of the RMSE (0.22 m).

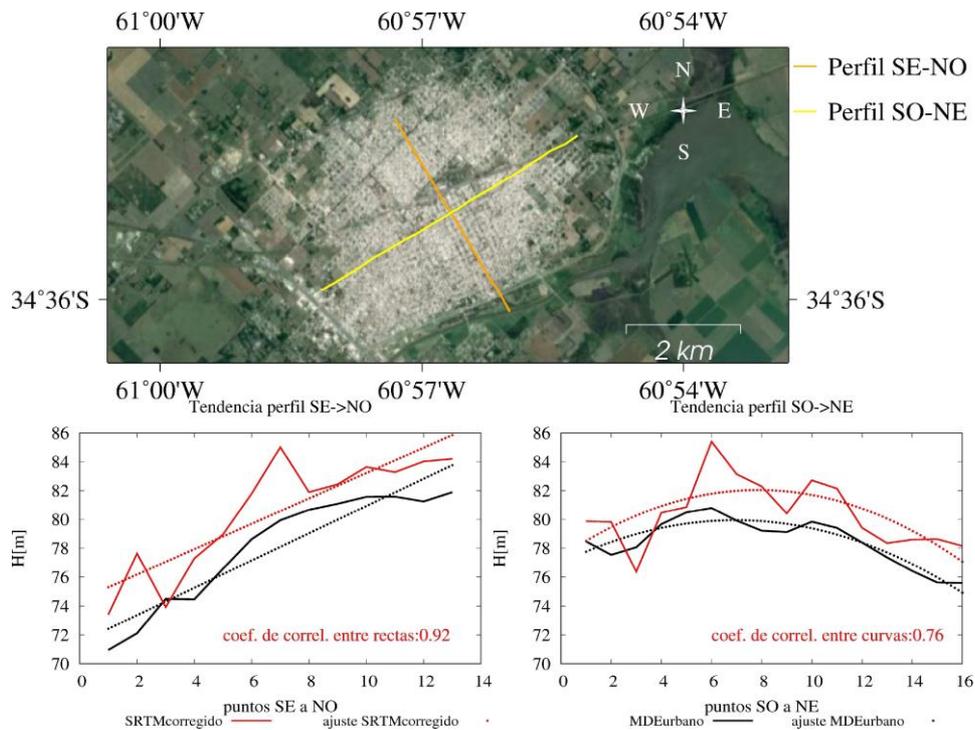


Figura 10 Comparación de los perfiles *SRTM* corregido y los del modelo de elevaciones elaborado a partir de las ménsulas en dos sentidos: SE ->NO y SO -> NE. Ambos muestran un acuerdo muy satisfactorio. Como era de esperar, el perfil *SRTM* está por encima unos 2 m debido al efecto de las construcciones en la zona urbana. (Datos del mapa: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).
Figure 10 Comparison of the *SRTM* profiles and those of the elevation model obtained from the local altimetric points in the SE -> NO and SO -> NE directions. They show a satisfactory agreement. As it was expected, the *SRTM* profile is 2 m above due to the effect of the buildings in the urban area. (Map data: Google Imagery @2018, DigitalGlobe).

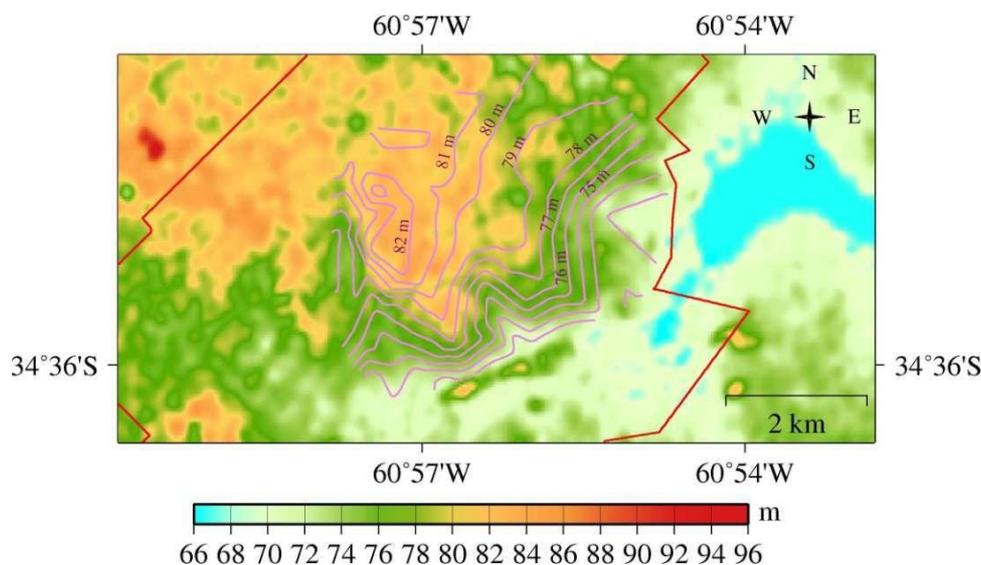


Figura 11 Curvas de nivel obtenidas con la información altimétrica de las ménsulas y el trayecto cinemático, superpuestas sobre la topografía del *SRTMcorregido*. Esta figura es sólo ilustrativa porque no sería geométricamente apropiado utilizar el *SRTMcorregido* en el casco urbano. En rojo se indican los límites de la ciudad de Junín.

Figure 11 Level curves obtained from the local altimetric points and the kinematic path, superposed on the corrected *SRTM3* topography. This figure is just illustrative because it would not be appropriate to use the corrected *SRTM3* in urban areas. The border of the city is depicted in red.

Las alturas del *SRTMcorregido* se ubican 2 m por encima del *MDEurbano*, aun cuando el primero ya fue ajustado en la zona A1. Este es un comportamiento razonable, teniendo en cuenta que si bien las alturas del *SRTM* han sido referidas al “cero” del IGN, no excluye a las construcciones para el caso de las ciudades.

Una manera de integrar la información local con el *SRTMcorregido* es quitarle a éste la información dentro de la ciudad y reemplazar esta por la obtenida a partir de las ménsulas. Esto implicaría cambiar la resolución del *MDEurbano* y llevarla a 90 m, degradando su calidad; o aumentando la resolución del *SRTMcorregido* lo que no aporta mayor información pero permitiría integrar los modelos. Consideramos que esto va más allá de la propuesta para este trabajo y requiere un mayor análisis de la información y la metodología.

Por otra parte, la doble información de alturas de las ménsulas (de nivelación y elipsoidal) no sólo permite agregar detalle al *MDEurbano*, sino que permitiría elaborar un modelo de transformación de alturas propio para la ciudad, compatible con el existente para la provincia. Esto significa que si se cuenta con información geodésica referida a POSGAR07 en cualquier lugar de la ciudad, se podría obtener su cota referida al “cero” del IGN.

CONCLUSIONES

En la subcuenca A1 se estudiaron las discrepancias entre la altura de tres MDE globales y la altura provista por 65 puntos de GPS/nivelación que se utilizaron como GCP. Esta discrepancia resultó del orden de los 0,60 m con una fiabilidad del 90%, siendo el modelo *SRTM3* el que menor desvío presentó. Esto derivó en una corrección relacionada con el origen vertical de las alturas, es decir, el modelo de geoide. Debido a que la subcuenca A1 incluye el sur de la provincia de Santa Fe y originalmente no se contaba con GCP en la región, se desarrolló una metodología para extender la corrección de origen a toda la subcuenca. El promedio de la corrección es de aproximadamente 0,60 m con para los tres modelos lo que reduce las discrepancias originales a valores cercanos al cero.

Por otra parte, la inclusión de tres puntos al Sur de Santa Fe permitió corroborar que la metodología propuesta para extender las correcciones era apropiada siendo que los residuos de las diferencias entre las ondulaciones geoidales estimadas y las observadas son menores al centímetro.

La calidad de los *MDE corregidos* fue evaluada a partir de 11 GCP bien distribuidos en zonas rurales, llanas y libres de vegetación. La estadística, aunque menos robusta que las anteriores, volvió

a indicar que el MDE que mejor representa la topografía es el SRTM3, ahora en su versión *SRTMcorregido*. Este análisis da indicios de que la precisión que puede alcanzarse haciendo uso de este último MDE es cercana al metro en zonas rurales.

Para el casco urbano de la ciudad de Junín se generó un MDE a partir de la información de 55 ménsulas y de observaciones GPS cinemáticas cuya cota fue obtenida a partir del modelo tdaGEOBA. Estos mismos puntos funcionaron como GCP a través de un proceso de validación cruzada que arrojó residuos con promedio cero y DS de 0,22 m con una fiabilidad del 95%.

Por otra parte, las mediciones llevadas a cabo en la ciudad indican que no sólo es posible generar el *MDEurbano* sino también sería posible incluir la información altimétrica en un modelo como tdaGEOBA y así contar con otra herramienta que permita brindar alturas con un error menor a la que se obtiene a partir de los MDE mencionados.

REFERENCIAS

Beumier, C., y Idrissa, M. (Enero de 2015). Deriving a DTM from a DSM by uniform regions and context. *EARSeL eProceedings* 14.

Burgos, V. H. (2009). Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza. Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino. Recuperado de https://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/03_003_Burgos.pdf

Castillo, E. B., Chichiple, M. E., y Salas López, R. (2015). Comparación de los MDE ASTER y SRTM en el análisis morfométrico de la cuenca del Utcubamba (Perú). *INDES*, 3(1), 86-98.

Díaz, G. M., Gomez, M., Deccechis, F., Lencinas, J. D., y del Valle H. F. (2010). Evaluación de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM y su relación con los errores planimétricos de datos pancromáticos quickbird ortorrectificados. Laboratorio de Percepción Remota y SIG. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). Recuperado de http://ciefap.diamo.com.ar/media/publications/D%C3%ADaz_et_al._20102.pdf

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004. doi: 10.1029/2005RG000183

Fan, L., Smethurst, J., Atkinson, P., y Powrie, W. (2014). Propagation of vertical and horizontal source data errors into a TIN with linear interpolation. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(7), 1378-1400. doi: 10.1080/13658816.2014.889299

Felicitísimo, A. M. (1994). Modelos Digitales de Terreno Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones.

Fotopoulos, G. (2003). *An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data*. (PhD Thesis). University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Canada.

Galván, L. (2014). *Análisis y ajuste de modelos digitales de elevaciones en la región central de La Argentina. Integración de modelos geopotenciales e información altimétrica local*. (Tesis de Magister). Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Gamett, B. J. (2010). *An Accuracy Assessment of Digital Elevation Data and Subsequent Hydrologic Delineations in Low Relief Terrain: An Analysis for Idaho's Little Lost River Valley*. (Tesis de Magister), Idaho State University, USA.

Gaspari F. J., Rodríguez Vagaría A. M., Senisterra G. E., Denegri G., Delgado M. I., y Besteiro S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.

Gomez, M. E., Gaspari, F. J., Perdomo, R. A., Simontacchi, L. E., Montealegre Medina, F. A., Rodríguez Vagaría, A. M., Tavarone, M. F., y Senisterra, G. E. (2017). Modelos digitales de elevación: correcciones altimétricas para uso hidrológico en áreas de llanura. *Acta Geologica Lilloana*, 29(1), 39-51.

IGN. (2014). Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina-MDE-Ar. Recuperado de <http://www.ign.gob.ar/content/nuevo-modelo-digital-de-elevaciones-para-la-rep%C3%BAblica-argentina>

IGN. (2008). Marco de referencia Geodésico POSGAR 07. Recuperado de http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/21_Marco_de_Referencia_Geodesico_Posgar_07_Cimbaro.pdf

Heiskanen, W., y Moritz, H., (1967). *Physical Geodesy*. San Francisco and London: W. H. Freeman and Company.

- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821. doi: 10.1038/nclimate1911
- Krabill, W. B., Collins, J. G., Link, L. E., Swift, R. N., y Butler, M. L. (1984). Airborne laser topographic mapping results. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50(6), 685-694.
- Kenyon, S., Factor, J., Pavlis, N., y Holmes, S. (2007). Towards the next earth gravitational model. Recuperado de http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/new_egm/EGM08_papers/EGM-2007-final.pdf
- Lee, D. T., y Schachter, B. J. (1980). Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. *International Journal of Computer & Information Sciences*, 9(3), 219-242. doi: 10.1007/BF00977785
- Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, et al. (1998). The development of the joint NASA/GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt USA.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., y Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30. doi: 10.1002/hyp.3360050103
- MOSP. (1999). Plan Maestro Integral Cuenca del Río Salado (PMRS). Recuperado de <http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/planmaestro.php>
- O'Loughlin, F. E., Paiva, R. C. D., Durand, M., Alsdorf, D. E., y Bates, P. D. (2016). A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, 182, 49-59. doi: 10.1016/j.rse.2016.04.018
- Oñate-Valdivieso, F., y Bosque Sendra, J. (2007). Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. Teledetección: Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional (pp. 457-464). Martín.
- Pacino, C., y Tocho C. (2009). Validation of EGM2008 over Argentina. SIRGAS Report. Recuperado de www.isgeoid.polimi.it/Report_A4_Argentina
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., y Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008): THE EGM2008 EARTH GRAVITATIONAL MODEL. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4), n/a-n/a. doi: 10.1029/2011JB008916
- Perdomo, R., Del Cogliano, D. H., Mendoza, L. P. O., Gomez, M. E., y Bagu, D. R. (2012). Servicio de Transformación de alturas en Buenos Aires tdaGEOBA. Recuperado de <http://geoweb.fcaglp.unlp.edu.ar/tdaGEOBA/>
- Rexer, M., y Hirt, C. (2014). Comparison of free high resolution digital elevation data sets (ASTER GDEM2, SRTM v2.1/v4.1) and validation against accurate heights from the Australian National Gravity Database. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61(2), 213-226. doi: 10.1080/08120099.2014.884983
- Rodriguez, E., Morris, C.S., Belz, J. E., Chapin, E.C., Martin, J. M. y Daffer, W. (2005). *An assessment of the SRTM topographic products* (Technical Report JPLD-31639). Recuperado de https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf
- Rodríguez, E., Morris, C. S., y Belz, J. E. (2006). A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(3), 249-260. doi: 10.14358/PERS.72.3.249
- Simontacchi, L. (2011). *Referencias altimétricas en La Plata, Berisso y Ensenada*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Argentina.
- Smith, W. H. F., y Wessel, P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. *GEOPHYSICS*, 55(3), 293-305. doi: 10.1190/1.1442837
- NASA. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 - summary of validation results. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. Recuperado de https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf
- Valenti, C. (2012). *Análisis de la versión 2011 del modelo de transformación de alturas de la Provincia de Buenos Aires*. (Tesis de Licenciatura en Astronomía) Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Watson, D. F. (1982). Acord: Automatic contouring of raw data. *Computers & Geosciences*, 8(1), 97-101. doi: 10.1016/0098-3004(82)90039-5

Wessel P., y Smith, W.H. F. (2012). The Generic Mapping Tools Technical Reference and Cookbook, Version 4.5.8. Recuperado de https://www.soest.hawaii.edu/gmt/gmt/pdf/GMT_Docs.pdf

Recibido: Noviembre, 2017

Aceptado: Octubre, 2018

ANEXO (APPENDIX)

A. Fórmulas para calcular la exactitud en vertical

$$errorz_i = zm_i - z_i \quad \text{ec. (a1)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum errorz_i^2}{n}} \quad \text{ec. (a2)}$$

Donde z_i representa la altura medida para el punto i , y zm_i es la correspondiente altura obtenida a partir del MDE; RMSE representa el error cuadrático medio

Suponiendo que las diferencias responden a una distribución normal con media cero o aproximada, el error lineal (EL) con una probabilidad del 90% y 95 % está dado por las ecuaciones a3 y a4, respectivamente.

$$EL(90\%) = 1.64 \sqrt{RMSE} \quad \text{ec. (a3)}$$

$$EL(95\%) = 1.96 \sqrt{RMSE} \quad \text{ec. (a4)}$$

B. Fiabilidad de los estimadores según el tamaño de la muestra

De acuerdo con Li (1991) el número de puntos (n) necesarios para calcular la media con error S , siendo Zr la fiabilidad y DS la desviación estándar de la muestra, esta dado por la ec. b1:

$$n = \frac{Zr^2 DS^2}{S^2} \quad \text{ec. (b1)}$$

Y la fiabilidad con la que se puede estimar el DS se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R(DS) = \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}} \times 100\% \quad \text{ec. (b2)}$$

ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE SERIES TEMPORALES DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA CHONE, ECUADOR

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF TIME SERIES FROM METEOROLOGICAL VARIABLES IN THE CLIMATOLOGICAL STATION CHONE, ECUADOR

María Fernanda Ayala¹, Alfonso Tierra², David Carrera-Villacrés^{2,3}

1 Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Av. General Rumiñahui s/n y Paseo Escénico Santa Clara, Sangolquí – Ecuador.

2 Centro Geoespacial. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Av. General Rumiñahui s/n y Paseo Escénico Santa Clara, Sangolquí – Ecuador.

3 Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Geología Minas Petróleos y Ambiental FIGEMPA. Carrera de Ingeniería Ambiental.

E-mail: mfayala@espe.edu.ec

RESUMEN

Estudiar el clima ha sido de gran interés a lo largo de la historia, desde el siglo XVII con la creación de los primeros instrumentos de medición de variables meteorológicas, siendo el principal motivo realizar predicciones acertadas. Se suelen utilizar métodos matemáticos, estadísticos y programas informáticos los cuales la mayoría son de naturaleza lineal. Esto provoca que en muchos casos la información relevante y los componentes no lineales permanezcan escondidos. En el trabajo se analizó el comportamiento dinámico, mediante técnicas de análisis no lineal, de las siguientes variables meteorológicas: precipitación, evaporación, temperatura y velocidad del viento, de la estación climatológica principal de Chone (M0162), cuyos registros fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se utilizó el software Matlab para aplicar tres técnicas de medida del caos sobre las cuatro variables en estudio con el fin de buscar algún indicio de caos en las series. La primera técnica que se utilizó fue la distribución de probabilidades, seguida de la reconstrucción de diagramas de espacio de fases y finalmente se elaboraron mapas recurrentes. Se obtuvieron como resultados cuatro histogramas, cuatro diagramas de espacio de fases y cuatro mapas recurrentes correspondientes a las variables estudiadas. Los resultados fueron clasificados de acuerdo a su dinámica. Finalmente, mediante un test de sustitutos y el análisis de recurrencia cuantitativa, se pudo distinguir un leve grado de determinismo en las series, concluyendo así que las variables no son estocásticas.

