



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
DIRECCIÓN DE POSTGRADO  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS  
PROGRAMA DOCTORADO EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

MEJORANDO LA OBSERVACIÓN DE  
DEFORMACIONES VOLCÁNICAS DE PEQUEÑA  
ESCALA MEDIANTE UNA ESTIMACIÓN  
EFICIENTE DEL EFECTO TROPOSFÉRICO EN  
DATOS INSAR.

Tesis para optar al grado de Doctora en Ciencias Geológicas

FERNANDA ROCÍO LÓPEZ POZO  
CONCEPCIÓN, CHILE  
2023

Profesor Guía: Luis Lara Pulgar  
Profesor Co-Guía: Rodrigo Abarca Del Río  
Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas,  
Universidad de Concepción

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa en la realización de esta tesis doctoral:

A la Universidad de Concepción (Udec) y la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por su invaluable apoyo académico, logístico y financiero (ANID BECAS / DOCTORADO NACIONAL 21181860). Sin su respaldo, este trabajo no hubiera sido posible.

Al Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) por facilitar los datos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Deseo expresar mi gratitud a mis profesores guía y coguía, Luis Lara y Rodrigo Abarca, cuya asertividad, aportes y conocimientos fueron fundamentales para estimular mi crecimiento tanto académico como personal. Agradezco también a los demás profesores que integran el doctorado en Ciencias Geológicas por las herramientas que proporcionaron para enriquecer mi formación. También, agradezco a Maria Esperanza Aravena por su constante cooperación y buena energía.

A mis compañeros de doctorado, gracias por la calidez humana que han brindado a lo largo de esta travesía académica. Sus gestos de amistad y aliento han dejado una huella imborrable en mi corazón.

A mis amigos más cercanos, quienes siempre estuvieron dispuestos a escucharme y brindarme palabras de aliento. Su inquebrantable apoyo fue un baluarte emocional que me impulsó a perseverar y concretar este importante logro.

A mi familia, en especial a mis padres, Danae y Claudio, y a mis hermanos, Sebastian y Joaquín. Les agradezco de corazón su inquebrantable presencia, apoyo y aliento incondicional. Siempre estuvieron a mi lado, sin importar las dificultades, impulsándome a dar lo mejor de mí.

Por último, quiero agradecer a Dios, cuya presencia y guía fueron fundamentales durante todo el proceso de culminación de esta tesis doctoral. Su fortaleza y bendiciones me impulsaron a superar

obstáculos y alcanzar esta meta.

Gracias a todos ustedes por ser parte de este capítulo de mi vida.

## RESUMEN

En Chile, la presencia de la Cordillera de Los Andes alberga una gran cantidad de volcanes activos. Algunos de ellos han tenido erupciones que, debido a su cercanía a centros poblados, representan un riesgo latente para la población. Ejemplos notables son los volcanes Llaima (2007-2009), Chaitén (2008), Villarrica (2015), Volcán Lascar (2015) y Nevados de Chillán (2016). Estas erupciones plantean preguntas de gran relevancia: ¿Cuándo ocurrirá la próxima erupción volcánica?, ¿Dónde se producirá dicha erupción?, ¿Tendrá un impacto significativo en la población? Estas interrogantes pueden ser abordadas mediante un estudio constante de la actividad volcánica, que implica la integración de información proveniente de diversos indicadores de actividad presentes en un volcán, tales como sismos o temblores, emisiones de gases y desplazamientos de la superficie. La vigilancia y el análisis sistemático de estos signos permiten realizar evaluaciones más precisas sobre los riesgos potenciales y, en última instancia, brindar una mejor preparación y respuesta ante una eventual erupción volcánica.

El desplazamiento de la superficie puede manifestarse como un levantamiento. Esto puede deberse a la entrada de magma en el interior del volcán, lo que, eventualmente, podría generar una erupción. Una técnica para medir estos desplazamientos es el Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR por sus siglas en inglés, Interferometric Synthetic Aperture Radar). InSAR es un método que utiliza imágenes satelitales de microondas, las cuales pueden ser captadas independientemente de la nubosidad y permiten acceder a áreas remotas. Con estas imágenes, es posible medir las deformaciones superficiales en áreas extensas, lo que ofrece una mayor cobertura al volcán en comparación con otros métodos. Sin embargo, este método tiene una desventaja, ya que la señal al atravesar la atmósfera cambia su trayectoria debido a la refracción. Esto es importante porque los movimientos superficiales pueden ser de magnitudes de milímetros a centímetros por año, lo que hace que el efecto de la atmósfera pueda ocultarlos.

Es por esta razón que en este trabajo se ha llevado a cabo un estudio del efecto atmosférico

en datos InSAR en un entorno volcánico. En este contexto, cobra gran importancia la ubicación del volcán, su topografía, el tipo de clima presente y los fenómenos atmosféricos, ya que pueden alterar las mediciones. El objetivo de este estudio es analizar las variaciones espacio-temporales del retardo troposférico en un ambiente volcánico, proponer un método eficiente para la generación de una corrección troposférica rápida y, a su vez, desarrollar un enfoque para discernir si el interferograma muestra información sobre una deformación volcánica real o si se debe únicamente a efectos atmosféricos.

En este proceso, se han implementado algoritmos de aprendizaje automático. Estas herramientas se vuelven relevantes cuando la generación de información es cada vez más rápida y en grandes volúmenes, lo que puede facilitar la investigación y el monitoreo cuando se emplean correctamente. Estos algoritmos son capaces de reconocer patrones en la información presentada y así generar pronósticos, lo que ha sido útil en este proceso para estimar valores y generar clasificaciones de datos.

Los métodos se aplican principalmente a los interferogramas del volcán Llaima entre 2003 y 2009, con el fin de detectar deformaciones relacionadas con el ciclo eruptivo 2007-2009, descartando los casos en los que el efecto troposférico sea significativo. Además, también se han aplicado algunos de estos métodos al ciclo volcánico del Cordón Caulle 2011-2012.