Palabras clave: Caos, espacio de fases, mapas recurrentes, variables meteorológicas, test de los sustitutos.

ABSTRACT

Climate studies have been a subject of great interest through history, since the XVII century with the creation of the first measurement instruments for meteorological variables, being the main reason the performance of accurate weather forecasts. Mathematical, statistical and computational methods are commonly used for this purpose but most of them are linear in nature. This causes relevant information and nonlinear components to remain hidden. In this study, the dynamic behavior of the meteorological variables rainfall, evaporation, temperature, and wind speed, at the climatological

station of Chone (M0162) were analyzed. Weather observations were provided by the Ecuadorian Institute for Meteorology and Hydrology (INAMHI). The Matlab software allowed us to perform three chaos measurement techniques on the four variables studied in order to seek some hints of chaos in the time series. The first technique used was the probability distribution, followed by the reconstruction of the phase space diagrams, and finally the recurrence plot of each variable was constructed. As a result, four histograms, four phase space diagrams and four recurrence plots of the variables were obtained. The results were classified according to their dynamics. Finally, using the recurrence quantification analysis and a surrogate test it was possible to distinguish a slight degree of determinism in the time series, concluding that the variables were not stochastic.

Keywords: Chaos, phase space, recurrence plots, meteorological variables, surrogate test.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia ha sido de gran interés estudiar a los fenómenos y las variables atmosféricas, tales como la precipitación, presión y temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, nubosidad, con la finalidad de realizar pronósticos del clima acertados (Espinosa, 2004; Inzunza, 2000). Las primeras mediciones de estas variables empezaron en el siglo XVII con la creación de los instrumentos para medir variables meteorológicas como el termómetro de Galileo, el barómetro de Torricelli y el anemómetro de Hooke (Palomares, 2015). Las variables meteorológicas suelen ser modeladas mediante técnicas computacionales, numéricas y estadísticas de las cuales la mayoría son de naturaleza lineal, lo que provoca que en muchos casos la información relevante y los componentes no lineales de las series, permanezcan escondidos (Millán et al., 2010). En los estudios meteorológicos es primordial realizar predicciones del clima para distintas escalas de tiempo, por lo que resulta de mucha utilidad estudiar la evolución de las variables meteorológicas, buscando así revelar algún patrón de comportamiento que se repita a lo largo de la línea del tiempo. El análisis del caos logra simplificar fenómenos muy complicados, sirve para demostrar cuantitativamente un orden en el comportamiento irregular de una variable que presenta una sucesión de números que parecen ser escogidos al azar. Con los estudios de la dinámica no-lineal se ha podido tener interpretación diferente del fenómeno que es bastante prometedora dando una nueva perspectiva acerca de su situación actual (Espinosa, 2004). Actualmente en el Ecuador, son escasos los estudios que contemplan el carácter caótico de la atmósfera y el comportamiento de las variables meteorológicas específicas para el país.

El agua es un recurso esencial para el desarrollo agrícola sustentable; su explotación, uso y conservación son elementos esenciales en cualquier estrategia de desarrollo. El estado ecuatoriano construyó el Proyecto Multipropósito de Chone (PPMCH) dentro del cual está inmersa la presa del Río Grande y un sistema de riego para abastecer aproximadamente a 2000 ha. del territorio, con el fin de evitar el exceso y escasez del recurso hídrico en la zona de Manabí (Carrera et al., 2015). Los conocimientos que se obtendrán en este estudio ayudarán a comprender de mejor manera el comportamiento de las variables meteorológicas de la zona de Chone. Se aportará de esta manera a la investigación realizada sobre la dinámica de los fenómenos atmosféricos desde el punto de vista de la teoría del caos que se está realizando en el Ecuador. Esto abrirá nuevas puertas para que, posteriormente se utilicen técnicas más acertadas para el modelado de la serie temporal. El objetivo planteado en esta investigación fue caracterizar cuantitativamente las series temporales de variables meteorológicas de la estación climatológica principal de Chone para determinar su comportamiento dinámico utilizando técnicas de análisis de dinámica no lineal.

TÉCNICAS DE MEDIDAS DEL CAOS

La teoría del caos se define como “el estudio del comportamiento aperiódico en sistemas dinámicos no lineales” (Moore, 2006). Es un modelo teórico que intenta explicar el proceder de sistemas dinámicos que en un principio parecen desarrollarse aleatoriamente, proponiendo una nueva manera de estudiar y comprender la realidad (Coppo, 2010). Un beneficio de estudiar el caos, es la posibilidad de llegar a realizar predicciones a corto tiempo más acertadas, además de indicar la factibilidad de realizar predicciones a largo tiempo. El estudio del caos puede ayudar a mejorar el modelado de un sistema (Williams, 1997).

Según Espinosa (2004) la determinación del comportamiento dinámico, puede ser realizada mediante histogramas, espacio de fases, mapas recurrentes, y son mostradas visualmente en la Figura 1.

Histogramas

La distribución de probabilidades de un punto fijo será un pico localizado en el valor del punto a lo largo de las abscisas y se extenderá verticalmente hasta la probabilidad de 1 o el máximo valor de frecuencias (Williams, 1997). Los histogramas de información periódica y cuasiperiódica tendrán bordes y puntas filosas (Espinosa, 2004; Aștefănoaei et al., 2013; Lan, 2005). Los datos caóticos tendrán histogramas con una serie de picos afilados, más o menos uniformemente espaciados (Rivera, 2004). Usualmente una distribución Maxwelliana es el resultado de datos aleatorios, pero también puede ser el caso para datos caóticos pertenecientes a sistemas muy complejos. Algunos sistemas caóticos son caracterizados por tener una distribución con una forma que sugiere una simetría repetitiva (fractal) (Aștefănoaei et al., 2013).

Espacio de fases

El espacio de fases contiene a todos los posibles estados del sistema. Cada punto en el espacio de fases corresponde a un estado único y la evolución en el tiempo del sistema crea una trayectoria (Ivancevic y Ivancevic, 2007; Kliková y Raidl, 2011). Usualmente la observación de un proceso real no puede abarcar todas las posibles variables de estado del sistema, debido a que no todas son conocidas o no todas pueden ser medidas. Cada componente individual contiene información esencial sobre la dinámica de todo el sistema. Por lo tanto, se puede reconstruir una trayectoria de espacio de fases equivalente a la original que preserve la estructura topológica de la trayectoria de espacio de fases original utilizando únicamente una serie temporal (Marwan y Kurths, 2004). Uno de los métodos que se utilizan frecuentemente para la reconstrucción del espacio de fases es el método de retrasos en el tiempo (Time Delay) (Kliková y Raidl, 2011). Dicho método utiliza varias derivadas de los datos las cuales son graficadas contra los valores de los datos obteniendo una gráfica que revela la topología y evolución de la solución. Se utiliza la serie original y retrasos en tiempo de ésta (Espinosa, 2004). El vector de retraso en un instante t se puede determinar mediante la ecuación (1) (Carrión et al., 2014; Rong-Yi y Xiao-Jing, 2011).

$$\vec{x} = (x_t, x_{t+r}, x_{t+2r}, \dots, x_{t+(m-1)r}) \quad \text{ec. (1)}$$

donde:

$t = 1, 2, 3, \dots, N$.

N = Número de vectores. Es igual a $N = L - (m-1)\tau$, lo que quiere decir que existirán N puntos (estados) en el espacio de fases reconstruido. L es el número de observaciones o tamaño de la muestra.

τ = Tiempo de retraso (Time lag)

m = Dimensión inmersa (Embedding dimension)

La tarea principal al utilizar este método es determinar apropiadamente los valores de τ y m (Kliková y Raidl, 2011).

El espacio de fases de una constante será un punto en el espacio de fases (Espinosa, 2004; Rickles et al., 2007), una serie periódica mostrará una curva errada (Özer y Erhan, 2005). Cuando el sistema es cuasiperiódico genera un atractor similar al periódico, pero las trayectorias no siempre pasarán por los mismos puntos, mostrando un comportamiento no uniforme (Mouronte, 2004). Las series caóticas mostrarán curvas distintas con alejamientos y acercamientos de trayectorias, además muestran figuras discernibles (Espinosa, 2004; Özer y Erhan, 2005). Las series aleatorias presentaran espacios de fases con colecciones borrosas de trayectorias y patrones no discernibles.

Mapas Recurrentes

Un mapa recurrente es una matriz de puntos (i, j) donde se dice que cada punto es recurrente y marcado si la distancia entre los vectores retardados \vec{x}_i y \vec{x}_j es menor a un umbral dado (ϵ); la distancia puede ser calculada mediante una norma ("·") entre todas las combinaciones de vectores de retraso. Cada coordenada i representa un punto en el tiempo por lo cual estos mapas proveen información sobre la correlación existente entre los puntos del espacio de fases. En efecto cada

coordenada horizontal i , en un mapa recurrente representa el estado del sistema en i , y cada coordenada vertical j se refiere al estado del sistema en j . Así que si el punto (i, j) está marcado como recurrente, el estado j pertenece al vecindario centrado en i de tamaño ε . Esto significa que el estado del sistema en el instante i tiene cierta "similitud" con el estado del sistema en j , en otras palabras, se puede decir que el sistema se mantiene en "órbitas" cercanas. La matriz de puntos del mapa recurrente ($RP_{i,j}$) se determina mediante la ecuación (2) (Fabretti y Ausloos, 2005; Marwan et al., 2007).

$$RP_{i,j}(s) = \Theta(s - \|x_i - x_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N \quad \text{ec. (2)}$$

Donde,

$\Theta(\cdot)$ es una función escalón unitario que toma los valores de 1 o de 0 de acuerdo a la siguiente ecuación (3):

$$RP_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{si } \|x_i - x_j\| > s \\ 1, & \text{si } \|x_i - x_j\| < s \end{cases} \quad \text{ec. (3)}$$

Existen herramientas que cuantifican las pequeñas estructuras halladas en los mapas recurrentes (diagonales, densidad de puntos, líneas verticales y horizontales, etc.). Algunas de las herramientas que se utilizan comúnmente son: Tasa de recurrencia (Recurrence rate, RR), determinismo (Determinism, DET), entropía (Entropy, $ENTR$) (Marwan et al., 2007; Webber y Zbilut, 2005). A continuación, se describe a dos herramientas del análisis cuantitativo de recurrencia que se utilizaron en esta investigación:

Tasa de recurrencia (RR): Es una medida de la densidad de puntos recurrentes en el mapa recurrente, se calcula mediante la ecuación (4) (Marwan et al., 2007).

$$RR(s) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N RP_{i,j}(s) \quad \text{ec. (4)}$$

Determinismo (DET): Mide la cantidad de puntos recurrentes que forman estructuras diagonales en el mapa recurrente, se calcula mediante la ecuación (5) (Marwan et al., 2007; Webber y Zbilut, 2005).

$$DET = \frac{\sum_{l=lmin}^N lP(l)}{\sum_{i,j}^N RP_{i,j}} \quad \text{ec. (5)}$$

Donde,

$lmin$ = la longitud mínima de las diagonales.

$P(l) = \{l_i = 1, \dots, N\}$ es el histograma de longitudes (l) de las líneas diagonales.

N = la cantidad total de líneas diagonales.

En la Tabla 1, se muestra un resumen sobre la tipología y texturas, que se pueden encontrar en los mapas recurrentes, con una breve interpretación.

Prueba de normalidad

La prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov o $K-S$ test es definida por la ecuación (6):

$$d = \text{Máx}|f(x) - E(x)| \quad \text{ec. (6)}$$

Donde, $f(x)$ es la función de distribución acumulada (cdf) normal y $E(x)$ es la cdf empírica. Si la d máxima observada es mayor a un valor crítico (CV), se prueba que $E(x)$ discrepa de la distribución teórica $f(x)$ con un nivel de significancia (α). Se establece una hipótesis nula H_0 : Los datos tienen una distribución normal ($d < CV_{(\alpha,L)}$), y H_A : Los datos no tienen una distribución normal ($d \geq CV_{(\alpha,L)}$).

Patrón	Interpretación
Homogeneidad	El proceso es estacionario
Desvanecimiento en las esquinas superior izquierda e inferior derecha	Los datos no son estacionarios, tienen una tendencia
Interrupciones (Franjas de color blanco)	Los datos no son estacionarios, existen transiciones fuera de lo normal
Patrones periódicos/ cuasiperiódicos	Hay ciclicidades en el proceso
Puntos aislados	Fuerte fluctuación en el proceso, si solo se tiene puntos aislados el proceso puede ser aleatorio
Líneas diagonales (Paralelas a la diagonal principal)	La evolución de los estados es similar en diferentes épocas, el proceso puede ser determinista, si estas diagonales ocurren alado de puntos aislados el proceso puede ser caótico
Líneas diagonales (Ortogonales a la diagonal principal)	La evolución de los estados es similar pero con tiempo reverso, esto es un indicador de una mala inmersión
Líneas verticales y horizontales/ agrupaciones	Algunos estados no cambian o cambian lentamente durante un tiempo
Líneas arqueadas largas	La evolución de los estados es similar en diferentes épocas, pero con diferente velocidad.

Tabla 1 Patrones en los mapas recurrentes. Fuente: (Marwan et al., 2007), modificado por los autores.
Table 1 Typical patterns in recurrence plots. Source: (Marwan et al., 2007), modified by the authors.

A continuación, en la Figura 1 se muestra visualmente la clasificación de Espinosa (2004):

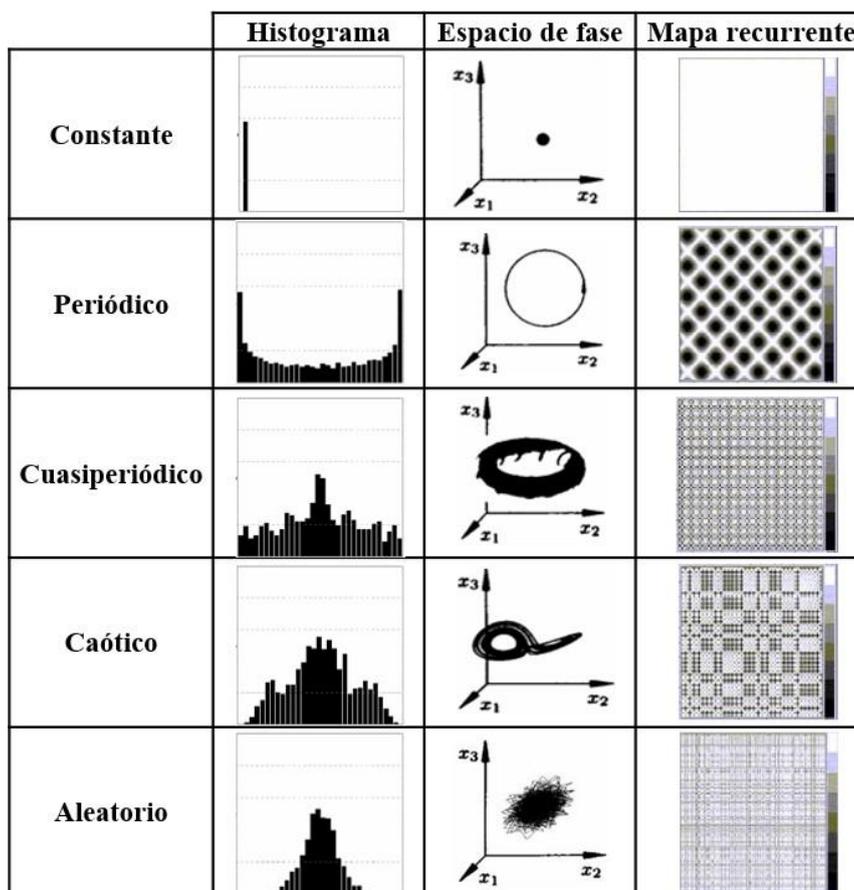


Figura 1 Clasificación de histogramas, espacios de fase y mapas recurrentes de acuerdo a su dinámica. Fuente: (Espinosa, 2004), modificado por los autores.

Figure 1 Classification of histograms, phase space and recurrence plots according to their dynamics. Source: (Espinosa, 2004), modified by the authors.

Prueba de los sustitutos

El algoritmo más simple para generar datos sustitutos es el mezclado aleatorio (random shuffling), el cual es una simple permutación donde se incluyen todos los datos originales, pero en un orden aleatorio. Dicho método garantiza que los datos sustitutos conserven la distribución de los datos originales (Dolan y Spano, 2001). El método de los datos sustitutos es utilizado para detectar no linealidad y determinismo en las series de tiempo (Coelho et al., 2008). A continuación, se resume el procedimiento para establecer una prueba estadística de hipótesis (Gutiérrez y Mejía, 2012):

- Seleccionar una hipótesis nula (H_0).
- Generar un conjunto de señales sustitutas que satisfagan la hipótesis y sean similares a los datos originales. Para probar una hipótesis nula con un nivel de significancia (α), se deben generar al menos n datos sustitutos: $n = \frac{2}{\alpha} - 1$.
- Se elige un estadístico no lineal. En este caso fue el valor de DET el cual se calculó para los datos originales y los sustitutos
- Elegir un criterio para determinar si se rechaza o no la hipótesis.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área donde se encuentra la estación climatológica tiene un clima de tipo tropical, la temperatura del aire registra una media anual de 25,6 °C, máxima media anual de 33,6 °C y mínima media anual de 20,1 °C. A lo largo de su historia la ciudad de Chone ha sido afectada por una serie de inundaciones masivas y continuas en su espacio geográfico provocadas por el fenómeno “El Niño” (ACOLIT, 2008). En el año 2015, se inauguró en Chone el proyecto multipropósito Chone (PPMCH), el cual cuenta con una presa hídrica que tiene como propósito controlar el cauce del río grande y mitigar las inundaciones (SENAGUA, 2015). En la Figura 2, se muestra el área de estudio, obtenida de la página: <http://www.geoportaligm.gob.ec/>. Se puede observar la localización de la ciudad de Chone (en color plomo), la estación climatológica principal de Chone (M0162) (triángulo verde), y la presa del PPMCH localizada al este de la ciudad (rectángulo verde).