## ABSTRACT

In Chile, the presence of the Andes mountain range harbors numerous active volcanoes. Some of them have had eruptions that, due to their proximity to populated centers, pose a latent risk to the population. Notable examples include the volcanoes Llaima (2007-2009), Chaitén (2008), Villarrica (2015), Volcán Lascar (2015), and Nevados de Chillán (2016). These eruptions raise questions of great relevance: When will the next volcanic eruption occur? Where will this eruption take place? Will it have a significant impact on the population? These questions can be addressed through constant monitoring of volcanic activity, which involves integrating information from various indicators of activity present in a volcano, such as seismic events, gas emissions, and surface displacements. Vigilance and systematic analysis of these signs allow for more precise assessments of potential risks and, ultimately, better preparation and response to a potential volcanic eruption.

Surface displacement can manifest as uplift. This may result from magma entering the interior of the volcano, which could eventually lead to an eruption. One technique for measuring these displacements is Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). InSAR is a method that uses satellite images of microwaves, which can be captured regardless of cloud cover, enabling access to remote areas. With these images, it is possible to measure surface deformations over extensive areas, offering broader coverage of the volcano compared to other methods. However, this method has a disadvantage as the signal passing through the atmosphere changes its trajectory due to refraction. This is important because surface movements can be on the scale of millimeters to centimeters per year, making the atmospheric effect able to obscure them.

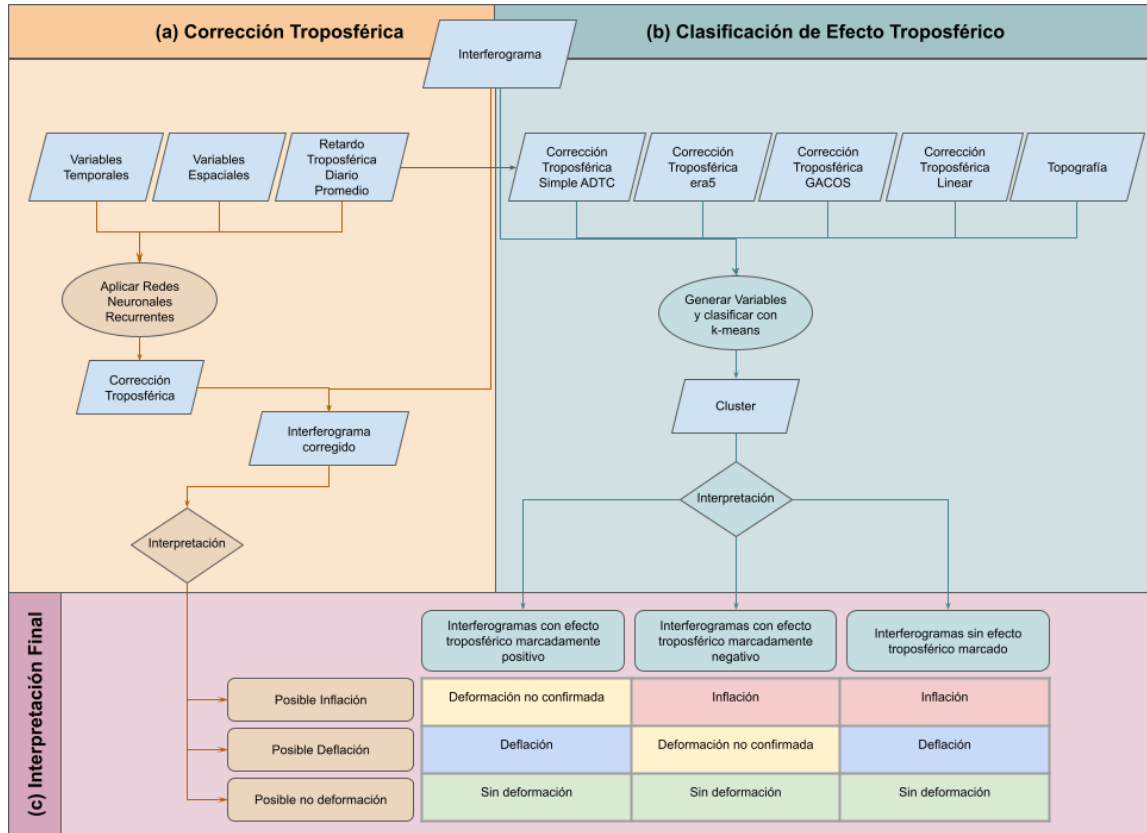
For this reason, this study has undertaken an investigation of the atmospheric effect on InSAR data in a volcanic environment. In this context, the volcano's location, topography, climate type, and atmospheric phenomena become highly relevant as they may alter the measurements. The objective of this study is to analyze spatio-temporal variations of tropospheric delay in a volcanic environment, propose an efficient method for generating rapid tropospheric correction, and, in turn,

develop an approach to discern whether the interferogram shows information about actual volcanic deformation or if it is solely due to atmospheric effects.

In this process, machine learning algorithms have been implemented. These tools become relevant as information generation becomes faster and in larger volumes, which can facilitate research and monitoring when used appropriately. These algorithms can recognize patterns in the presented information, thus generating forecasts, which have been useful in this process to estimate values and classify data.

The methods are primarily applied to the interferograms of the Llaima volcano between 2003 and 2009, in order to detect deformations related to the 2007-2009 eruptive cycle, excluding cases where the tropospheric effect is significant. Additionally, some of these methods have also been applied to the volcanic cycle of Cordón Caulle in 2011-2012.

# RESUMEN GRÁFICO



El esquema general del proceso de aplicación de los métodos propuestos en este trabajo se describe a continuación. (a) Corrección troposférica generada mediante redes neuronales recurrentes que tienen como entrada variables temporales, espaciales y el retardo troposférico diario promedio (base de datos ADTC-InSAR generada en el capítulo 2). (b) Método para determinar si el efecto troposférico es marcado o no, donde se consideran datos de correcciones troposféricas con ERA5, GACOS, Linear y ADTC-InSAR, así como topografía e interferograma. (c) Con la interpretación de interferogramas corregidos troposféricamente y del efecto troposférico marcado, es posible realizar la interpretación final de la deformación presente en los interferogramas del volcán en estudio.



# Índice de Contenidos

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN GRÁFICO</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Contenido</b>	<b>viii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
Formulación del problema . . . . .	8
Hipótesis y Objetivos . . . . .	9
Área de estudio . . . . .	10
Metodología . . . . .	14
Interferogramas . . . . .	14
Retardo troposférico diario promedio . . . . .	16
Machine Learning . . . . .	17
<b>Capítulo 2. ADTC-InSAR: a tropospheric correction database for Andean volca-</b>	
<b>noes</b>	<b>22</b>
Abstract . . . . .	22
Background & Summary . . . . .	22
Methods . . . . .	24
Generation of interferograms . . . . .	25

Generation of ADTC-InSAR . . . . .	30
Tropospheric correction . . . . .	31
Analysis of average daily tropospheric delay . . . . .	31
Analysis of tropospheric correction with ADTC-InSAR . . . . .	31
Data Records . . . . .	34
Technical Validation . . . . .	35
Climate-related behavior of daily tropospheric delay and its components . . . . .	35
Application of ADTC-InSAR to Interferograms . . . . .	41
Usage Notes . . . . .	46
Code availability . . . . .	48

**Capítulo 3. Aplicación de redes neuronales recurrentes en la generación de una corrección troposférica en ambientes volcánicos** **49**

Resumen . . . . .	49
Introducción . . . . .	49
Zona de Estudio . . . . .	51
Método . . . . .	53
Resultados . . . . .	59
Discusión . . . . .	64
Conclusiones . . . . .	71

**Capítulo 4. Identifying the tropospheric effect in InSAR data in a volcanic environment** **74**

Abstract . . . . .	74
Introduction . . . . .	75
Conceptual base of the method . . . . .	77
Method application . . . . .	79

Testing the method: Llama and Cordón Caulle eruptive cycles . . . . .	83
Discussion . . . . .	87
Conclusions . . . . .	90
<b>Capítulo 5. Discusión</b>	<b>92</b>
Retardo troposférico y Clima . . . . .	92
Corrección troposférica . . . . .	95
Efecto troposférico y deformaciones volcánicas . . . . .	97
<b>Capitulo 6. Conclusiones</b>	<b>101</b>
<b>Referencias</b>	<b>105</b>
<b>Anexo 1. Primera publicación</b>	<b>139</b>
<b>Anexo 2. Script Corrección Troposferica</b>	<b>153</b>
CorreccionTroposferica_ASCII.py . . . . .	153
<b>Anexo 3. Material suplementario capítulo 3</b>	<b>158</b>

# Índice de Figuras

1	El mapa izquierdo muestra la ubicación de los volcanes de las distintas zonas volcánicas de la Cordillera de Los Andes: la zona volcánica norte (puntos rojos), central (puntos verdes), sur (puntos azules) y Austral (puntos amarillos). Además, en un cuadro más pequeño se muestra los climas de Köppen-Gaiger [Beck et al., 2018] en Sudamérica. El mapa derecho muestra la topografía en torno al volcán Llaima, indicando la ubicación del volcán Llaima y las localidades de Temuco, Vilcún, Curacautín y Melipeuco.	2
2	Esquema Interferometría SAR . . . . .	4
3	Esta línea de tiempo presenta una recopilación de estudios InSAR en volcanes chilenos, donde las rectas rojas representan inflación, las azules corresponden a deflación, las verdes son estudios que no identifican deformación y las amarillas son estudios con resultados indeterminados. Los rectángulos indican periodos en los cuales se observan distintas interpretaciones de los resultados InSAR que se superponen en el tiempo. . . . .	27
4	Esquema de Representación de una red neuronal. (a) Estructura de la unidad mínima: neurona. (b) Estructura de capas dentro una red neuronal, indicando los tipos de capas neuronales: Entrada, Oculta y Salida. (c) Esquema general de red neuronal, identificando que hay una entrada de datos (Input) a una “máquina” de donde se obtiene un resultado (Output). . . . .	28
5	Gráficas que representan las funciones de activación (a) ReLU y (b) Sigmoides. . . . .	28

6	<p>On the upper left of the figure are the Koppen-Geiger Climates [Beck et al., 2018], and the color bar on the right represents each Koppen-Geiger climate. The Andes Mountains volcanoes are divided into three zones: North Volcanic Zone (NVZ), the Central Volcanic Zone (CVZ), and Southern Volcanic Zone (SVZ). We extracted from this maps, the study areas shown on the right, which comprise the following volcanoes (magenta triangles): Nevados del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle, and Chaitén. The two graphs on the bottom left offer time series of precipitation and air temperature at 2 meters for each volcano, with the legend on the right. Note that each volcanic zone is distinguished by a distinct color range: the Northern Volcanic Zone is red, the Central Volcanic Zone is green, and the Southern Volcanic Zone is blue. . . . .</p>	37
7	<p>Comparison between total, dry and wet average daily tropospheric delay: (a-c) Polar plots illustrating the mean of average daily tropospheric delay of the (a) total, (b) dry, and (c) wet daily delay for each volcano, with the months progressing clockwise and the delays' magnitudes labeled on the radial axis. (d-f) The graphs depict boxplots of the (d) total, (e) dry, and (f) wet daily tropospheric delay for all volcanoes during each season of the year (summer, fall, winter, spring) corresponding to the southern hemisphere. (g) The figure depicts scatter plots between the daily total tropospheric delays and their wet (top) and dry (bottom) components for each volcano. Each volcanic zone is distinguished by a spectrum of different colors: Northern Volcanic Zone is a range of red colors (Brown: Nevados del Ruiz, red: Galeras, orange: Reventador), Central Volcanic Zone is range of green colors (dark green: Hualca hualca, light green: Uturuncu, lemon green: Robledo), and Southern Volcanic Zone is a range of blue colors (lilac: Copahue, purple: Llaima, blue: Cordón Caulle, cyan: Chaitén). . . . .</p>	38