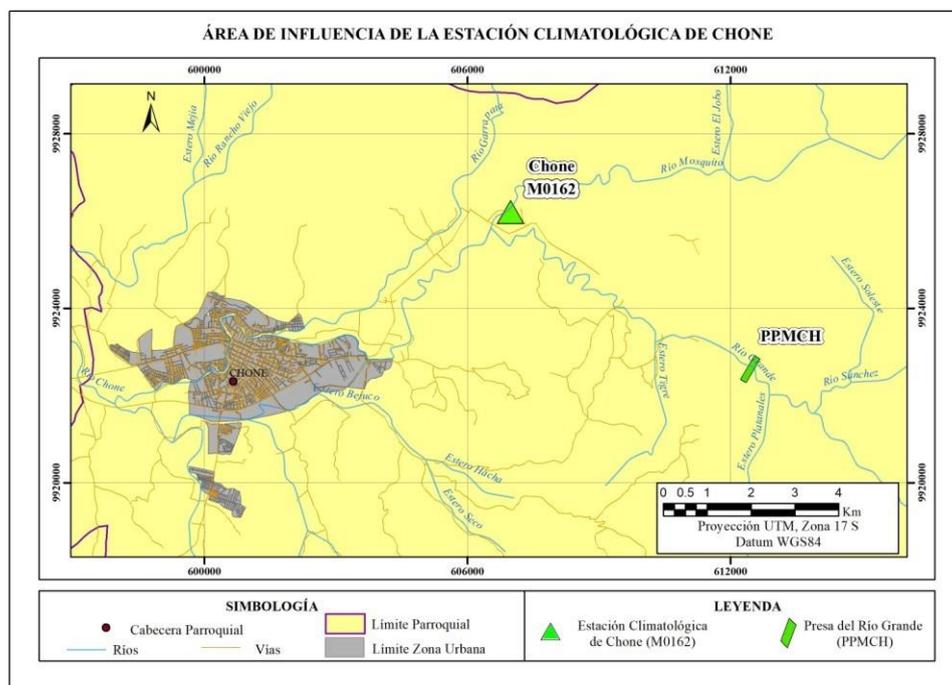


Figura 2. Área de influencia de la estación climatológica de Chone (606933m E, 9926197m S, Altura 39 msnm)
Figure 2 The weather station of Chone influence area (606933m E, 9926197m S, Altitude 39 MAMSL)

Datos recopilados

En el estudio se utilizaron 595 datos mensuales de la precipitación media medida en milímetros (mm) desde el año 1962 hasta el año 2015, 253 datos mensuales de la evaporación media medida en milímetros (mm) desde el año 1991 hasta el año 2015, 544 datos mensuales de temperatura media medida en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) desde el año 1965 hasta el año 2015 y 288 datos mensuales de la velocidad del viento media medida en metros sobre segundos (m/s) desde el año 1991 hasta el año 2015. Los registros de estos datos fueron validados y entregados por el INAMHI. Sin embargo, existieron datos faltantes dentro de las series de tiempo. La investigación requirió trabajar con series continuas, por lo que se utilizó la metodología de regresión lineal simple debido a que es uno de los métodos que propone la Organización Meteorológica Mundial en la Guía de Prácticas Climatológicas OMM No. 100 para el relleno de datos faltantes, y es recomendado para la estimación de datos mensuales y anuales (Pizarro, et al., 2009 y OMM 2011), además de ser la mejor metodología para el relleno de datos en series temporales para la región andina y costera del Ecuador (Carrera, et al., 2016). El relleno de datos fue validado mediante una prueba de rachas y una curva doble de masa. Esto permitió trabajar finalmente con 648 datos de precipitación, 300 datos de evaporación, 612 datos de temperatura y 300 datos de velocidad del viento. Las series de tiempo completas de las variables se pueden ver en la Figura 3.

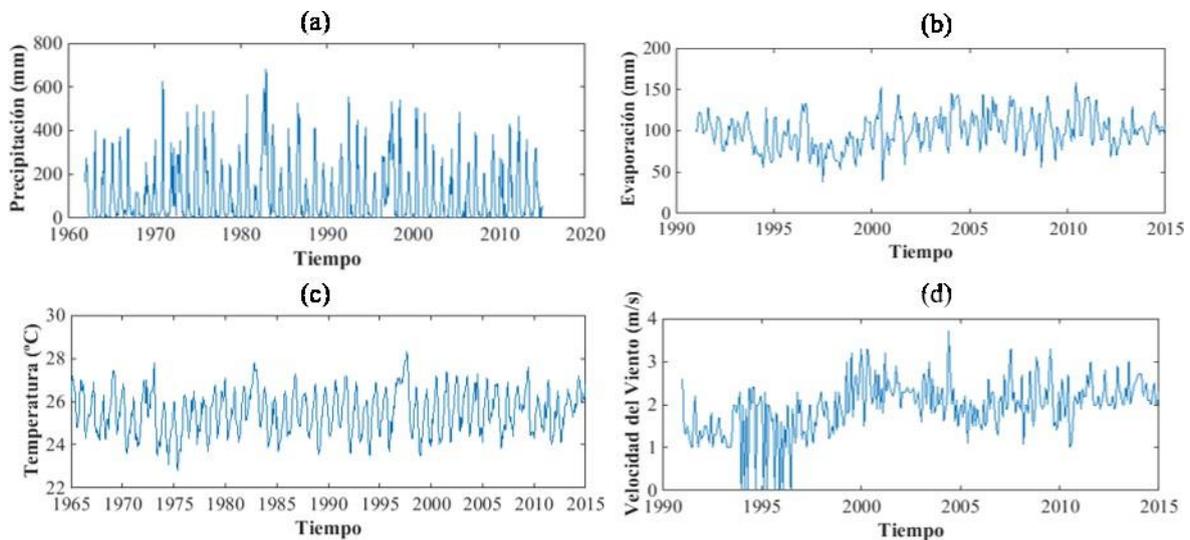


Figura 3 Series completas de las variables: (a) precipitación, (b) evaporación, (c) temperatura y (d) velocidad del viento.

Figure 3 Complete series for each variable: (a) rainfall, (b) evaporation, (c) temperature, and (d) wind speed.

Desestacionalización de las series temporales

Antes de estimar los parámetros de inmersión (τ - tiempo de retraso, m - dimensión inmersa), fue necesario remover el componente estacional de las series, debido a que la presencia de ciclos estacionales anuales, pueden conducir a conclusiones erróneas, ya que ésta eleva el valor de la información mutua y la autocorrelación en las series (Mokhov et al., 2011; Steinhäuser et al., 2011).

Determinación de los parámetros de inmersión

El espacio de fases de cada variable se reconstruyó utilizando el método de los retrasos en el tiempo, utilizando la ecuación (1), para lo cual se estimaron τ y m del espacio de reconstrucción utilizando dos técnicas, la primera se trata de dos de los métodos tradicionales para encontrar τ y m : la función de autocorrelación y los falsos vecinos más cercanos, respectivamente. La segunda técnica utilizada es la región sensitiva de determinismo propuesta por Wendi et al. (2017), la cual sirvió para encontrar la combinación de parámetros de inmersión óptimos dentro de una zona segura libre de artificios. Finalmente se utilizó los parámetros resultantes en común de ambos métodos.

Construcción de espacio de fases y mapas recurrentes

Para la construcción de espacios de fases y mapas recurrentes se utilizó la caja de herramientas desarrollada por Norbert Marwan en el año 2009: Cross Recurrence Plot Toolbox for Matlab, disponible en la página web: <http://tocsy.pik-potsdam.de/CRPtoolbox/>. Se definieron los parámetros de inmersión obtenidos en la Tabla 3. Se fijó una tasa de RR con la ecuación (4) correspondiente a 0,1 en lugar de fijar un umbral ϵ , ya que así se tiene una manera más objetiva de comparar las propiedades topológicas obtenidas en los distintos mapas recurrentes (Mesin et al., 2014; Zou et al., 2010), además de que al preservar la densidad de puntos recurrentes no se necesita normalizar previamente a las series de tiempo. Se utilizó la norma L_∞ debido a que tarda menos tiempo en su procesamiento y permite estudiar analíticamente ciertas características propias de los mapas recurrentes (Marwan et al., 2007).

RESULTADOS

Histogramas

Se analizó los histogramas de las cuatro variables. En primera instancia, se identificó su forma, con el afán de compararlos con la clasificación de Espinosa (2004). Las variables evaporación, temperatura y velocidad del viento presentaron una forma simétrica correspondiente a la dinámica aleatoria según dicha clasificación. Luego se realizó la prueba de normalidad $K-S$ test, mediante la cual se pudo demostrar si los datos eran o no provenientes de una distribución gaussiana. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las variables.

Variable	Forma	$K-s$ test	H_0	Distribución
Precipitación	J invertida	$d= 0,22$ $CV= 0,05$	$d > CV$ $\alpha= 5\%$ Se rechazó	No gaussiana
Evaporación	Simétrica	$d= 0,03$ $CV= 0,07$	$d < CV$ $\alpha= 5\%$ No se rechazó	Gaussiana
Temperatura	Simétrica	$d= 0,06$ $CV= 0,05$	$d > CV$ Se rechazó	No gaussiana
Velocidad del viento	Simétrica	$d= 0,11$ $CV= 0,07$	$d > CV$ Se rechazó	No gaussiana

Tabla 2 Resultados de la prueba de normalidad de cada una de las variables
Table 2 The results of the $K-S$ test applied for each variable are shown

En la Figura 4, se muestran los histogramas obtenidos de las series de tiempo de las variables estudiadas y la comparación visual de la cdf de cada variable (empírica) con la cdf normal estándar proveniente de la prueba de normalidad.

Parámetros de inmersión

Previo a la obtención de los diagramas de espacio de fases y mapas recurrentes, se presentan en la Tabla 3, los parámetros de inmersión resultantes para cada una de las variables.

Variable	Tiempo de retraso τ	Dimensión inmersa m
Precipitación	2	3
Evaporación	3	5
Temperatura	7	7
Velocidad del viento	4	7

Tabla 3 Tiempo de retraso y dimensión inmersa calculados para cada variable.

Table 3 Time delay and embedding dimension calculated for each variable.

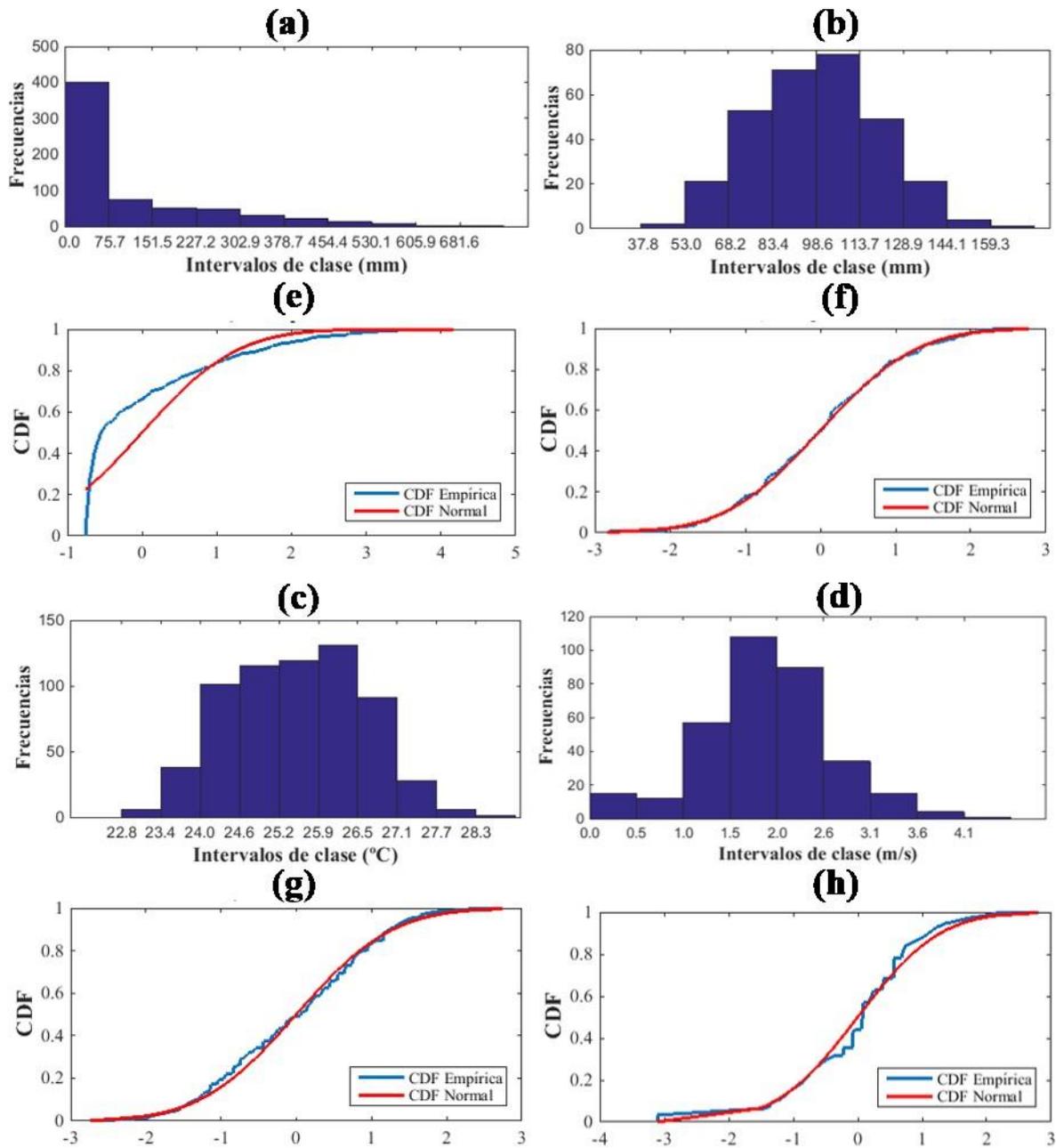


Figura 4 Histogramas y función de distribución acumulada (*K-S test*) de: precipitación (a) y (e), evaporación (b) y (f), temperatura (c) y (g), velocidad del viento (d) y (h), respectivamente.
Figure 4 Histograms and cumulative distribution function (*K-S test*) for each variable respectively: rainfall (a) and (e), evaporation (b) and (f), temperature (c) and (g), wind speed (d) and (h).

Espacios de fases

Una vez calculados los parámetros de inmersión, se obtuvo la reconstrucción de los diagramas de espacio de fases de las series de tiempo (Figura 5), los cuales presentaron una colección borrosa de trayectorias con patrones no discernibles, con un solo lugar de acumulación de trayectorias similar a la estructura de los espacios de fases correspondientes a datos aleatorios según la clasificación de Espinosa (2004).

Mapas recurrentes

En el mapa recurrente de la variable precipitación mostrado en la Figura 6 (a), se distinguen interrupciones o franjas de color blanco, en donde no existen puntos recurrentes marcando así los eventos extremos en la serie, las franjas blancas que más se destacaron visualmente corresponden a aquellas de los años 1965, 1966, 1972, 1976, 1983, 1997, 1998 y 2006. Dichos años coinciden con eventos del fenómeno “El Niño”. En la Figura 6 (b) se puede apreciar un acercamiento del mapa recurrente donde se distinguieron líneas horizontales y puntos aislados. En un segundo acercamiento, mostrado en la Figura 6 (c), se distinguen líneas diagonales paralelas a la diagonal principal. En un tercer acercamiento mostrado en la Figura 6 (d), se encontró agrupaciones de líneas verticales y horizontales. Según la clasificación de Espinosa (2004), el mapa recurrente de la variable precipitación es caótico.

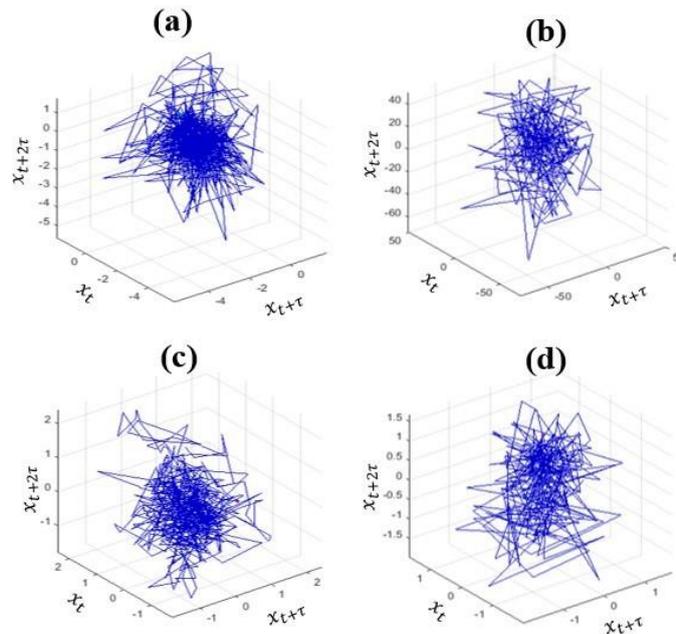


Figura 5 Espacio de fases de las variables: (a) Precipitación, (b) Evaporación, (c) Temperatura y (d) Velocidad del viento.

Figure 5 Phase space diagram of the variable: (a) rainfall, (b) evaporation, (c) temperature, and (d) wind speed.

El mapa recurrente de la variable evaporación se puede visualizar en la Figura 7 (a), las franjas blancas que más se destacaron visualmente corresponden a aquellas de los años: 1994, 1997, 1998, 2000, 2004 y 2011. En la Figura 7 (b), se puede apreciar un acercamiento del mapa recurrente donde se distinguieron líneas verticales, horizontales y puntos aislados. En un segundo acercamiento mostrado en la Figura 7 (c), se encontraron líneas diagonales paralelas a la diagonal principal. En un tercer acercamiento mostrado en la Figura 7 (d), se distinguen agrupaciones de líneas verticales y horizontales. Según la clasificación de Espinosa (2004), el mapa recurrente de la variable evaporación es caótico.

En el mapa recurrente de la variable temperatura, mostrado en la Figura 8 (a), las franjas blancas que más se destacaron visualmente corresponden a aquellas de los años de 1980 a 1983 y de 1994 a 1998. Se observaron además patrones periódicos, en donde se tiene estructuras diagonales paralelas a la diagonal principal. En la Figura 8 (b), se pudo apreciar un acercamiento del mapa recurrente donde se distinguieron líneas horizontales y puntos formando agrupaciones. En un segundo acercamiento mostrado en la Figura 8 (c), existen franjas de color blanco lo que indica cambios de estado, sin embargo, en el período de 1979 a 1984 con 1994 al 1998 hay la presencia de una diagonal larga en medio de estas interrupciones, revelando épocas de evolución de estados similares. En un tercer acercamiento mostrado en la Figura 8 (d) se encontró una combinación de líneas verticales, horizontales y puntos aislados. De acuerdo a la Figura 1, el mapa recurrente de la variable temperatura es caótico.

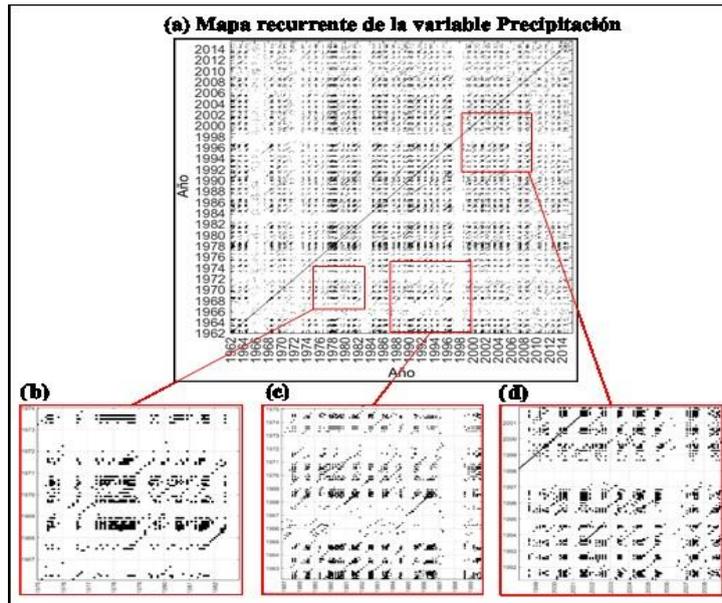


Figura 6. Se muestra en (a): el mapa recurrente de la variable precipitación. En (b), (c) y (d): se muestran las estructuras encontradas en tres acercamientos de distintas zonas del mapa recurrente.
Figure 6 In (a): recurrence plot of rainfall. In (b), (c) and (d): the structures found in three approaches of different areas of the recurrence plot are shown.

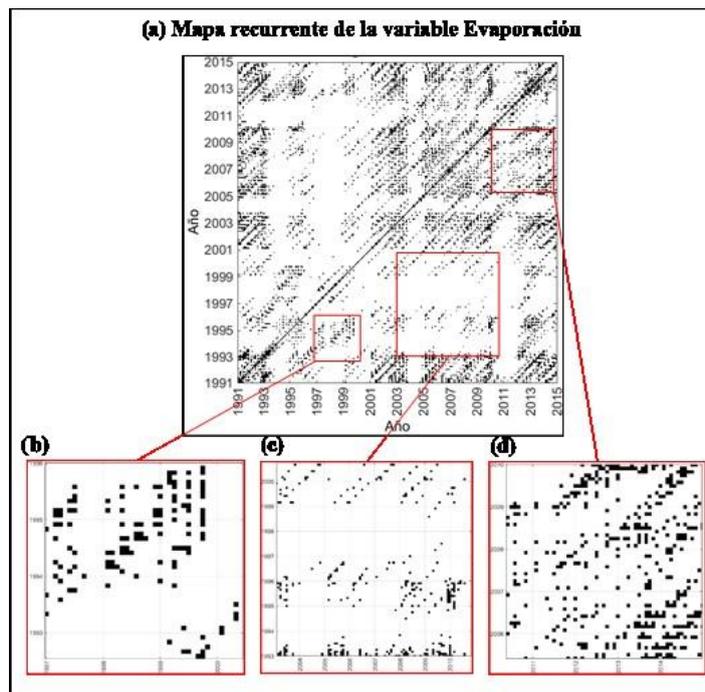


Figura 7. Se muestra en (a): el mapa recurrente de la variable evaporación. En (b), (c) y (d): se muestran las estructuras encontradas en tres acercamientos de distintas zonas del mapa recurrente.
Figure 7 In (a): recurrence plot of evaporation. In (b), (c) and (d): the structures found in three approaches of different areas of the recurrence plot are shown.

En el mapa recurrente de la variable velocidad del viento mostrado en la Figura 9 (a), las franjas blancas que más se destacaron visualmente corresponden a aquellas de los años de 1991 a 1993, 1995 y 1999. En la Figura 9 (b), se pudo apreciar un acercamiento del mapa recurrente donde se distinguieron pequeñas líneas horizontales y verticales, y algunos puntos aislados. En un segundo

acercamiento mostrado en la Figura 9 (c), se encontraron líneas horizontales en conjunto con puntos aislados. En un tercer acercamiento mostrado en la Figura 9 (d) se encontraron agrupaciones de líneas verticales, horizontales, líneas diagonales y líneas interrumpidas provocando puntos aislados. Según la clasificación de Espinosa (2004), el mapa recurrente de la variable velocidad del viento es caótico.

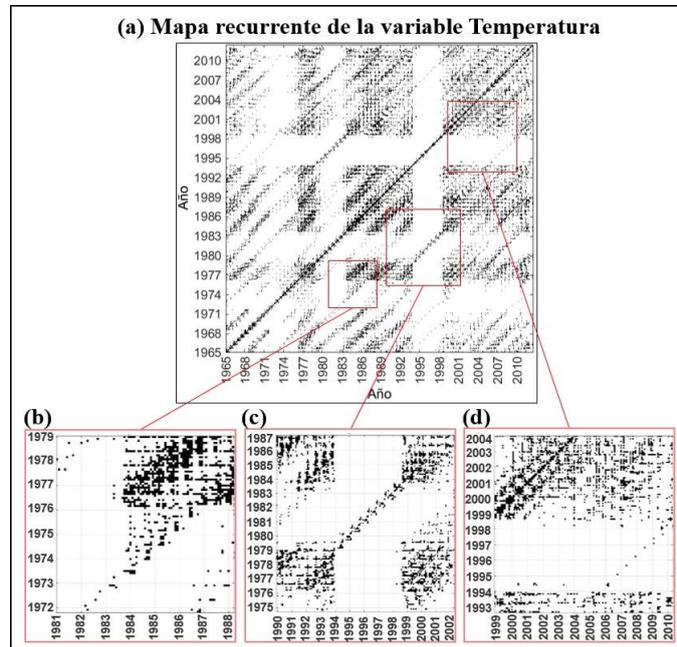


Figura 8. Se muestra en (a): el mapa recurrente de la variable temperatura. En (b), (c) y (d): se muestran las estructuras encontradas en tres acercamientos de distintas zonas del mapa recurrente.

Figure 8 In (a): recurrence plot of temperature. In (b), (c) and (d): the structures found in three approaches of different areas of the recurrence plot are shown.

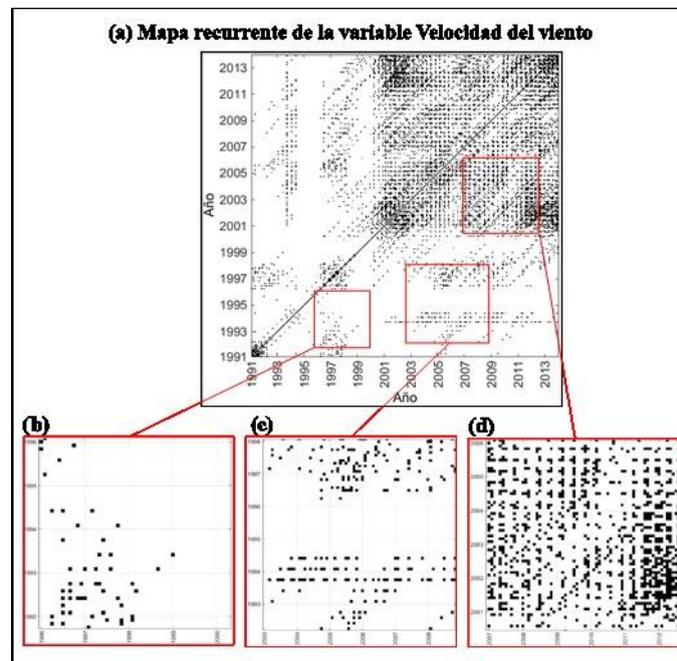


Figura 9- Se muestra en (a): el mapa recurrente de la variable velocidad del viento. En (b), (c) y (d): se muestran las estructuras encontradas en tres acercamientos de distintas zonas del mapa recurrente.

Figure 9 In (a): recurrence plot of wind speed. In (b), (c) and (d): the structures found in three approaches of different areas of the recurrence plot are shown.

Prueba de los sustitutos

La hipótesis de la investigación fue que las variables meteorológicas de la estación M0162 de Chone son estocásticas. Se crearon 100 aleatorizaciones ($n=100$), a partir de un mezclado aleatorio de las series de tiempo de cada una de las variables por separado. Se utilizó como discriminante el valor del determinismo (DET) de la serie de tiempo desestacionalizada y se la comparó con el valor DET en el percentil $P95$ proveniente de las 100 series aleatorizadas generadas. El DET de la serie original y de las series aleatorizadas fue calculado utilizando los parámetros de inmersión obtenidos en la Tabla 3. El criterio utilizado para aceptar o rechazar la hipótesis nula fue el siguiente: Si el DET de la serie de tiempo de la variable desestacionalizada es mayor que el DET del percentil $P95$ proveniente de las 100 versiones aleatorias generadas de la serie, se rechaza H_0 . A continuación, se muestran como ejemplo los resultados obtenidos del test de los sustitutos para la variable precipitación.

Prueba de los sustitutos para la variable precipitación

La hipótesis nula (H_0) e hipótesis alternativa (H_A), fueron planteadas de la siguiente manera,

H_0 : la variable precipitación es estocástica

H_A : la variable precipitación no es estocástica

Se obtuvo un valor de determinismo de la serie de precipitación desestacionalizada correspondiente a $DET_{(precipitación)} = 0,221$. Se comparó dicho valor con el determinismo en el percentil $P95$ de las 100 versiones aleatorias generadas de la serie de precipitación correspondiente a $DET_{(P95)} = 0,176$. Al ser $DET_{(precipitación)} > DET_{(P95)}$, se rechazó H_0 y se aceptó H_A con un nivel de significancia del 5%.

De manera similar se aplicó la prueba de los sustitutos a las otras tres variables consideradas en esta investigación, cuyos resultados se visualizan resumidos en la Tabla 4.

Variable	Parámetros de inmersión		DET ($P95$)	DET (variable)	H_0
	m	τ			
Precipitación	3	2	0,176	0,221	Se rechaza
Evaporación	5	3	0,213	0,364	Se rechaza
Temperatura	7	7	0,216	0,497	Se rechaza
Velocidad del viento	7	4	0,211	0,395	Se rechaza

Tabla 4 Resultados de la prueba de los sustitutos aplicada a las variables estudiadas.

Table 4 The results of the surrogate test applied for each variable are shown.

DISCUSIÓN

Los histogramas de las variables evaporación, temperatura y velocidad del viento presentaron una distribución similar a la distribución gaussiana perteneciente a datos aleatorios según la clasificación de Espinosa (2004). Sin embargo, al realizar una prueba de normalidad sobre los datos, se pudo determinar que únicamente la distribución de la serie de tiempo de evaporación es coincidente con la distribución gaussiana (Figura 4). En un estudio realizado por Huth y Pokorna (2004) en Republica Checa se evaluó la normalidad de los promedios estacionales y anuales de 10 variables climáticas utilizando la prueba de normalidad de Kolmogorv-Smirnov, en donde la hipótesis nula no se puede rechazar en todos los casos, por lo tanto, todas las distribuciones fueron consideradas como normales. Sugieren que el estadístico del $K-S$ test (d) sea utilizado como una herramienta exploratoria y no afirmativa. Para este propósito se debe suponer que se tendrá mayor grado de normalidad cuando el valor estadístico d sea más bajo. En el presente estudio, se obtuvo el estadístico d con menor valor en la variable evaporación ($d= 0,03$) y el estadístico con mayor valor fue la variable precipitación ($d= 0,22$), demostrando así que la variable evaporación tiene el mayor grado de normalidad. Entre los diagramas de espacio de fases se observaron colecciones borrosas de trayectorias sin patrones discernibles (Figura 5). Espinosa (2004) clasifica a este tipo de trayectorias, mediante un análisis visual cualitativo, como diagramas de espacio de fases de datos aleatorios.

Varios autores sugieren que se ha podido diferenciar visualmente la dinámica de los diagramas de espacio de fases logrando hacer una clasificación (ej. periódicos, cuasiperiódicos, caóticos o aleatorios) (Carbajal, 2003; Echi et al., 2015; Espinosa, 2004; Özer y Erhan, 2005). Hay autores que utilizan otros métodos complementarios y derivados del espacio de fases para distinguir los distintos comportamientos. El Department of Control Systems and Mechatronics, Wroclaw University of Technology (2015) empleó el exponente de Lyapunov para diferenciar el comportamiento caótico del periódico, y el coeficiente de Hurst para diferenciar el comportamiento aleatorio del periódico. No obstante, concluyeron que no existió un método en común para diferenciar completamente los tres tipos de comportamientos: caótico, aleatorio y periódico. Suresh y Selvaraj (2017) aplicaron el mapa de Poincaré, proveniente de una sección del espacio de fases, para identificar la estructura fractal y así confirmar la dinámica caótica de las series de tiempo de temperatura y humedad en Chennai, India. Por otro lado, en un estudio desarrollado por Tsonis y Elsner (1989), se expuso que cuando se trabaja con variables climáticas, se tiene como limitación la disponibilidad de registros extensos, esto hace que se trabaje en una escala específica del tiempo, por lo cual existe la posibilidad de estar observando solamente una parte de un gran atractor.

Finalmente, al observar los mapas recurrentes de las cuatro variables, se pudo observar estructuras discernibles. Según la clasificación de Espinosa (2004), este tipo de mapas recurrentes corresponden a series caóticas. Al igual que los diagramas de espacio de fases, dicha clasificación es determinada mediante un análisis visual el cual ha sido utilizado por varios autores (Carrasco et al., 2015; Espinosa, 2004; García et al., 2013; Pecar, 2004). Según Marwan (2011), los mapas recurrentes pueden ser considerados como una herramienta no lineal para el análisis de datos. Sin embargo, es difícil o casi imposible identificar el tipo de dinámica que tienen los datos solamente viendo la apariencia de los mapas recurrentes. Sugiere que sólo es posible distinguir con cierta certeza a los procesos periódicos y al ruido blanco. Fabretti y Ausloos (2005) sugirieron que no se deben utilizar los mapas recurrentes y el análisis de recurrencia cuantitativa para probar la evidencia de caos, en lugar de eso, en su estudio utilizaron dichas técnicas para detectar cambios en el comportamiento de los datos, particularmente para detectar discontinuidades como transiciones de fases y para obtener información sobre otras propiedades dinámicas de las series de tiempo.

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de la dinámica de cuatro variables meteorológicas de la estación climatológica de Chone (M0162) desde el punto de vista de la teoría del caos mediante un análisis cualitativo que involucró la representación de las series a través de histogramas, diagramas de espacio de fases y mapas recurrentes. Dicho análisis fue complementado mediante el cálculo del determinismo de las series proveniente del análisis cuantitativo de recurrencia de las series. Estas herramientas ayudaron a tener una mejor interpretación de la dinámica de las variables, debido a que revelaron comportamientos que no se pueden observar en la manera común de representar a las series de tiempo mediante diagramas magnitud vs. tiempo.

Sobre la base de datos de la serie de tiempo precipitación, se determinó que su función de distribución acumulada no siguió la forma de la distribución normal y a pesar de que su espacio de fases haya dado una pista de aleatoriedad, su mapa recurrente reveló la existencia de un cierto nivel de determinismo correspondiente a 0,22 probando que la variable no es estocástica.

Se observó además la existencia de líneas diagonales que en ciertos casos correspondieron a eventos del fenómeno de El Niño. En el caso de la variable evaporación, su función de distribución acumulada siguió la forma de la distribución normal y su espacio de fases dio pistas de aleatoriedad, y a pesar de que su mapa recurrente mostró la existencia de determinismo correspondiente a 0,36 se probó que la variable no es estocástica. En la serie de tiempo de temperatura su función de distribución acumulada no siguió la forma de la distribución normal y a pesar de que su espacio de fases haya dado una pista de aleatoriedad, su mapa recurrente reveló la existencia de un cierto nivel de determinismo correspondiente a 0,22, probando que la variable no es estocástica.

Finalmente, la variable velocidad del viento presentó una distribución acumulada que no siguió la forma de la distribución normal y aunque su espacio de fases dio pistas de aleatoriedad, su mapa recurrente mostró la existencia de determinismo correspondiente a 0,39, lo cual probó que la variable no es estocástica.

A pesar de que se obtuvo una primera pista de determinismo en las variables meteorológicas de la estación M0162 de Chone, no es acertado afirmar la existencia de caos en las series, debido a que las técnicas empleadas sirvieron para tener una idea más clara de las propiedades dinámicas de las series más no para probar su carácter caótico. Para realizar una afirmación sobre la presencia de

caos en las series, será necesario complementar al estudio con más herramientas de análisis (ej. exponente de Lyapunov). La recurrencia en las variables estudiadas sirvió para observar como ciertas condiciones y eventos en el clima de Chone, se repitieron a lo largo de la línea del tiempo. Esta propiedad podría ser utilizada para crear un modelo de predicción a corto plazo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al INAMHI por proveer los datos meteorológicos necesarios para la realización de este estudio. Partes de esta investigación fueron escritas durante una visita en Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Los autores agradecen al Dr. Norbert Marwan y a M.Sc. Dadiyorto Wendi por las valiosas discusiones y las sugerencias realizadas durante la estancia de investigación. Finalmente, al Grupo Geoespacial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por el apoyo recibido en el desarrollo del proyecto de titulación el cuál aportó para la redacción de este artículo.