8	Histogram plots illustrate differences in tropospheric corrections between the “TRAIN specific-dates” and the ADTC-InSAR for the ten volcanoes in this study using 500 pairs of random dates. The histograms depicts three statistical parameters: the mean (solid black line), the median (segmented black line), and the standard deviation range (solid red line). . . . .	40
9	Application of tropospheric correction to a real interferogram at the (a) Nevados del Ruiz, (b) Robledo and (c) Copahue volcanoes: (first column) unwrapped interferograms, in Nevados Del Ruiz between 2008/03/06 and 2010/03/12 (path 447- frame 3520), in Robledo between 2010/03/18 and 2010/12/19 (path 101 - frame 6640), in Copahue between 2010/12/27 and 2011/02/11 (path 115 - frame 6410; see Table 2); (second column) unwrapped interferogram corrected with ADTC-InSAR; (third column) unwrapped interferogram corrected with ”TRAIN specific-dates”; (fourth column) the absolute difference between the correction with ADTC-InSAR and with ”TRAIN specific-dates”; (fifth column) the volcanoes topography in kilometers; and (sixth column) a histogram of the absolute difference shown on fourth column. The X-axis of each graphs represent longitude, the Y-axis represents latitude, and the color bars represent phase in radians. . . . .	44
10	Descripción del área de estudio. (a) Ubicación de GPS del OVDAS utilizados para el entrenamiento de redes neuronales. (b) Patrones identificados en los interferogramas generados para el volcán Llaima entre 2003-2009. (c) Variación diaria de la temperatura a 2 metros [Muñoz Sabater et al., 2019] por cada mes del 2022. . . . .	52

11	Método para generación de corrección troposférica por medio de redes neuronales. (a) Estructura general para obtener la corrección troposférica, donde los cuadrados negros representan las dos redes neuronales que se describe con mayor detalle en (b) y (c). En la primera (b) y segunda (c) red neuronal muestra las estructuras de dichas redes neuronales: INPUT, estructura de la cantidad de neuronas y capas, y qué representa el valor de salida de tales redes, además, de las características para entrenar la red, tales como función de activación, optimizador y función de pérdidas.	53
12	Evolución del MSE a través de las épocas empleadas para el entrenamiento de la primera (gráfico superior) y segunda (gráfico inferior) red neuronal. . . . .	60
13	Aplicación de correcciones troposféricas a casos reales de interferogramas generados entre 2003-2009 en el volcán Llaima. Se presentan los interferogramas sin corre- gir (columna 1), e interferogramas corregidos con GACOS (columna 2), corrección intermedia (columna 3), y corrección final (columna 4). . . . .	61
14	Continuación Figura 13 . . . . .	62
15	Continuación Figura 14 . . . . .	63
16	Los gráficos muestran la distribución de los valores de los píxeles del interferograma al restarles la mediana, considerando los interferogramas corregidos con la corrección intermedia ML1 (Rojo) y la corrección final ML2, y la corrección troposférica gener- ada con GACOS (Azul). . . . .	66
17	Illustration of slope change in cross-sections and correlation variables. (a) Scheme illustrating the selection of sections 1 and 2 from the cross-sections. (b-c) Diagram showing the effect of slope change between the corrected interferogram and an un- corrected interferogram across the cross-sections, with topography. (d-e) Scheme illustrating the correlation variable for interpreting the tropospheric effect with to- pography. . . . .	77

18	Flow diagram of the method. It begins with (a) the generation of variables related to correlation and changes in slopes from interferogram data, topography, and different tropospheric corrections (era5, GACOS, linear and ADTC-InSAR). It then proceeds to (b) clustering using k-means, which is validated through PCA and MANOVA. Finally, (c) the clusters are interpreted to assign them as clusters with a markedly positive tropospheric effect (P) or negative tropospheric effect (N), or with an irrelevant tropospheric effect (I). . . . .	80
19	Study area. (a) Topography [NASA, 2013] and (b) Present Köppen-Geiger climates [Beck et al., 2018] around Llaima volcano and Cordón Caulle (purple triangles). (c-d) Deformation patterns and (e-f) cross-sections of (c,e) Llaima and (d,f) Cordón Caulle. . . . .	85
20	Analysis of clusters generated by k-means. Principal Component Analysis and k-means clusters for (a) Llaima and (b) Cordón Caulle. . . . .	86
21	Deformation and clusters generated by k-means. Plots showing measurable deformation in (a) $\alpha$ and (b) $\beta$ patterns of interferograms using ALOS-PALSAR and ENVISAT-ASAR data between 2003-2009 for Llaima volcano, and (c) interferograms from ENVISAT-ASAR between 2011-2012 for Cordón Caulle. The colors of the lines identify Group P (red), Group N (blue), and Group I (green). . . . .	87
22	The figures illustrate the topographic differences between Llaima and Cordón Caulle volcanoes. The two upper maps indicate the lines representing the topographic profiles shown in the four lower graphs. Here, the North-South (N-S), West-East (W-E), Northwest-Southeast (NW-SE), and Northeast-Southwest (NE-SW) profiles are displayed. . . . .	90



23	Climatologías de 40 años (1980-2019) de variables atmosféricas en torno a 10 volcanes de la zona volcánica norte, centro y sur de la Cordillera de Los Andes: Nevados Del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle y Chaitén. (a) Presión superficial [Pa] y (b) Temperatura del aire [°C] de era5 [Muñoz Sabater et al., 2019] descargados por medio de Google Earth Engine. . . . .	94
24	Interferograms with ALOS-PALSAR and ENVISAT-ASAR data generated for (a) Llaima volcano and (b) Cordón Caulle. . . . .	158

# Índice de Tablas

1	Datos de imágenes SAR ALOS-PALSAR y ENVISAT-ASAR utilizadas para generar interferogramas SAR. . . . .	15
2	Table showing the SAR images used to generate interferograms in each of the volcanoes (column 1) with their respective abbreviations (column 2) in the study area (section 2) including the path (column 3) corresponding to ALOS-PALSAR images, the date (column 4 and 7) on which the image was captured (Primary and Secondary images), its absolute orbit (column 5 and 8) and acquisition mode (FBS: Fine Beam Single Polarisation; FBD: Fine Beam Dual Polarisation; column 6 and 9) are showed. The temporal baseline (column 10) and spatial baseline (column 11) are also displayed.	29
3	Table displaying the percentage contribution of the dry (third column) and wet (fourth column) daily delays to the total daily lag of each volcano (second column) in the volcanic zones (first column) studied. . . . .	39
4	The table presents different statistical indicators for each data set of the difference between applying tropospheric corrections with "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR in 500 pairs of different dates in each volcano (Figure 8). The statistics used are: the mean and median central tendency measurements, the standard variation, the first and third quartiles ( $Q_1$ and $Q_3$ : accumulation of 25% and 75% of the data, respectively), kurtosis and skewness. . . . .	42