REFERENCIAS

- Asesores y Consultores del Litoral Cia. Ltda. (ACOLIT), (2008). Actualización de los estudios definitivos del proyecto de propósito múltiple Chone. Estudio Hidrológico. Documento técnico de apoyo N° 9: Anexo 2.
- Aștefănoaei, C., Pretegianni, E., Optican, L. M., Creangă, D., y Rufa, A. (2013). Eye movement recording and nonlinear dynamics analysis-the case of saccades. *Romanian Journal of Biophysics*, 23(1-2), 81.
- Carbajal, F. P. (2003). Búsqueda de atractores extraños en dinámica cardiaca durante el ciclo onírico. *Pro Mathematica*, 17(34), 129-141.
- Carrasco, R., Vargas, M., Soto, I., Fuertes, G., y Alfaro, M. (2015). Copper Metal Price Using Chaotic Time Series Forecasting. *IEEE Latin America Transactions*, 13(6), 1961-1965. doi: 10.1109/TLA.2015.7164223
- Carrera-Villacrés, D., Guevara-García, P., Maya-Carrillo, M., y Crisanto-Perrazo, T. (2015). Variations of Species Concentration in Inorganic Water Dam "Purpose Multiple Chone", Ecuador Based on Precipitation, Evaporation and Evapotranspiration. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 641-646. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.122
- Carrera, D., Guevara, P., Tamayo, L., Balarezo, A., Narváez, C., y Morocho, D. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. *Idesia (Arica)*, 34(3), 81-90
- Carrión, A., Miralles, R., y Lara, G. (2014). Measuring predictability in ultrasonic signals: An application to scattering material characterization. *Ultrasonics*, 54(7), 1904-1911. doi: 10.1016/j.ultras.2014.05.008
- Coelho, M. C. S., Mendes, E. M. A. M., y Aguirre, L. A. (2008). Testing for intracycle determinism in pseudoperiodic time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 18(2), 023125. doi: 10.1063/1.2927388
- Coppo, J., (2010). Teoría del caos y método científico. *Revista Veterinaria*, 21(2).
- Department of Control Systems and Mechatronics, Wroclaw University of Technology, Korus, Ł., Piórek, M., y Department of Computer Engineering, Wroclaw University of Technology. (2015). Compound method of time series classification. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 20(4), 545-560. doi: 10.15388/NA.2015.4.6
- Dolan, K. T., y Spano, M. L. (2001). Surrogate for nonlinear time series analysis. *Physical Review E*, 64(4), 046128. doi: 10.1103/PhysRevE.64.046128
- Echi, I., Tikyaa, E. V., y Isikwue, B. C. (2015). Dynamics of daily rainfall and temperature in makurdi. *International Journal of Science and Research*, 4(7), 493-499.
- Espinosa, A. (2004). *El Caos y la Caracterización de Series de tiempo a través de técnicas de la dinámica no lineal* (Tesis que para obtener el título de Ingeniero en Computación). Universidad Autónoma de México, México D.F.
- Fabretti, A., y Ausloos, M. (2005). Recurrence plot and recurrence quantification analysis for detecting a critical regime: examples from financial market indices. *International Journal of Modern Physics C*, 16(05), 671-706. doi: 10.1142/S0129183105007492
- García, S., Romo, M., y Figueroa, J. (2013). Characterization of ground motions using recurrence plots. *Geofísica internacional*, 52(3), 209-227.
- Gutiérrez, L. y J. Mejía, (2012). Detección de la dinámica y la no linealidad en las señales de tiempo financieras a través del método de los datos sustitutos.

- Huth, R., y Pokorná, L. (2004). Parametric versus non-parametric estimates of climatic trends. *Theoretical and Applied Climatology*, 77(1-2), 107-112. doi: 10.1007/s00704-003-0026-3
- Inzunza, J., (2000). Meteorología descriptiva y aplicaciones en Chile. Universidad de Concepción, Chile.
- Ivancevic, V. y T. Ivancevic. (2007). *High-dimensional chaotic and attractor systems: a comprehensive introduction*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Kliková, B. y A. Raidl. (2011). *Reconstruction of phase space of dynamical systems using method of time delay*. En Proceedings of the 20th Annual Conference of Doctoral Students-WDS 2011 (pp. 83-87). Prague, Czech Republic.
- Lan, L. W., Lin, F.-Y., y Kuo, A. Y. (2005). Identification for chaotic phenomena in short-term traffic flows: a parsimony procedure with surrogate data. *Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 1518- 1533. doi: 10.11175/easts.6.1518
- Marwan, N., y Kurths, J. (2004). Cross Recurrence Plots and Their Applications. En *Mathematical Physics Research at the Cutting Edge* (pp. 101-139) Hauppauge, USA: Nova Science Publishers.
- Marwan, N., Carmenromano, M., Thiel, M., y Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329. doi: 10.1016/j.physrep.2006.11.001
- Marwan, N. (2011). How to avoid potential pitfalls in recurrence plot based data analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21(04), 1003-1017. doi: 10.1142/S0218127411029008
- Mesin, L., Cattaneo, R., Monaco, A., y Pasero, E. (2014). Pupillometric Study of the Dysregulation of the Autonomous Nervous System by SVM Networks. En S. Bassis, A. Esposito, y F. C. Morabito (Eds.), *Recent Advances of Neural Network Models and Applications* (Vol. 26, pp. 107-115). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-04129-2_11
- Millán, H., Kalauzi, A., Cukic, M., y Biondi, R. (2010). Nonlinear dynamics of meteorological variables: Multifractality and chaotic invariants in daily records from Pastaza, Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 102(1-2), 75-85. doi: 10.1007/s00704-009-0242-6
- Mokhov, I. I., Smirnov, D. A., Nakonechny, P. I., Kozlenko, S. S., Seleznev, E. P., y Kurths, J. (2011). Alternating mutual influence of El-Niño/Southern Oscillation and Indian monsoon: Indian Monsoon-ENSO mutual influence. *Geophysical Research Letters*, 38(L00F04). doi: 10.1029/2010GL045932
- Moore, B. J. (2006). Chaos Theory: Unpredictable Order in Chaos. En B. J. Moore, *Shaking the Invisible Hand* (pp. 43-74). Palgrave Macmillan UK. doi: 10.1057/9780230512139_3
- Mouronte López, M. L. (2004). *Caracterización y análisis de sistemas dinámicos no lineales mediante el estudio del mapa de frecuencias y espacio de fases*. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- OMM. (2011). Guía de Prácticas Climatológicas. OMM- No. 100. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Özer, A. B. y, A. Erhan, (2005). Tools for detecting chaos. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 60-66.
- Palomares Calderón de la Barca, M. (2015). Breve historia de la Agencia Estatal de Meteorología AEMET: el servicio meteorológico español.
- Pecar, B. (2004). Visual recurrence analysis as an alternative framework for time series characterization (pp. 241-251). En M. Costantino, y C. A. Brebbia (Eds.), *Computational Finance and its Applications*. Southhampton, UK: WIT Press.
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D., Sangüesa, C., León, L., y F. Balocchi. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Aqua-LAC: revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*, 1(2), 172-184.
- Rickles, D., Hawe, P., y Shiell, A. (2007). A simple guide to chaos and complexity. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 61(11), 933-937. doi: 10.1136/jech.2006.054254
- Rivera, E. T. (2004). Group Chaos Theory (GCT) A research model and analysis of group process. *Journal of Social Complexity*, 2(1), 33-49.
- Rong Yi, Y. y H. Xiao-Jing, (2011). Phase space reconstruction of chaotic dynamical system based on wavelet decomposition. *Chinese Physics B*, 20(2), 020505.
- Secretaría nacional del agua (SENAGUA), (2015). Gobierno Nacional inaugura Proyecto Multipropósito Chone (PPMCH), cuyo objetivo es mitigar los efectos de las inundaciones. Recuperado de <http://www.agua.gob.ec/>
- Steinhaeuser, K., Chawla, N. V., y Ganguly, A. R. (2011). Complex networks as a unified framework for descriptive analysis and predictive modeling in climate science. *Statistical Analysis and Data Mining*, 4(5), 497-511. doi: 10.1002/sam.10100

- Suresh, A. y Selvaraj, R. (2017). A complete chaotic analysis on daily mean surface air temperature and humidity data of Chennai. *Journal of Indian Geophysical Union*, 21(4), 277-284.
- Tsonis, A. y J. Elsner, (1989). Chaos, strange attractors, and weather. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70(1), 14-23.
- Webber, C. L., y Zbilut, J. P. (2005). *Recurrence Quantification Analysis of Nonlinear Dynamical Systems*. En M. Riley, y G. Van Orden. (Eds.), *Tutorials in Contemporary Nonlinear Methods for the Behavioral Sciences* (pp. 26-94). USA: National Science Foundation.
- Wendi, D., Marwan, N., y Merz, B. (2018). In Search of Determinism-Sensitive Region to Avoid Artefacts in Recurrence Plots. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 28(01), 1850007. doi: 10.1142/S0218127418500074
- Williams, G. (1997). *Chaos theory tamed*. Washington D.C., USA: Joseph Henry Press.
- Zou, Y., Donner, R. V., Donges, J. F., Marwan, N., y Kurths, J. (2010). Identifying complex periodic windows in continuous-time dynamical systems using recurrence-based methods. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 20(4), 043130. doi: 10.1063/1.3523304

Recibido: Noviembre, 2017

Aceptado: Junio, 2018

NUEVOS HORIZONTES PARA EL ABORDAJE DE LA GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES A PARTIR DE LA EVALUACIÓN MULTIAMENAZAS

William Edison Valenzuela Valenzuela¹

¹ Escuela de Ingenieros Militares ESING, Universidad Nacional de Colombia. Ing. Catastral y Geodesta. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Email: william.valenzuela@esing.edu.co

RESUMEN

El presente artículo expone la revisión temática sobre el enfoque de multiamenaza enmarcado en la Gestión del Riesgo de Desastres, este enfoque realiza un análisis correlacional entre los eventos peligrosos de carácter natural y antrópico que convergen en un mismo espacio geográfico, facilitando la toma de decisiones integrales en los procesos de planificación socioambiental. Teniendo en cuenta la revisión documental, con base cualitativa, se señalará los antecedentes de estudio sobre las principales metodologías propuestas para la articulación de fenómenos amenazantes, posteriormente, es presentada la aplicación de estas en distintas áreas de estudio y con variadas herramientas de análisis en las que sobresalen las de tipo espacial, y finalmente se especifican los adelantos del enfoque multiamenaza para cuencas hidrográficas de la región andina. En los resultados de la revisión de antecedentes se evidencia que los métodos del enfoque multiamenaza son: Modelos heurísticos con alta modelación técnica y diversidad de factores, y al mismo tiempo aproximaciones aún incipientes en la búsqueda de la interacción espacio-temporal de los fenómenos amenazantes que pueden afectar a la organización social. Una de las principales conclusiones a las que se llegó fue reconocer la criticidad del conocimiento sistémico basado en la comprensión integral de las amenazas socioculturales, lo cual viene siendo soslayado por la herencia fiscalista en el análisis y comprensión de las amenazas. Domina aún el enfoque tradicional de la revisión individual e inconexa de eventos y fenómenos peligrosos, en contraste a las actuales dinámicas locales en la construcción del territorio. Sin embargo, sobresalen los esfuerzos instituciones por superar este sesgo, y con el apoyo de la tecnología han logrado generar valiosos aportes en la toma de decisiones en la gestión del riesgo de desastres aplicando métodos multiamenaza.

Palabras clave: Desastres, enfoque multiamenaza, planificación ambiental

ABSTRACT

This article presents a thematic review on the multi-hazard approach framed in Disaster Risk Management, this approach makes a correlation analysis between the dangerous natural and anthropic events that converge in the same geographic space, facilitating the making of integral decisions in the socio-environmental planning processes. Considering the documentary review, with a qualitative basis, it will be indicated the antecedents of study on the main methodologies proposed for the articulation of hazard phenomena, later, it is presented the application of these in different areas of study and with varied analysis tools in the which outline the spatial type, and finally specify the advances of the multi-hazard approach for watersheds in the Andean region. The

results of the background check show that the methods of the multi-threat approach are: Heuristic models with high technical modeling and diversity of factors, and at the same time still incipient approaches in the search for the spatiotemporal interaction of the hazard phenomena that can affect social organization. One of the main conclusions reached was to recognize the criticality of systemic knowledge based on the comprehensive compression of sociocultural hazard, which is being ignored by the physicalistic inheritance in the analysis and understanding of the risk. It still dominates the traditional approach of individual and disjointed review of dangerous events and phenomena, in contrast to the current local dynamics in the construction of the territory. However, the efforts of institutions to overcome this bias stand out, and with the support of the technology they have been able to generate valuable contributions in the decision making in the risk management of disasters applying multi-hazard methods.

Keywords: Disasters, multi-hazard approach, environmental planning

INTRODUCCIÓN

Dentro de los principales propósitos de la planificación territorial para desarrollo sostenible se encuentran el determinar la probabilidad de ocurrencia de amenazas naturales y antrópicas, y el grado de vulnerabilidad a los que se encuentran expuestas las dimensiones ambiental, económica, física y poblacional con el fin de obtener un conocimiento integral de los riesgos a los que se encuentra expuesto el espacio geográfico en tanto se constituye como espacio vivo donde cohabitan múltiples ecosistemas, y cuya manifestación en desastres genera “situaciones de freno y retraso al desarrollo municipal, ya que incorporan daños y pérdidas sociales, económicas y ambientales más la necesidad de ayuda inmediata a la población y el gasto de la recuperación” (Banco Mundial - UNGRD, 2010).

Dentro de los procesos de gestión y planificación del riesgo la multiamenaza representa un aporte en la toma de decisiones porque ofrece un panorama integral de la dinámica propia de la naturaleza y la intervención de los seres humanos sobre ésta. Constituyéndose de esta manera, en medida no estructural enfocada desde el proceso de conocimiento en la búsqueda de prevenir o, por lo menos, reducir los impactos de los desastres sobre el ambiente, la economía y la sociedad. Como podremos comprobar uno de los aspectos más sobresalientes en la prevención y la reducción de desastres se da desde la búsqueda del conocimiento y la comprensión del riesgo, considerados como ejes esenciales dentro de las estrategias y marcos internacionales. Para ilustrar, los marcos de Hyogo y Sendai en las conferencias mundiales de las Naciones Unidas de 2005 y 2015, respectivamente, así lo han determinado dentro de sus prioridades (UNISDR, 2015).

Ahora bien, el estudio de las amenazas socionaturales también constituye uno de los ejes centrales de la Gestión del Riesgo. Durante varios años e incluso décadas se han desarrollado numerosos estudios e investigaciones, pero no han logrado el impacto pretendido debido a la interpretación de los fenómenos y eventos de forma aislada e individual, es decir, no se tenían en cuenta la totalidad de agentes, espacialidades y temporalidades que hacen parte de las amenazas socioculturales, si no, por el contrario, solo se tenía en cuenta a cada una de ellas de forma aislada y no como elementos que coexisten en un sentido correlativo. Sumando a esto, en los instrumentos de planificación territorial es notorio el reduccionismo con que se analiza dichas condiciones de amenazas, por cuanto en el mejor de los casos, se identifican e intervienen amenazas de forma individual y específica.

A continuación, desde la revisión bibliográfica se buscará analizar los estudios que han incursionado en las relaciones de causalidad y simultaneidad entre las amenazas más sobresalientes de la región andina, caracterizada por corresponder a un paisaje de relieve montañoso con significativa gradiente altitudinal que parte desde geformas relacionadas con los volcanes nevados y finaliza en los valles aluviales estructurados por la dinámica de los ríos Magdalena y Cauca, en Colombia.

Al respecto, el Departamento Nacional de Planeación (del gobierno de Colombia) señala que los departamentos con mayor número de víctimas (3181 muertes), afectación a infraestructura (66% en las vías) y medios de vida por desastres se ubican en la región andina, específicamente en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Nariño, Santander y Tolima. Durante

el periodo del 2006 a 2014 se registró que 1 de cada 4 colombianos ha sido damnificado por la materialización de eventos peligrosos, resaltando los fenómenos asociados con inundaciones y deslizamientos como los de mayor ocurrencia agrupando cerca del 68% de las situaciones reportadas (DNP, 2015).

De esta manera, es evidente que los municipios de los andes colombianos se caracterizan por presentar una multiplicidad de factores y fenómenos generadores de amenazas siconaturales entre los que sobresalen movimientos en masa, sísmica, actividad volcánica y avenidas torrenciales, entre otras. Entre ellos coexisten grados de correlación, así como también la aparición de un tipo de evento que puede desencadenar el surgimiento de otro asociado, por ejemplo, la ocurrencia de un sismo puede originar movimientos en masa el cual puede desencadenar avenidas torrenciales.

El objetivo de escribir este artículo es poder presentar al lector los antecedentes de estudio sobre las metodologías que incorporan la multiamenaza de un modo parcial o total en el área andina. Para dicho propósito se examinarán las principales metodologías y procedimientos generados a nivel nacional e internacional para el modelamiento, articulación e integración de amenazas coexistentes, teniendo esta información, plantearemos el análisis geográfico en el área andina en sus principales eventos y procesos amenazantes. Esto nos llevara finalmente a comparar las condiciones de simultaneidad y causalidad territorial entre dichos fenómenos siconaturales que podrían causar daños, perjuicios y vulneraciones ecosistémicas, es decir, perjudican la vida del medio ambiente, animales y seres humanos.

Este análisis que está enmarcado en la Gestión del Riesgo de Desastres desea ser un aporte en los procesos de planificación del desarrollo con enfoque sostenible, el cual para los interesados en el tema, los dotará de una perspectiva geográfica que evalúa objetivamente la configuración de escenarios de multiamenaza sociales y naturales, siendo una investigación situada, la región Andina es la adecuada especialidad ya que convergen variedad de eventos y procesos que son propensos a ser considerados como muy peligrosos debido a las complejas y divergentes expresiones de vulnerabilidad presentes en la región más poblada del país.

Por último, es preciso señalar que la revisión de antecedentes es parte de una investigación cuyo objetivo se centra en la identificación de las relaciones espaciales entre las amenazas naturales y siconaturales para definir las características deseables en una metodología con enfoque de multiamenaza para la región andina colombiana, con el fin de enriquecer los análisis y decisiones prospectivas dentro del ordenamiento territorial en el contexto de las cuencas hidrográficas.

MÉTODOLÓGIA

El presente artículo se enmarca en los métodos cualitativos con los cuales se busca comprender, dentro del proceso del conocimiento del riesgo de desastres, “la naturaleza profunda de las realidades, su estructura dinámica, complejidad y totalidad” (Ugarte Caviedes, 2014) con énfasis en el comportamiento de las amenazas socio naturales. La metodología cualitativa se caracteriza por ser inductiva, en donde se desarrollan “conceptos y comprensiones de las pautas de los datos (...)”, se sigue una perspectiva holística, y las personas, los escenarios o los grupos no son reducidos a variables sino considerados como un todo” (Taylor y Bogdan, 1994).

De lo anterior se deriva, que en lo cualitativo sobresale el interés por conocimientos generales, pero no leyes o determinismos (Ramirez y Zwerg, 2012), puesto que no se busca una “verdad” sino una comprensión detallada de las perspectivas (Taylor y Bogdan, 1994); lineamientos que son orientadores del presente artículo, donde se plantean interrelaciones entre variables de las ciencias de la tierra y factores derivados de disciplinas socioeconómicas, a través de un análisis documental que expone una síntesis de un reciente enfoque que integra elementos geográficos desencadenantes de amenazas naturales y socioambientales.

Como se ha venido señalando, la técnica de investigación cualitativa empleada, corresponde a la revisión documental, que de acuerdo con Alfonso (1999) citado por Morales (2003, pág. 2) consiste en “un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de datos entorno a un determinado tema”. En su aplicación, se distinguen dos fuentes de información: primarias que se refieren a textos originales y completos; y de otro lado fuentes secundarias que tratan sobre compilaciones, resúmenes, selecciones y referencias, material didáctico, mapas, etc

(Rodríguez y Valldeoriola, 2009). Así mismo, se hace énfasis en el enfoque hermenéutico, en tanto que realiza la comprensión temática y teórica mediante la descripción, explicación, articulación y sistematización con el fin de posibilitar nuevos conocimientos (Gómez et al., 2015).

UNA MIRADA AL CONCEPTO DE AMENAZA

El conocimiento de las amenazas ha estado ligado desde los inicios a los estudios sobre riesgos y desastres, especialmente aquellos vinculados con causas naturales. De esta manera, en cuanto al concepto se debe señalar en primer lugar que, por muchos años se relacionó la amenaza como un sinónimo de riesgo. Ambos términos se utilizaron hasta hace poco de forma indistinta. Parte de la confusión radica en la concepción del *riesgo* como referencia a un peligro, mientras la amenaza en sí misma es un peligro ante un evento de distinto origen. El significado etimológico del término *amenaza* por parte de la Real Academia Española muestra un origen hacia el latín *mina* (RAE, 2017) que posiblemente hace referencia a la acción y efecto de hacer daño a alguien a través de trampas o artefactos (Definiciona, 2014). Más, de acuerdo con el diccionario etimológico del inglés moderno (2001), al parecer el término *amenaza* tiene otro origen, y es del árabe *az-zahr* (por *al-zahr*) referente a la expresión “tirar de los dados”, que fue utilizado posteriormente en el español como “juego de azar” y adaptado en el francés como *hasart* que expresa “posibilidades en el juego” luego asumido en un posición más amplia como “posibilidades en la vida”, que para 1540 fue registrado en el inglés como *hazard* con el significado de “oportunidad de pérdida o daño” (Diccionario etimológico en línea, 2001).

Al comparar los significados anteriores con el término *riesgo* se encuentra por ejemplo que la Real Academia Española lo define como contingencia o proximidad de un daño, que proviene de latín *risco* (peñasco) que expresa: por el peligro que suponen (posiblemente barcos al transitar por estos lugares) (RAE, 2017). Ambos términos suponen consideraciones similares en su origen, y están estrechamente relacionadas con el daño. En la revisión de textos, artículos, libros, revistas en la lengua inglesa se evidencia que los términos *hazard* y *risk*, se asumen y comprenden de forma equivalente.

Más allá de las analogías entre los términos, es claro que, desde los conceptos originarios, al hablar de Amenazas se involucra directamente el ser humano y la sociedad, puesto que los daños, infortunios o el azar suceden sobre alguien en un momento dado. La amenaza de esta manera atañe a la relación biunívoca entre sociedad - naturaleza. De acuerdo con Lavell (2005), la amenaza existe como tal, “si en algún momento adquiere esa relación de daño potencial sobre un segmento de la sociedad”. De esta manera, la participación del ser humano en este aspecto es central, puesto que es “a través de su localización, sus acciones y sus percepciones como un fenómeno natural se vuelve peligroso o no” (Castro, 2000).

La ecología humana desarrollada por la escuela de Chicago fue quien introdujo la idea de los eventos atípicos o extremos de la naturaleza como formas de amenaza. En particular los geógrafos White, Burton y Kates determinaron que las amenazas son expresiones extremas de la dinámica natural planetaria, que en momentos de normalidad (los más frecuentes) aporta importantes recursos para la vida de las poblaciones, pero que en otros momentos (atípicos o inusitados) presentan variaciones fuertes que afectan las poblaciones y en especial sus condiciones de adaptabilidad a los procesos naturales (Lavell, 2005).

Dado que las Amenazas representan la interacción entre la dinámica de naturaleza y las prácticas de la sociedad para adaptarse a ella, muchos estudios se enfocaron en investigar los procesos y eventos naturales a profundidad. De allí que, durante el siglo XX, disciplinas como la geología, geomorfología, hidrología, climatología, química, entre otras, fueron el lenguaje dominante para hablar de amenazas. Este imperio de las ciencias duras en el estudio de las amenazas llevó así mismo, al surgimiento y aplicación de un tecnicismo avanzado que sin duda clarificó muy bien el objeto de estudio (la naturaleza) pero alejó de la discusión al sujeto involucrado (ser humano y sociedad). Fue así como, durante décadas se habló de amenazas naturales. Hoy en día, tras las múltiples reflexiones, investigaciones, estudios locales, reuniones regionales y marcos internacionales se ha llegado al consenso en torno a la diversidad en el perfil de amenazas.

Se reconocen así, las amenazas “del mundo natural, como son las asociadas con la dinámica geológica, geomorfológica, atmosférica y oceanográfica (por ejemplo, sismos, deslizamientos de tierra, huracanes y tsunamis); las que son de naturaleza seudo o socio natural, producidas como resultado de la intersección o relación del mundo natural con las prácticas sociales, como son muchos casos de inundación, deslizamiento y sequía. En estas, la deforestación, cambios en los patrones de uso del suelo u otros procesos sociales, crean o amplían las condiciones de amenaza; y las antropogénicas, producto de la actividad humana, como son los casos de explosiones, conflagraciones, derrames de materiales tóxicos, contaminación de aire, tierra y agua por productos industriales, etc.” (Lavell, 2008).

Además del perfil y tipos de amenazas, el análisis de éstas debe considerar aspectos exógenos y endógenos en su generación. El funcionalismo de la escuela de Chicago aportó con sus investigaciones sobre riesgos y desastres, siete elementos básicos a considerar dentro de la evaluación de las amenazas, los cuales se mantienen en la actualidad como aspectos claves de medición, estos son: la magnitud del evento, la frecuencia con que repiten (medida de probabilidad), la duración del fenómeno, la velocidad del impacto que se relaciona con el tiempo de alerta, la estacionalidad expresada en regularidad o aleatoriedad, la extensión superficial y la localización o concentración espacial donde se hace manifiesta la amenaza (Martinez Rubiano, 2009).

Dentro de las definiciones más recientes, aceptadas como conceptos de referencia en la comunidad académica, se tiene la propuesta por la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, que señala a la Amenaza como “un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales” (UNISDR, 2009).

En el contexto nacional, el Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo que hace parte del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, ha definido la Amenaza como el “Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales” (SNGRD, 2017). Cabe resaltar que esta definición hace parte también de la Ley 1523 de 2012 sobre Gestión del Riesgo de Desastre en Colombia.

Durante la última década, y específicamente desde el Marco de Sendai 2015 - 2030, se ha venido incorporando una nueva visión para el análisis integral y sistémico de las amenazas, denominado enfoque de amenazas múltiples (multi-amenaza) o complejas, que ha sido considerado como parte de las siete metas mundiales en relación con el conocimiento del riesgo y alertas tempranas (UNISDR, 2015). Al respecto, Societá Cooperativa (2006) define el análisis de multi amenaza como “la implementación de metodologías y enfoques orientados a evaluar y mapear la posible ocurrencia de diferentes tipos de peligros naturales en un área determinada. En este sentido, una amenaza social o natural central y de alto impacto necesariamente estará correlacionado con otros eventos menores, generadores o desencadenados, los cuales deben analizarse y atenderse en conjunto, tal como se refleja en la

Figura 1.

Los métodos analíticos y la cartografía deben tener en cuenta las características de los sucesos peligrosos únicos (área afectada, intensidad/magnitud, frecuencia de ocurrencia), así como sus interacciones e interrelaciones mutuas (terremoto inducido por deslizamientos de tierra, precipitaciones)”. Se refiere, como se verá en los siguientes apartados, a los grados de interrelación que existe entre los diferentes tipos y subtipos de amenazas (Martinez Rubiano, 2009), así como los momentos de sinergia y efectos de concatenación (Lavell, 2008) que derivan en un espectro más amplio de afectación a la sociedad.

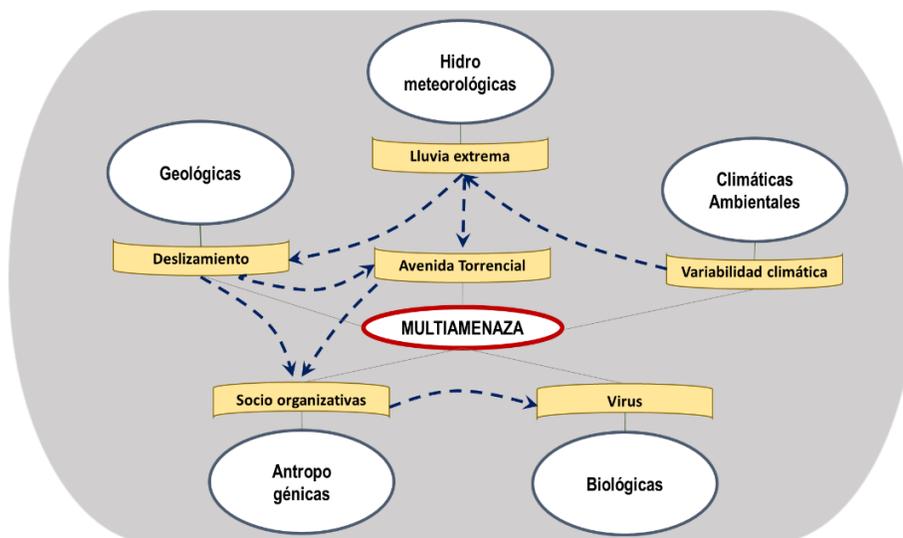


Figura 1 Esquema de tipos de amenazas múltiples. Fuente: Elaboración propia basado en Banco Mundial - Unión Europea. Natural Disaster Risk Reduction Program. Caribbean Handbook on Risk Information Management

RESULTADOS

La bibliográfica consultada de la multiamenaza nos sugiere su abordamiento desde cuatro líneas de estudio diferencial de acuerdo con los propósitos y escalas de aplicación. A saber: (i) Aportes académicos sobre metodologías para el análisis integrado de riesgo, aplicadas a nivel mundial, (ii) Propuestas institucionales a través de procesos y procedimientos para la evaluación de amenazas, (iii) Prácticas consuetudinarias que relacionan estudios de tipo puntual sobre amenazas naturales en la región andina y, por último, (iv) Trabajos realizados para las cuencas hidrográficas andinas sobre Gestión de Riesgo a temas concernientes al ordenamiento ambiental y territorial.

Estudios de propuestas metodológicas para abordar la multiamenaza

En la línea de estudios que tratan sobre las propuestas metodológicas para abordar sistemáticamente las características de la multiamenaza, se reconocen aportes desde dos caminos distintos; por un lado, los orientados a la espacialidad (mapeo) de los peligros más relevantes (ver Figura 2), mientras de otro lado se encuentran los orientados a la especialidad temática o disciplinar (ver

).

Recientes trabajos de investigación como los del ingeniero geólogo Joel Gill junto a sus colaboradores, resaltan la necesidad de determinar la interacción espacial y temporal entre los distintos tipos de amenazas en un lugar dado partiendo del supuesto que los procesos formadores de amenazas presentan dependencia y correlación entre sí, y al no ser analizados de forma holística se podrían subestimar los verdaderos riesgos potenciales, distorsionar las prioridades en la gestión y reducción de los riesgos e incrementar la vulnerabilidad de las comunidades en su espacio geográfico a otras amenazas relevantes Budimir, Duncan y Gill, (2016), (Gill y Malamud, 2016), (Gill y Malamud, 2014).

Otros importantes aportes en el concepto emergente de las amenazas múltiples son las investigaciones desarrolladas por los geógrafos Kappes, Keiler y Glade (2010) (2012) quienes recalcan en las interacciones, vínculos y conexiones entre sistemas naturales que inciden en la ocurrencia de amenazas simultáneas, concatenadas o acumuladas. Estos autores insisten en que

el enfoque de multiamenaza no es la simple suma o superposición de amenazas individuales, dado que los peligros naturales difieren en las características que los configuran, los impactos que ocasionan las amenazas a la sociedad y el ambiente son diversos y por tanto la vulnerabilidad no es la misma ante eventos naturales peligrosos. Las formas de medición y cuantificación de las amenazas no están estandarizadas, y cada peligro tiene sus propias magnitudes y tiempos de retorno, cuya confluencia y mutualidad genera un riesgo potencial que hasta el momento ha sido subestimado (Kappes *et al.*, 2012).

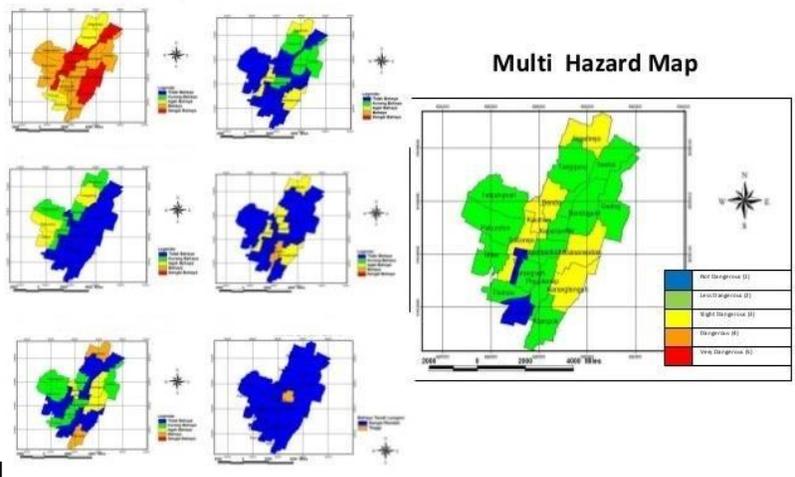


Figura 2 Análisis multiamenaza con orientación a la correlación espacial. Fuente: Tomado de Elly Tartati Ratni. Risk and vulnerability assessment of blitar city, Indonesia

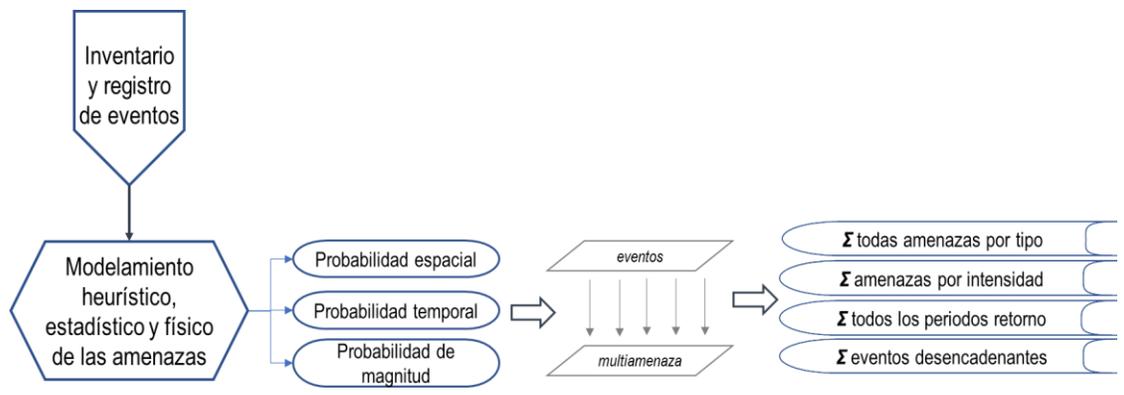


Figura 3 Análisis multiamenaza con orientación a la modelación temática. Fuente: Elaboración propia basado en Cees J van Westen. Remote sensing and GIS for natural Hazards assessment and disaster risk management.

Así mismo, autores como Liu, Ling Siu y Mitchell (2016) plantean que los avances metodológicos generados en los pocos estudios con enfoque de multiamenaza, otorgan preponderancia a los efectos cascada (dominó) o desencadenantes, como por ejemplo, un movimiento en masa originado a partir de un sismo, o inundaciones generadas a partir de tormentas o huracanes, cuyo análisis se ha desarrollado tradicionalmente mediante técnicas como la matriz de amenazas o el árbol de eventos. Para superar la visión lineal en la multiamenaza (efecto dominó o cascada) los autores proponen una clasificación sistemática de interacciones, a partir de cuatro posibles momentos que puede tomar las relaciones entre las amenazas especialmente de tipo natural: independiente, excluyentes, en paralelo y en serie. Señalan, que con la aplicación de esta

clasificación se facilita el cálculo de la probabilidad y la magnitud de múltiples amenazas que interactúan juntas (Liu *et al.*, 2016).

A través de casos de estudio se han desarrollado relevantes metodologías orientadas a la integración de las amenazas en un espacio geográfico dado, sobresalen en este sentido, los análisis de escala regional en la región de los Alpes europeos en donde se identificaron y se relacionaron amenazas por deslizamientos, caídas de rocas, avalanchas, lahares e inundaciones mediante la comparación cuantitativa de la magnitud, frecuencia y superposición espacial de los eventos (Kappes, y otros, 2012); para la misma región, esta vez con aplicación a Italia en el área de influencia del monte Vesubio se analizaron las interacciones mediante la cuantificación de la probabilidad de las amenazas volcánicas, sísmica, por movimientos en masa, por inundación, y amenazas de tipo antropogénico por actividad industrial (Marzochi *et al.*, 2012).