5	<p>Statistical pertaining to corrections with "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR. The median, mean, standard deviation, kurtosis and skewness statistics are applied to the difference between applying the "TRAIN specific-dates" correction and ADTC-InSAR to real interferograms (fourth column of Figure 9), and at 500 cases of differences in corrections (Figure 8). <math>R^2</math>, <math>nse</math> and <math>d</math> are utilized to compare "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR corrections to real interferograms (second and third column of Figure 9). . . . .</p>	45
6	<p>Ejemplo de los datos utilizados para el entrenamiento de la primera red neuronal. Se especifican las variables INPUT que corresponden a longitud, latitud, altitud, día juliano y hora. Además, se incluyen las variables OUTPUT que consideran el retardo troposférico generado con datos GPS por GAMIT/GLOBK. . . . .</p>	55
7	<p>Ejemplo de los datos utilizados para el entrenamiento de la segunda red neuronal. Se especifican las variables INPUT, que corresponden al año, mes, día y hora de la adquisición de las imágenes SAR Primaria y Secundaria, así como la corrección intermedia proveniente de la primera red neuronal. También se incluyen las variables OUTPUT, que consideran el retardo troposférico generado a partir de los datos de GACOS. . . . .</p>	56
8	<p>Resultados de las correcciones troposféricas generadas con el método propuesto, tanto en su etapa intermedia (solo con la primera red; ML1) como en su etapa final (aplicada ambas redes; ML2). Se presentan las fechas de las adquisiciones SAR de las imágenes Primaria y Secundaria (columna 1-2). Correspondientemente, se muestra la correlación entre las correcciones espaciales intermedias y finales respecto a la corrección con GACOS (columnas 3-4). La medición de la deformación medida en patrones C y E identificados (Figura 10b ) entre los interferogramas originales (columnas 5,9), interferogramas corregidos con GACOS (columnas 6,10), corrección intermedia (columnas 7,11) y corrección final (columnas 8,12). . . . .</p>	61

9	<p>La tabla muestra la mediana (columnas 3-5), media (columnas 6-8), desviación estándar (columnas 9-11), curtosis (columnas 12-14) y simetría (columnas 15-17) para cada interferograma generado sobre el volcán Llaima (columnas 1 y 2). Cada estadística se calcula sobre los valores de los interferogramas corregidos con la corrección intermedia ML (phuw - ML1) y final ML2 (phuw - ML2), así como con GACOS (phuw - GACOS). . . . .</p>	65
10	<p>La tabla muestra los valores de <math>R^2</math> (columnas 3-4), coeficientes <math>NSE</math> (columnas 5-6) y <math>d</math> (columnas 7-8) al considerar los interferogramas (columnas 1-2) corregidos con GACOS como los valores de referencia. Los valores modelados corresponden a los interferogramas corregidos con la corrección intermedia (phuw - ML1) y final (phuw - ML2), y los valores de referencia corresponden a los interferogramas corregidos con GACOS. . . . .</p>	67
11	<p>Result for Llaima and Cordón Caulle. The table presents patterns (column 2), SAR image acquisition dates (columns 3-4), the value of Pearson correlation coefficient between topography and tropospheric corrections from era5 (columns 5), and between interferogram and topography (column 6), and changes in interferogram slopes upon applying tropospheric corrections from GACOS, Linear, and ADTC (columns 7-12). Lastly, k-means classification (column 13) is applied using 3 and 2 clusters, respectively.</p>	84
12	<p>Datos de imágenes ALOS PALSAR y Envisat utilizadas para generar interferogramas SAR. . . . .</p>	96

## Capítulo 1. Introducción

La Cordillera de Los Andes constituye el arco volcánico discontinuo de mayor extensión, abarcando múltiples países sudamericanos, como Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Argentina y Chile (Figura 1a). Esta región ha sido testigo de numerosos desastres naturales ocasionados por la actividad volcánica constante. En particular, en 1985 tuvo lugar una erupción volcánica en el Nevado del Ruiz (Colombia), la cual resultó en la trágica pérdida de más de 23.000 vidas debido a la formación de lahares [Pierson et al., 1990]. Este suceso marcó un punto de inflexión que impulsó una mayor cantidad de investigaciones y el monitoreo de volcanes activos, con el objetivo de reducir el riesgo ante posibles erupciones volcánicas [Tilling, 2009]. De hecho, esta catástrofe podría haberse evitado si se hubiera llevado a cabo una evacuación oportuna [Voight, 1990].

La protección de las poblaciones frente a los riesgos volcánicos se basa en la toma de decisiones respaldada por el monitoreo volcánico. Es fundamental asegurar que la población tenga acceso a la información y la comprenda de manera efectiva [Basualto et al., 2011; Cevallos Culqui et al., 2018; Lechner & Rouleau, 2019]. Las erupciones volcánicas acarrearán diversas consecuencias perjudiciales, como problemas de salud, pérdida de vidas humanas y animales, y daños materiales [Tobin & Whiteford, 2002; Horwell & Baxter, 2006; Barclay et al., 2019].

A medida que la tecnología ha avanzado con el paso de los años, se ha ampliado la gama de instrumentos utilizados en el monitoreo volcánico, lo que permite detectar cambios físicos y químicos en un volcán ocasionados por el movimiento del magma en su interior [Acocella, 2021a]. Estos sistemas de vigilancia incluyen tanto instrumentos in situ como remotos. Entre los instrumentos in situ se encuentran los sismómetros, inclinómetros, gravímetros, cámaras de vigilancia y equipos de muestreo. Por otro lado, los instrumentos remotos abarcan técnicas como imágenes espectrales, DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy en inglés) e InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar en inglés).

En Chile, desde el norte hasta el sur, se evidencia la presencia notable de la Cordillera de

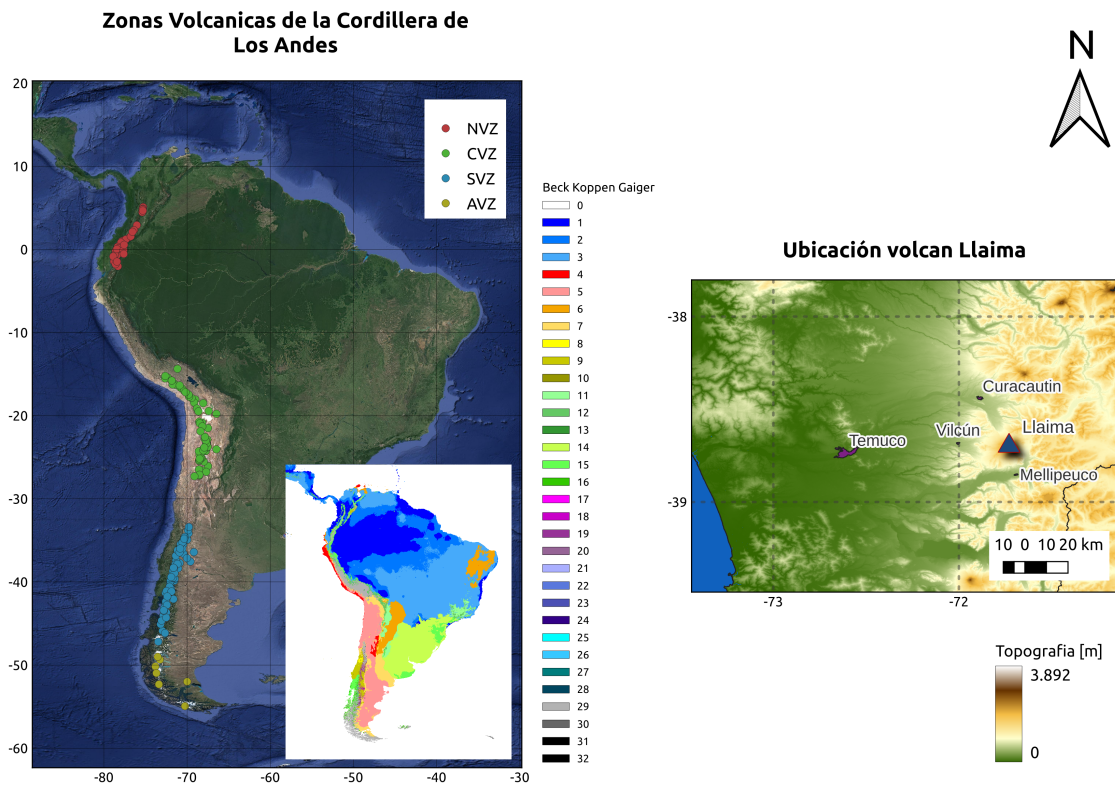


Figura 1: El mapa izquierdo muestra la ubicación de los volcanes de las distintas zonas volcánicas de la Cordillera de Los Andes: la zona volcánica norte (puntos rojos), central (puntos verdes), sur (puntos azules) y Austral (puntos amarillos). Además, en un cuadro más pequeño se muestra los climas de Köppen-Gaiger [Beck et al., 2018] en Sudamérica. El mapa derecho muestra la topografía en torno al volcán Llaima, indicando la ubicación del volcán Llaima y las localidades de Temuco, Vilcún, Curacautín y Melipeuco.

los Andes, especialmente en las zonas volcánicas central, sur y austral. Por otro lado, la zona volcánica norte se encuentra más allá de las fronteras chilenas, entre Colombia y Ecuador (Figura 1a) [Stern, 2004]. En particular, los volcanes chilenos representan un riesgo directamente vinculado a la concentración de población, como es el caso de aquella que reside en la zona centro-sur de Chile, lejos del desierto y de los campos de hielo patagónicos [Lara et al., 2021]. De los 92 sistemas volcánicos activos en Chile, los más peligrosos incluyen el Villarrica, Calbuco, Llaima, Puyehue-Cordón Caulle, Grupo Descabezados, Carrán-Los Venados, Chaitén, Osorno, Mocho-Choshuenco, Nevados de Chillán, Lonquimay, Hudson, Antuco y Láscar (<https://www.gob.cl/noticias/conozca-cuales-son-los-volcanes-activos-de-mayor-riesgo-en-chile/>). Durante

el siglo XXI, se han producido erupciones volcánicas en varios volcanes chilenos, como el Volcán Llaima entre 2007 y 2009 [Romero Moyano et al., 2014; Franco et al., 2019], el Volcán Chaitén en 2008 [Alfano et al., 2012; Major & Lara, 2013], el Volcán Villarrica en 2015 [Romero et al., 2018], el Volcán Lascar en 2015 [Gaete et al., 2020] y los Nevados de Chillán desde 2016 [Moussallam et al., 2018; Astort et al., 2022]. Por lo tanto, el monitoreo constante es un factor importante para prevenir grandes desastres en esta área.

La toma de decisiones para proteger a las poblaciones de los riesgos volcánicos se basa en el monitoreo volcánico. A medida que ha avanzado la tecnología a lo largo de los años, la variedad de instrumentos utilizados ha aumentado, lo que permite detectar cambios físicos y químicos en un volcán debido al movimiento del magma en su interior [Acocella, 2021a]. Sin embargo, es importante destacar la necesidad de que la población pueda acceder a la información y comprenderla de manera efectiva [Basualto et al., 2011; Cevallos Culqui et al., 2018; Lechner & Rouleau, 2019]. Esto se debe a que las erupciones volcánicas tienen diversas consecuencias perjudiciales, como problemas de salud, pérdida de vidas humanas y animales, y daños materiales [Tobin & Whiteford, 2002; Horwell & Baxter, 2006; Barclay et al., 2019].