La introducción de variables antrópicas en la multiamenaza fue seguida por un estudio en Rusia en donde se construyó una correlación entre amenazas tecnológicas y sismos (Flalova *et al.*, 2012). En forma similar Gill y Malamud (2017) exponen las posibles influencias entre las amenazas de la actividad humana no intencional y las amenazas naturales, mediante la integración matricial de 18 procesos antropogénicos clasificados según el impacto de la actividad en: extracción subterránea, extracción superficial, adición en material superficial, cambio hidrológico, explosión y combustión, los cuales se correlacionaron con 21 tipos de eventos naturales, dando como resultado un total de 378 posibles interacciones de las cuales 57 tuvieron resultados significativos, evidenciando así la necesidad de integrar de forma equilibrada el componente humano en los análisis de multiamenaza y la comprensión del riesgo.

Estudios iniciales de Gill y Malamud (2014) recopilaron y analizaron casos de estudios ocurridos en décadas anteriores como movimientos en masa relacionados con tsunamis en Japón, erupciones volcánicas y sismos en Filipinas, también terremotos desencadenantes de deslizamientos e inundaciones en Alaska (Estados Unidos), y por último un evento más reciente en el año 2010 en Guatemala producto de una tormenta tropical que se relacionó con lluvias torrenciales, inundaciones y movimientos en masa.

De otro lado, desde una visión de la multiamenaza orientada hacia la simultaneidad espacial, se ubican experiencias con avances en la incorporación de los sistemas de información geográfica (SIG) en el análisis e integración de variables naturales y sociales susceptibles de generar peligros y riesgos. En este sentido, investigaciones como las de Thapa *et al.* (2014), tomando como caso de estudio una región del Himalaya en la República de Nepal, plantean la combinación de factores topográficos, tectónicos, sísmicos, climáticos y procesos industriales, para determinar el nivel de peligrosidad en una misma área o zona, a través de la superposición de mapas de amenazas simples, para finalmente obtener un mapa de peligros compuestos en tres niveles (alta, medio, bajo) que representa la multiamenaza de la región.

Bajo esta misma línea, los geógrafos españoles Perles y Cantero (2010) proponen, para un área en la periferia de la ciudad de Málaga, diferentes metodologías para la elaboración de cartografía multiamenaza, mediante técnicas que van desde la superposición vertical de mapas hasta el análisis de la evaluación en cadena o efecto dominó de las amenazas. Así, los autores desarrollan cuatro estrategias básicas para tener en cuenta en el proceso cartográfico de múltiples amenazas, estas son: homogeneidad (o estandarización), operatividad con la planificación (usabilidad), conexión con el lugar el riesgo, concatenación espacio – temporal de los procesos amenazantes. Como parte de las indicaciones metodológicas se supone la elaboración de mapas individuales de amenazas, agrupación de amenazas por superposición espacial, análisis de peligros agregados que considera intensidad y acumulación, evaluación de áreas causales y receptoras de amenazas, y finalmente el mapa de amenaza acumulada en cadena en el cual se consideran aspectos de sinergia, retroalimentación y transferencia espacial y temporal de vectores de energía (Perles Roselló y Cantarero Prados, 2010).

Otro estudio complementario en la aproximación espacial y cartográfica de la multiamenaza fue desarrollado por Hernández (2014) para un área en el sur del condado de Davis, Utah en Estados Unidos. La investigación está basada en el uso de sistemas de información geográfica con el propósito de analizar y unificar de forma espacial las amenazas de tipo natural existentes en la zona de estudio. La investigación propone como unidad de síntesis el paisaje o rasgos morfológicos del terreno, que son la expresión de los procesos y eventos naturales sobre la superficie terrestre. La metodología es desarrollada en cuatro fases que van desde la recolección

y depuración de datos, la evaluación de amenazas simples, la determinación de la unidad morfológica mediante la integralidad de eventos amenazantes a partir de su probabilidad, para finalmente obtener la clasificación compuesta de riesgos múltiples (Hernandez, 2014).

Ahora bien, en relación con los estudios de multiamenaza en Latinoamérica se encuentran importantes desarrollos y aportes principalmente en la región de Centro América y el Caribe. Se destacan así, los apoyos realizados por van Westen (2015) en la República Dominicana, San Vicente y las Granadinas, Santa Lucía y Belice para las investigaciones de las interacciones entre las amenazas de inundación y movimientos en masa. De otro lado, en el Salvador hacia la primera década de este siglo, con el apoyo del Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (*Cepredenac*) se avanzó en estudios de geozonificación de amenazas y mapeo de riesgo analizando los efectos de la multiamenaza en el volcán de San Salvador y la cuenca del Arenal Monserrat (IGN - SNET, 2003).

Otro de los países con mayor aporte de investigaciones en la temática es Costa Rica, se destacan allí los estudios de Evaluación del Riesgo por MultiAmenaza asociados al volcán Turrialba (Westen *et al.*, 2002) con aplicación de tecnologías SIG y con énfasis en áreas urbanas. También sobresale los aportes de Barrantes Castillo (2015) en su investigación sobre Modelos MultiAmenaza para países en desarrollo, donde propone una valoración de las interacciones espaciales de las amenazas naturales que convergen en un determinado espacio geográfico cuyo caso de aplicación fue la zona de influencia del volcán Poas y parte del cantón que lleva su mismo nombre, y con la integración de cinco tipos de amenazas.

En síntesis, de los trabajos e investigaciones desarrollados en metodologías que incorporen la multiamenaza es posible identificar un avance amplio en el tratamiento espacial por superposición o simultaneidad geográfica. Así mismo, se destacan los métodos propuestos entorno a las correlaciones matriciales, los cuales han mostrado resultados interesantes acerca de las posibles interacciones entre amenazas incluyendo las de tipo antropogénico que frecuentemente son olvidadas en el modelamiento. Finalmente, se evidencia un tercer camino metodológico, orientado hacia los efectos concatenantes o tipo dominó, en donde el avance hasta el momento ha sido mayoritariamente lineal, es decir en una relación biunívoca entre dos tipos de amenaza (e.j. sismo - deslizamiento).

Trabajos desde las instituciones y organismos gubernamentales

Por otro lado, la segunda línea u orientación con aproximación a la multiamenaza, corresponde a los trabajos desde las instituciones y organismos gubernamentales. En este ámbito, a nivel internacional se destaca el proyecto ARMONIA (Applied Multi Risk mapping of Natural Hazards for Impact Assessment) desarrollado por la Unión Europea con el objetivo de “proporcionar [...] un conjunto de metodologías armonizadas para producir mapas de riesgos integrados y así conseguir unos procedimientos de planificación territorial más efectivos en áreas de Europa propensas a desastres naturales” (Fleischhauer, Greiving, y Wanczu, 2007). Esta metodología fue adelantada a partir de una discusión continua entre expertos en amenazas naturales y planificadores de uso y manejo del suelo, con el fin de superar las brechas y los límites del enfoque teórico de multiamenaza y multiriesgo (Societá Cooperativa, 2007).

Desde la misma Comisión Europea se desarrolló otro proyecto de investigación institucional conocido como MEDIGRID (Mediterranean Grid of Multi-Risk Data and Models), el cual corresponde a una plataforma de información para la evaluación de múltiples amenazas naturales, a través de un marco modular de bases de datos de tecnología computacional distribuida geográficamente y conectada a la red permitiendo el intercambio, la selección y la agregación de datos y recursos. Los algoritmos de MEDIGRID integran diversos modelos de amenazas naturales simples tales como: deslizamientos, incendios forestales, de las avenidas torrenciales y erosión del suelo, compartidos en un único sistema accesible a los usuarios a través de Internet. Cuando se combinan, estos modelos forman un servicio más grande, permitiendo que cada amenaza sea configurada, encadenada y ejecutada como un proceso en conjunto y unificado (Bovolo, y otros, 2009).

Continuando con los aportes institucionales y gubernamentales, es preciso señalar los trabajos desarrollados en Estados Unidos por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) en particular con los avances de la Evaluación del Riesgo por

Multiamenaza a partir del sistema Hazus-MH, el cual corresponde a un análisis computarizado a través de un software de modelamiento y síntesis de amenazas de origen natural por tres tipos de eventos: terremotos o sismos, inundaciones fluviales y costeras, y vientos huracanados. Hazus-MH emplea tecnologías geospaciales (Geomática y SIG) para analizar la distribución espacial de las amenazas mencionadas y estimar a partir de su comportamiento conjunto las posibles pérdidas y daños económicos sobre edificaciones e infraestructuras así como los efectos potenciales sobre la población, de tal forma que es ante todo una herramienta para la toma de decisiones en los procesos de mitigación, preparación para la respuesta y la recuperación (Schneider, 2011).

Cabe mencionar en complemento con los aportes institucionales, a las guías internacionales sobre riesgos y amenazas que, constituyen un referente en el análisis e identificación de amenazas naturales y sociales. Entre estas, se destacan los informes y aplicaciones sobre gestión de riesgo de las Naciones Unidas a cargo de la secretaría interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD). Destaca igualmente la guía para la zonificación de amenaza y riesgo por susceptibilidad a deslizamientos de la Unión Europea (Fell, 2008).

Así mismo en el contexto latinoamericano, particularmente en Colombia existen avances en guías, estudios de caso y hasta elementos normativos vinculados con la evaluación de amenazas. En relación con los manuales sobre la temática se tiene como principal referente a la *Guía Metodológica para la Incorporación de la Prevención y la Reducción de Riesgos en los Procesos de Ordenamiento Territorial* a cargo del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT, 2005). A nivel intraregional se cuenta con una guía metodológica para realizar planes departamentales de gestión de riesgo, desarrollada por la Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (UNGRD, 2014).

Sobresale, ampliamente, los aportes ligados al modelamiento de la remoción o movimientos en masa, donde se destaca los aportes del Servicio Geológico Colombiano junto con la Universidad Nacional de Colombia en la formulación del Manual para la determinación, medición y prevención del riesgo por fenómenos de remoción en masa (SGC-UNAL, 2015), el cual corresponde a una propuesta para escalas de trabajo detalladas y con alta suficiencia en información geoespacial.

En resumen, las prácticas institucionales revelan importantes avances en el tratamiento integrado de amenazas, siendo las de tipo natural las de mayor priorización. Salvo la Unión Europea, en los demás países se identifican aplicaciones propias, lo que deja un balance cerrado y autárquico de la investigación y los esfuerzos por expandir el enfoque a nivel regional y continental. En los Estados Unidos, se destaca el liderazgo de la Agencia para el Manejo de Emergencias, la cual centraliza y unifica los métodos a aplicar a lo largo y ancho del país, y en ese sentido se habla en un lenguaje en común en relación con el enfoque multiamenaza y la gestión del riesgo en general.

Prácticas consuetudinarias en estudio de amenazas

En relación con la tercera línea de estudio, esto es las prácticas consuetudinarias, y de acuerdo con la CEPAL (2007, pág. 6) en la región y específicamente en Colombia “existen pocos estudios de riesgo y los que existen son muy recientes. En general existen estudios de amenaza, muchos de los cuales se les ha denominado estudios de riesgo en forma equivocada, pues sólo hacen referencia [a un] fenómeno”. Es así como, desde esta última década, la comunidad internacional relacionada con la reducción de riesgos (UNISDIR, DIPECHO, OFDA, UK Government, Comunidad Andina, universidades, otros), inicia procesos de análisis complejos que reconocen el funcionamiento integral de la geodinámica terrestre, a partir de los conocimientos adquiridos durante varios años en la identificación y evaluación de amenazas de tipo individual.

Para el territorio colombiano se han adelantado un sin número de estudios de caso, donde se evidencia la evaluación y caracterización de un fenómeno socio natural de amenaza determinado. En este sentido, importan los aportes sobre amenaza sísmica para Colombia y ciudades principales propuestos por autores como Salgado *et al.* (2014), Salgado *et al.* (2010), Chicangana *et al.* (2014), entre otros; también sobre las amenazas relacionadas con movimientos en masa y deslizamientos de los autores como Suarez (2009), Caballero (2011), Mergili *et al.* (2015) y sobre las amenazas de inundación evaluadas por los investigadores Robertson y Castiblanco (2011), Maturana (2007), Hortua (2004) y González (2014), además de muchos otros autores que han estudiado de forma académica otros tipos de amenazas especialmente de tipo natural.

Así mismo, desde el escenario normativo y de regulación sobre la gestión y reducción del riesgo de desastres en el país, se destaca específicamente en cuanto a la evaluación de la multiamenaza, la incorporación dentro del ordenamiento territorial de no solo los eventos de amenaza por separado sino su integración y síntesis en una zonificación espacial a través de mapas y cartografía donde se muestre la delimitación y nivel o grado de la amenaza, todo esto establecido en la ley 388 de 1997 y los decretos reglamentarios 019 de 2012, 1807 de 2014 y 1077 de 2015.

En general, se identifica como práctica dominante y recurrente, en cuanto a los estudios de amenaza en los países andinos, el análisis individual de eventos, mediante la exclusión de dinámicas interactivas. La separación y clasificación de amenazas es de hecho el principio de la desintegración y la individualización del comportamiento social y natural de los eventos en la superficie terrestre. De esta manera, cuando se habla del perfil de amenaza, como se hace en la mayoría de estudios y en la misma legislación, se está priorizando la evaluación aislada e independiente de los fenómenos.

Análisis multiamenaza en las cuencas hidrográficas

Finalmente, en la cuarta línea de estudios con abordaje de la multiamenaza, se ubican las experiencias de ordenación de territorios naturales determinados a partir de la red de drenajes y cuerpos de agua cuya unidad fundamental es representada a través de las cuencas hidrográficas. Esta unidad, es para muchos el espacio geográfico esencial de planificación territorial hacia objetivos de desarrollo sostenible. En conexión con el enfoque multiamenaza se evidencian en la región Andina Suramericana interesantes investigaciones con propósitos de integración de amenazas socionaturales. Destacan dos trabajos de los países vecinos de Venezuela y Ecuador. El primero de ellos, aplicado en el área hidrográfica de la cuenca media del río Chama en los Andes venezolanos, donde se analizó principalmente los eventos concatenados entre deslizamientos de tierra y avenidas torrenciales producto de la dinámica constante de las lluvias e hilvanado con las condiciones geodinámicas de la cuenca desencadenan una energía intensa en aguas, capaz de arrastrar materiales de gran tamaño, con posibilidad de causar daños al ambiente y la sociedad, bloquear el curso del río, y finalmente detonar amenazas hidrometeorológicas de mayor extensión y magnitud (Ferrer y Laffaille, 2005).

Por su parte, Salazar y Paleo (2014) establecieron aportes en el tema del ordenamiento territorial en cuencas hidrográficas relacionado con la inclusión del riesgo por multi-amenaza, mediante el análisis de cuatro principales peligros (volcánico, inundación, sísmico, movimientos en masa) para la cuenca del río Esmeraldas en Ecuador, utilizando para ello geoinformación recopilada en Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del Ecuador relacionado con temáticas del suelo, agua y elementos sobre y bajo la superficie terrestre. Al utilizar como límite la extensión de la cuenca del río Esmeraldas, plantea una metodología para la gestión integral del riesgo y el desarrollo, analizando la responsabilidad y restricción en el uso y tenencia de la tierra con propuestas en un nuevo modelo catastral aplicado a los municipios que quedan dentro de la dinámica de la cuenca, y examina a partir de la evaluación de la multiamenaza, la capacidad de los actores involucrados en la toma de decisiones homogéneas y oportunas (Salazar y Paleo, 2014).

En la misma dirección, pero para los Andes colombianos, Vera y Albarracín (2017) han desarrollado un sistema de indicadores para evaluar la vulnerabilidad en cuencas hidrográficas ante un escenario de multiamenaza considerando los tres peligros más relevantes y cotidianos que se manifiestan en la región de los Andes, estos son: inundación, remoción en masa y flujos torrenciales. La propuesta metodológica toma como caso de estudio una microcuenca asociada al río Combeima en el departamento del Tolima. El trabajo representa un avance en el conocimiento integral del riesgo de desastres por cuanto conecta directamente la dinámica y complejidad de múltiples amenazas con el estado o nivel de vulnerabilidad que se configura en el espacio de una unidad hidrográfica, enriqueciendo así los procesos de ordenación territorial de cuencas (Vera Rodríguez y Albarracín, 2017).

Otra propuesta interesante es la desarrollada entorno a la cuenca hidrográfica del río Aburrá – Medellín, con aplicación puntual en la jurisdicción de Medellín con ocasión del proceso de elaboración del Plan Municipal de Gestión del Riesgo (Alcaldía Medellín, 2014) con proyección 2015-2030, en el cual se plantea escenarios de riesgo sistémico asociados a la multiamenaza por

superposición e interrelación de seis fenómenos amenazantes seleccionados y priorizados por la comunidad de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia y los desastres del pasado, estos correspondieron con: movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, incendios forestales, riesgo tecnológico, sismos y aglomeración de personas por afluencia masiva. En la

Figura 4 se muestra el resultado del modelamiento e integración para la espacialización de la multiamenaza y amenazas simples en el área municipal de Medellín.

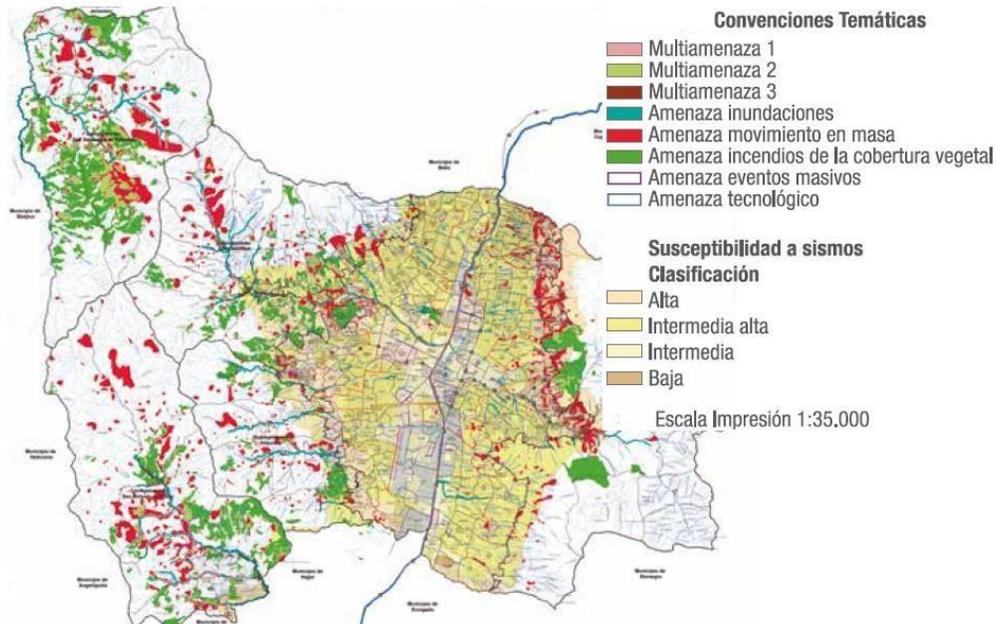


Figura 4 Mapa Multiamenaza PMGR 2015 - 2030 Medellín. Fuente: Alcaldía de Medellín. Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres 2015 - 2030. Cartilla Síntesis. Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo Desastres (DAGR). Año 2014.

Finalmente, y en consonancia con los propósitos de incorporar los estudios con enfoque de multiamenaza como parte de la gestión del riesgo dentro de la planificación territorial y ambiental en cuencas hidrográficas, vale la pena señalar en el caso colombiano, los lineamientos estatales en busca de dicha integración. En ese sentido, se destacan las guías técnico – científicas para la ordenación de cuencas, propuestas por el IDEAM (2004; 2008) donde se señala la necesidad y oportunidad de analizar las amenazas naturales de forma completa en este tipo de área geográfica y no fraccionada como es el caso de las jurisdicciones de los municipios. Posteriormente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014) recoge y amplía de forma significativa el análisis del riesgo de desastres en cuencas proponiendo una guía técnica de mayor rigurosidad en los aspectos del conocimiento de las amenazas y la vulnerabilidad, para así introducir de forma equilibrada la gestión del riesgo de desastres dentro la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en el país.

Lo anterior, refleja que el enfoque multiamenaza en relación con la planificación de espacios determinados por límites ambientales, esto es cuencas hidrográficas, avanza significativamente, y son precisamente las propias regiones y países andinos, quienes han reconocido la importancia de analizar de forma integral los eventos y acontecimientos vinculados con la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. De acuerdo con lo visto anteriormente, en Ecuador, Venezuela y Colombia, se viene adoptando el enfoque multiamenaza con una forma válida en los estudios de riesgo, quedando un camino amplio por recorrer en cuanto al encuentro de metodologías, la unificación de métodos y la homologación de resultados.

CONCLUSIONES

En general, es posible señalar que el tema de la multi-amenaza ha sido estudiado desde diferentes perspectivas, donde la mayor producción de investigaciones se ubica en los países anglosajones existiendo así registros de por lo menos un estudio por continente. En estos ejercicios, se evidencia variadas acepciones al concepto tales como eventos acoplados, eventos concatenados, fenómenos en cascadas, amenazas efecto dominó, y amenazas que cambian de forma dinámica los factores que predisponen a otras.

Sin embargo, la comunidad académica aun no contempla acuerdos de unificación de metodologías, en donde los métodos de interrelación vertical, es decir la superposición espacial de amenazas, son los más utilizados para el análisis y evaluación en conjunto de los eventos y factores. Así mismo, gran parte de los estudios de investigación mantienen la herencia fiscalista de preponderar la variable amenaza en la ecuación del riesgo, y a su vez, continúa dominando la caracterización de lo natural por encima de lo ambiental y social.

Es de resaltar los esfuerzos gubernamentales e institucionales, a través de las agencias con misión en la gestión del riesgo de los países desarrollados, que han reconocido la necesidad de la evaluación integral de las amenazas y presentan sobresalientes aportes de herramientas tecnológicas y de unificación de métodos, facilitando con ello la toma de decisiones tanto en el conocimiento y reducción del riesgo, como en los procesos de planificación territorial.

Para Colombia mientras tanto, son muchos los estudios que analizan y evalúan las amenazas, pero de manera individual o con independencia entre los fenómenos, en contraparte, son escasos los estudios, investigaciones y especialmente metodología que muestren resultados concretos de la integración de la susceptibilidad de un espacio geográfico a las amenazas sionaturales y consecuentes riesgos de desastres.

La tradición investigativa recomienda, al momento de iniciar con los estudios de riesgo, elaborar un perfil de amenazas, clasificación que sin duda es una forma de individualizar la dinámica social y natural en el contexto de un espacio geográfico. En contraposición, el enfoque multiamenaza, reclama por el análisis integral, el descubrimiento de vínculos, concatenaciones y dependencias entre uno y otro evento ya sea natural o antrópico.

Lo dicho hasta aquí supone que, en el contexto académico y científico, domina el quehacer en la identificación y evaluación sin conexión e interacción de las amenazas más relevantes en un territorio (sismos, erosión, inundación, torrencialidad, tsunamis, vulcanismo, etc). Las ilustraciones de los análisis tradicionales de riesgos y amenazas muestran mapas para cada evento y se soslayan las posibilidades enormes de determinar las correlaciones espaciales de multidimensionalidad y simultaneidad que ofrezcan una mirada del todo en relación con las amenazas naturales y sociales.

La oportunidad en el ámbito técnico científico se ubica en profundizar sobre los factores y causas que propician la liberación de la energía de una amenaza como consecuencia de otra, representadas con facilidad en el espacio y el tiempo. Los esfuerzos, en este sentido, deben centrarse en propuestas sobre estándares que permitan la comparación de resultados de multiamenaza en términos de magnitud, extensión, frecuencia o probabilidad, duración, localización e impacto. Esto dado que, cada evento o fenómeno puede expresarse en estas características, pero cuando se unifica o integra con otras, la medición de estas variables es aun incierta.

El recorrido por los anteriores estudios e investigaciones, permite encontrar sin duda que, los análisis y resultados construidos en cuanto al concepto y enfoque de multi-amenaza social y natural ante riesgo de desastres, son un punto de partida en la presente revisión, a fin que se pueda lograr un mayor grado de precisión e integralidad, partiendo del hecho que estos trabajos son casos de estudios para zonas con una complejidad muy distinta a los Andes colombianos donde convergen y coexisten amenazas de severidad significativa. En ese sentido, queda un camino amplio para enriquecer en metodologías y tipos de resultados que muestren una mayor integralidad y correlación de las dinámicas propias que se dan en espacios geográficos como las cuencas hidrográficas que constituyen las células socioambientales de los territorios del país.

REFERENCIAS

- Alcaldía Medellín. (2014). Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres 2015 - 2030. Medellín, Antioquia: Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD). Recuperado de <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/GestionRiesgo/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2017/sintesisPMGRD.pdf>
- Alfonzo, I. (1999). *Técnicas de Investigación Bibliográfica*. Caracas, Venezuela: Contexto Editores.
- Banco Mundial - UNGRD. (2010). Guía municipal para la gestión del riesgo. Bogotá: Miniterio del Interior y de Justicia. Grupo Emfor. Recuperado de <http://www.gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/archivos/GMGRColombia.pdf>
- Barrantes Castillo, G. (2015). *Modelo de multi-amenaza natural para países en vías de desarrollo: caso de aplicación cantón de Poas, Costa Rica*. Cartago, Costa Rica. (Tesis de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo). Instituto Tecnológico, Universidad Nacional y Universidad Estatal a Distancia, Cartago.
- Isabella Bovololo, C., Abele, S. J., Bathurst, J. C., Caballero, D., Ciglan, M., Eftichidis, G., y Simo, B. (2009). A distributed framework for multi-risk assessment of natural hazards used to model the effects of forest fire on hydrology and sediment yield. *Computers y Geosciences*, 35(5), 924-945. doi: 10.1016/j.cageo.2007.10.010
- Budimir, M., Duncan, M., y Gill, J. (2016). *The dynamics and impact of interacting natural hazards*. Recuperado de <http://www.interactinghazards.com/defining-multi-hazard>
- Caballero Acosta, J. H. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45-50.
- Castro, S. (2000). Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 60.
- CEPAL. (2007). Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: Colombia. Mexico: Naciones Unidas - Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25933>
- Chicangana Montón, G., Vargas Jiménez, C., Kammer, A., y otros. (2014). La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud $M > 7.0$, cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero. *Cuadernos de Geografía*, 24(2), 73-91.
- Definiciona. (2014). *Definición y Etimología de Amenaza*. B. E.-C. Group Editor, <https://definiciona.com/amenaza/>
- Diccionario etimológico en línea. (2001). *Compilación diccionarios etimológicos*. <http://www.etymonline.com/index.php>
- DNP (2015). *3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014*. Reporte de Emergencias municipales depurado por DNP: Recuperado de <https://www.dnp.gov.co/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>
- Ferrer, C., y Laffaille, J. (2005). Un estudio de amenazas múltiples en la cuenca media del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, Extra 1, 93-117.
- Fleischhauer, M., Greiving, S., y Wanczu, S. (2007). Planificación territorial para la gestión de riesgos en Europa. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 45, 49-78.
- Fralova, N., Larionov, V., Sushchev, S., y Bonnín, J. (2012). Seismic and integrated risk assessment and management with information technology application. *World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.
- Gill, J. C., y Malamud, B. D. (2014). Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards: Interactions of Natural Hazards. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 680-722. doi: 10.1002/2013RG000445
- Gill, J. C., y Malamud, B. D. (2016). Hazard interactions and interaction networks (cascades) within multi-hazard methodologies. *Earth System Dynamics*, 7(3), 659-679. doi: 10.5194/esd-7-659-2016
- Gill, J. C., y Malamud, B. D. (2017). Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. *Earth-Science Reviews*, 166, 246-269. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.01.002

- Gomez Vargas, M., Galeano, C., y Jaramillo, D. (2015). El estado del arte: una metodología de investigación. *Revista colombiana de Ciencias Sociales*, 2(6), 423-442.
- González Velandia, J. (2014). *La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica*. (Tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- Hernandez, M. W. (2014). A Multiple Natural Hazards Assessment Model Based on Geomorphic Terrain Units: *International Journal of Applied Geospatial Research*, 5(1), 16-37. doi: 10.4018/ijagr.2014010102
- Hortua, G. (2004). Geomorfología e hidrología, combinación estratégica para el estudio de las inundaciones en Florencia (Caquetá). *Cuadernos de Geografía*, 13, 81-101.
- IDEAM. (2004). Guía técnico científica para la ordenación de cuencas. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019239/guianueva.pdf>
- IDEAM. (2008). Guía técnico científica para la ordenación de las cuencas hidrográficas en Colombia. Segunda versión. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado de <http://corponarino.gov.co/expedientes/documentacion/ayudaa/guiadecuenca2008.pdf>
- IGN, SNET. (2003). Analisis del riesgo por inundaciones y deslizamientos de tierra en la cuenca del arenal de Monserrat. El Salvador: Instituto Geografico Nacional y Servicio Nacional de Estudios Territoriales. Unesco - ITC - Cepredenac. Recuperado de <https://www.itc.nl/external/unesco-rapca/en/contents-%20of-%20this-cd/2-analisis-de-riesgo-arenal-el-salvador.PDF>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., y Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.03.022
- Kappes, M. S., Gruber, K., Frigerio, S., Bell, R., Keiler, M., y Glade, T. (2012). The MultiRISK platform: The technical concept and application of a regional-scale multihazard exposure analysis tool. *Geomorphology*, 151-152, 139-155. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.01.024
- Kappes, M., Keiler, M., y Glade, T. (2010). From single to Multi Hazard Risk Analyses: a concept addressing emerging challenges. En J. P. Malet, T. Glade, N. Casagli (Eds.), *Proceedings of the Mountain Risks International Conference* (pp. 351-356). Florencia, Italia: CERG Editions.
- Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., y Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards*, 64(2), 1925-1958. doi: 10.1007/s11069-012-0294-2
- Lavell, A. (1993). Ciencias sociales y desastres naturales en América Latina: un encuentro inconcluso. En A. Maskrey (ed.), *Los desastres no son naturales* (pp. 111-125). Panamá: Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina.
- Lavell, A. (2005). Los conceptos, estudios y práctica en torno al tema de los riesgos y desastres en américa latina: evolución y cambio, 1980-2004: el rol de la red, sus miembros y sus instituciones de apoyo. En FLACSO (Ed.), *La gobernabilidad en américa latina: balance reciente y tendencias a futuro* (pp. 1-76). Quito, Ecuador: Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales - Secretaria General.
- Lavell, A. (2008). Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición. Panamá: Centro Regional de Información sobre Desastres - CRID. Recuperado de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Mayo2004/pdf/spa/doc15036/doc15036-contenido.pdf>
- Liu, B., Siu, Y. L., y Mitchell, G. (2016). Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: A systematic classification based on hazard-forming environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(2), 629-642. doi: 10.5194/nhess-16-629-2016
- Martinez Rubiano, M. (2009). Los geógrafos y la teoría de riesgos y desastres ambientales. *Perspectiva Geográfica*, 14, 241-263.
- Marzocchi, W., Garcia-Aristizabal, A., Gasparini, P., Mastellone, M. L., y Di Ruocco, A. (2012). Basic principles of multi-risk assessment: A case study in Italy. *Natural Hazards*, 62(2), 551-573. doi: 10.1007/s11069-012-0092-x

- Maturana, Z. (2007). Mapa de zonificación de amenazas por inundación del casco urbano del municipio de Quibdó (Chocó). Estudio basado en la interpretación de imágenes de radar, de satélite y fotografías aéreas. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 24-34.
- MAVDT, D. D. (2005). *Guía Metodológica para Incorporar la Prevención y la Reducción de Riesgos en los Procesos de Ordenamiento Territorial*. Bogotá D.C.: Panamericana Formas e Impresos S.A.
- Mergili, M., Marchant, C., y Moreiras, S. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía, Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS. Anexo B. Gestión del riesgo. Bogotá, Colombia: MinAmbiente. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/col130738anx.pdf>
- Morales, O. A. (2003). Fundamentos de la Investigación Documental y la Monografía. En N. Espinoza, A. Rincón (Ed.), *Manual para la elaboración y presentación de la monografía*. Tachira, Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Naciones Unidas. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. New York: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Recuperado de <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/43291>
- Perles Roselló, M., y Cantarero Prados, F. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio: propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-peligros. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52, 245-271.
- RAE. (28 de abril de 2017). Diccionario de la lengua española, (23.ª edición de 2014). Madrid, España.
- Ramirez, F., y Zwerg, A. (2012). Metodología de la investigación: más que una receta. *AD-minister. Universidad EAFIT*, 20, 91-111.
- Robertson, K., y Castiblanco, M. A. (2011). Amenazas fluviales en el piedemonte amazónico colombiano. *Cuadernos de Geografía. Revista Colombiana de Geografía*, 20, 125-137.
- Rodriguez G., D., y Valldeoriola R., J. (2009). *Metodología de la investigación*. Barcelona, España: Eureka Media.
- Salazar, R., y Paleo, U. (2014). Analisis del riesgo multi-amenaza en el ordenamiento territorial de una cuenca hidrográfica. *Revista Geoespacial*, 11, 30-46.
- Salgado, M., Bernal, G., Yamin, L., y Cardona, O. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica en Colombia: actualización y uso de las nuevas normas colombianas de diseño sísmico resistente. *Revista de Ingeniería*, 32, 28-38.
- Salgado, M., Zuloaga, D., Bernal, G., y Cardona, O. (2014). Comparación de los resultados de riesgo sísmico en dos ciudades con los mismos coeficientes de diseño sismo resistente. *Revista de Ingeniería*, 41, 8 - 14.
- Schneider, P. (2011). *Multihazard risk assessment / HAZUS*. Recuperado de National Institute of Building Sciences: https://c.ymcdn.com/sites/www.nibs.org/resource/resmgr/Docs/NIBS_Factsheet_SDP_HAZUS.pdf
- SGC-UNAL. (2015). *Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa a Escala Detallada*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- SNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Bogotá, Colombia: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Societá Coopertaiva (2007). *ARMONIA: methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk map*. Recuperado de www.armoniaproject.net
- Societá Copertaiva D. (2006). *Report on new methodology for multi-risk assessment and the harmonisation of different natural risk maps*. Recuperado de www.armoniaproject.net
- Suarez, J. (2009). Zonificación de susceptibilidad a amenaza y riesgo. En J. Suarez. (Ed.), *Deslizamientos: análisis geotécnico* (pp. 527-582). Bucaramanga: Geotecnología S.A.S.
- Taylor, S., y Bogdan, R. (1994). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación: la búsqueda de significados*. Barcelona: Paidós.

- Thapa, L., Panta, S., Raut, S., Tuladhar, F., Joshi, J., Shrestha, N., Ghimire, P., y Joshi, A. (2017). Multihazard Mapping of Banepa and Panauti Municipalities. *Nepalese Journal of Geoinformatics*, 13, 25-31
- Ugarte Caviedes, A. M. (2014). *Sujetos políticos en contextos de desastre socionatural: el caso de chaitén*. (Tesis de Magister). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Sociales: Santiago de Chile.
- UNGRD, U. N. (2014). Guia Metodológica para la elaboración de planes departamentales para la Gestión de Riesgo. Bogotá D.C. Recuperado de <https://issuu.com/pcmemin/docs/plandepartamentalgua>
- UNISDR. (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Ginebra, Suiza: Naciones Unidas, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Recuperado de https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- UNISDR. (2015). Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres. Informe de Evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres 2015. Ginebra Suiza: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. recuperado de https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR2015_SP.pdf
- UNISDR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. Obtenido de Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres: recuperado de <http://eird.org/americas/index.html#>
- van Westen, C. J., Montoya, L., Boerboom, L., y Badilla Coto, E. (2002). Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas: a case study for the city of Turrialba, Costa Rica. 120-136.
- van Westen, C. J. (2015). Multi-hazard and risk assessment: why it is so difficult. *The International symposium on multi-hazard and risk* (pp. 1-100). Kuala Lumpur, Malaysia: ISMHR.
- Vera Rodríguez, J., y Albarracín Calderón, A. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 1-23.

Recibido: Marzo, 2018

Aceptado: Septiembre, 2019

I CONCURSO FOTOGRÁFICO CIENTÍFICO AAGG2021

PRIMER PUESTO

AUTOR: TOMAS BARRIENTOS

TÍTULO: AMANECER CON DESFILE DE NUBES EN NIVELES ALTOS DE LA ATMÓSFERA



ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOFISICOS Y GEODESTAS

Avenida Cabildo 381 (CP 1426). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina

<http://www.aagg.org.ar>