El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) a través del Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) realiza el monitoreo de alrededor de 45 volcanes (<https://www.sernageomin.cl/sernageomin-da-a-conocer-nuevo-ranking-de-volcanes/>). Este monitoreo se lleva a cabo mediante múltiples técnicas instrumentales, tales como la sismicidad, análisis y muestreo de fluidos, cámaras de vigilancia, registro acústico, muestreo de ceniza, deformación in situ y cobertura satelital [Amigo, 2021]. En particular, la cobertura satelital incluye la interferometría radar (InSAR) para mediciones de deformación volcánica.

El monitoreo a través de imágenes satelitales permite la cobertura de áreas extensas y/o de difícil acceso. La frecuencia de adquisición es constante y, gracias al avance tecnológico, la cantidad de satélites y datos disponibles aumenta continuamente [Elliott et al., 2016; Zhao et al., 2022]. Estas características han beneficiado los estudios en múltiples áreas, incluyendo la meteorología

y la predicción del tiempo [Okamoto et al., 2002; Sutanto et al., 2015; Filonchyk et al., 2019], la agricultura [Alcantara et al., 2012; Murugan et al., 2017; Radočaj et al., 2022], la gestión de recursos naturales [Tucker & Townshend, 2000; Martínez et al., 2010; Klemas, 2013] y la observación de la Tierra [Van Westen, 2000; Fujiwara et al., 2006; Alam et al., 2020].

El radar de apertura sintética (SAR) es un sistema que emite ondas electromagnéticas y recopila información del terreno a través de sus componentes de amplitud y fase. Específicamente, la fase se utiliza para generar interferogramas, los cuales permiten detectar desplazamientos en la superficie terrestre en casos como terremotos [Liu et al., 2021; Orellana et al., 2022; Li et al., 2022b], remoción de suelos [Moretto et al., 2021; Liu et al., 2022; Dai et al., 2022] y deformaciones volcánicas [Poland & Zebker, 2022; Albino et al., 2020; Delgado et al., 2022; Le Mével et al., 2022]. En la Figura 2, se muestra el esquema del método InSAR, que consiste en realizar mediciones de una misma superficie en diferentes momentos, calculando la diferencia de fases entre las mediciones para identificar patrones de deformación en la imagen resultante, lo que indica cambios en la superficie terrestre.

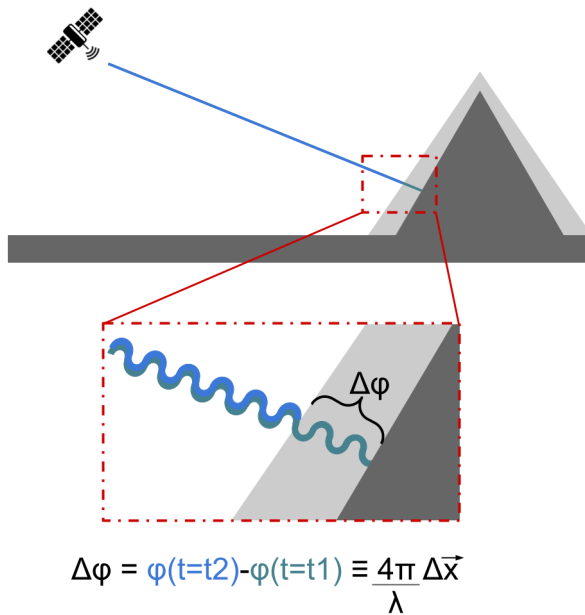


Figura 2: Esquema Interferometría SAR

Dado que la señal SAR se emite desde un sensor satelital hacia la superficie terrestre, debe



atravesar la atmósfera terrestre. Durante su trayecto a través de la atmósfera, la señal experimenta un cambio en su trayectoria debido a la propiedad de refracción [Smith & Weintraub, 1953]. La refracción de una onda en la atmósfera se define matemáticamente como:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

$N$  corresponde a una escala aumentada de la refractividad donde  $N = (n-1) \times 10^6$  y  $n$  representa el índice de refracción en las frecuencias de radio. Aquí,  $P_d$  es la presión parcial de los gases secos,  $e$  es la presión parcial del vapor de agua, y  $T$  es la temperatura absoluta. Las constantes utilizadas son  $k_1 = 77.6$  [K hPa<sup>-1</sup>],  $k_2 = 23.3$  [K hPa<sup>-1</sup>], y  $k_3 = 3.75 \times 10^5$  [K<sup>2</sup> hPa<sup>-1</sup>] [Smith & Weintraub, 1953]. Este cambio en la trayectoria de la señal se refleja en un cambio de fase detectado por el sensor. Por lo tanto, el retardo de fase troposférico  $\phi_{tropo}$  puede ser formulado como lo siguiente [Hanssen, 2001]:

$$d_{tropo} = \frac{1}{10^6 \cos \theta} \int_{h=h_1}^{h=h_{top}} N(h) dh \quad (2)$$

$$\phi_{tropo} = \frac{-4\pi}{\lambda} d_{tropo} \quad (3)$$

Donde  $\lambda$  representa la longitud de onda del radar,  $-4\pi/\lambda$  es un factor de conversión para transformar el pseudo-rango en aumento a retardo de fase, y  $d_{tropo}$  es el retardo troposférico (unidireccional). El retardo troposférico ( $d_{tropo}$ ) depende del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) y de la refracción de la señal, como se muestra en la ecuación 2, donde la refracción está determinada por la altura  $h$ , que varía desde la superficie ( $h_1$ ) hasta la parte superior de la troposfera ( $h_{top}$ ).

El retardo troposférico puede descomponerse en dos componentes: el retardo troposférico seco y el retardo troposférico húmedo. La componente seca está principalmente influenciada por la temperatura y presión atmosféricas, mientras que la componente húmeda está determinada por

la humedad relativa. Estos componentes se encuentran en una proporción de aproximadamente 90% seca y 10% húmeda [Misra & Enge, 2006]. Además, presentan características distintas: la componente seca tiene magnitudes del orden de metros, está fuertemente correlacionada con la topografía y es relativamente constante en el tiempo, mientras que la componente húmeda exhibe características opuestas.

La estimación precisa de las correcciones troposféricas es especialmente importante cuando se trabaja en el monitoreo de deformaciones volcánicas, ya que se han observado cambios en la superficie del orden de milímetros a centímetros por año [Fournier et al., 2010]. Si consideramos que un cambio del 20% en la humedad relativa puede generar cambios de 10 a 14 cm en la trayectoria de la señal [Zebker et al., 1997], queda claro que existe una incertidumbre no deseada al monitorear volcanes.

Existen varios métodos para estimar las correcciones troposféricas en los datos InSAR. Algunos métodos simples se basan en la correlación con la topografía para generar una estimación [Massonnet et al., 1995; Nikkhoo et al., 2016; Elliott et al., 2008]. Otros métodos utilizan datos complementarios, como datos de GPS o información atmosférica [Yu et al., 2018a; Onn & Zebker, 2006; Cao et al., 2021; Jolivet et al., 2011; 2014]. También existen métodos que reconstruyen la trayectoria de la señal SAR [Hofmeister, 2016; Haji-Aghajany & Amerian, 2017; 2020; Haji-Aghajany et al., 2019]. Incluso se ha explorado el uso de inteligencia artificial para construir correcciones atmosféricas [Shamshiri et al., 2020; Chen et al., 2022; Li et al., 2022a].

El objetivo principal de este estudio se centra en analizar la influencia de la atmósfera en los datos InSAR para la medición precisa de deformaciones volcánicas. En el presente Capítulo de esta tesis se aborda el problema científico, teniendo en cuenta los antecedentes existentes que han mostrado diferentes interpretaciones debido al efecto troposférico causado por las condiciones atmosféricas y topográficas de la zona de estudio. Se presenta la hipótesis y los objetivos establecidos para este trabajo. Además, se describen las herramientas computacionales utilizadas que han sido fundamentales para el desarrollo de la investigación.

El Capítulo 2 de la tesis presenta el primer artículo titulado “ADTC-InSAR: a tropospheric correction database for Andean volcanoes”, el cual ha sido publicado en Scientific Data de Nature. En este capítulo se ha desarrollado una base de datos de correcciones troposféricas diarias promedio en 10 volcanes ubicados en las zonas volcánicas norte, centro y sur de los Andes. Estas tres zonas presentan climas distintos, lo que ha permitido evaluar las variaciones en las correcciones troposféricas según diferentes variables. Además, se plantea la posibilidad de emplear esta base de datos como una herramienta rápida y fácil para aplicar correcciones troposféricas en futuros estudios.

En el Capítulo 3 se presenta un método basado en redes neuronales recurrentes que utiliza la base de datos de correcciones troposféricas generada en el Capítulo 2, junto con otros datos espacio-temporales, para obtener correcciones troposféricas aplicables a datos InSAR. Este enfoque proporciona correcciones comparables a otros métodos sin la necesidad de descargar datos constantemente. Cabe destacar que este capítulo será incluido en una publicación que se someterá a revisión en una revista después de la defensa de la tesis doctoral.

En el Capítulo 4 se describe un método que utiliza algoritmos de aprendizaje automático para llevar a cabo una clasificación no supervisada de casos en los volcanes Llaima y Cordón Caulle, con el objetivo de identificar mediciones fuertemente afectadas por el efecto troposférico. Se consideran variables que relacionan los datos del interferograma, las correcciones troposféricas y la topografía para ejecutar esta clasificación. Actualmente, este capítulo se encuentra en proceso de revisión para su posible publicación en la revista “Remote Sensing of Environment” (RSE).

El Capítulo 5 se dedica a la discusión de los principales resultados obtenidos en esta investigación y cómo contribuyen a la resolución del problema científico planteado.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones más importantes derivadas de esta investigación, destacando los hallazgos y posibles direcciones futuras de estudio.

## Formulación del problema

En el contexto de Chile, un país con numerosos volcanes potencialmente activos, el estudio del comportamiento volcánico, que incluye la deformación, ha despertado un gran interés. Una herramienta ampliamente utilizada en estos estudios es InSAR, que permite detectar y analizar cambios en la superficie volcánica. En particular, la Figura 3 muestra una recopilación de distintos estudios InSAR realizados sobre volcanes chilenos, donde se observa una superposición en el tiempo de diferentes interpretaciones de estos datos, especialmente en los volcanes Llaima, Cordón Caulle y Chaitén. Estos resultados podrían ser producto del efecto troposférico en las imágenes SAR, derivado de las condiciones atmosféricas causadas por la topografía complicada y la proximidad de los volcanes al océano Pacífico.

Durante el ciclo eruptivo 2007-2009 en el volcán Llaima, se han observado indicios de deformación. Sin embargo, existen diferentes interpretaciones sobre la influencia de los efectos atmosféricos en estos patrones observados. Bathke et al. [2011] sostiene que los efectos atmosféricos son insignificantes, sugiriendo una inflación previa y durante la erupción. Mientras que Fournier et al. [2010], Remy et al. [2015] y Delgado et al. [2017] plantean la posibilidad de que los patrones observables estén afectados por esta influencia atmosférica, por lo que no confirman una deformación superficial producto de movimientos internos de magma, pero confirman una deformación en el flanco este del volcán producto de deslizamientos de suelo provocados por la erupción en enero de 2008. De igual manera, interpretaciones divergentes también se han observado en imágenes InSAR de otros volcanes, como el Cordón Caulle [Jay et al., 2014; Delgado et al., 2016; 2018; Wendt et al., 2017; Euillades et al., 2017].

Los fenómenos oceano-atmosféricos producto de la presencia del océano Pacífico [Garreaud & Aceituno, 2007] y la compleja topografía derivada del vulcanismo y de la erosión glaciaria [Stern, 2004] generan variaciones climáticas significativas. Bajo esta investigación, suponemos que estos cambios climáticos pueden afectar el recorrido de la señal SAR, lo que a su vez introduce incertidumbre en los

resultados obtenidos, generando así interpretaciones erradas. Por lo tanto, es fundamental abordar y comprender el impacto de los efectos atmosféricos en los estudios de deformación volcánica para mejorar la interpretación y la confiabilidad de los resultados.

## Hipótesis y Objetivos

De acuerdo a lo indicado anteriormente la hipótesis de este trabajo es:

*“La interpretación de deformaciones de pequeña magnitud en áreas volcánicas de los Andes del Sur está condicionada significativamente por el retardo atmosférico de la señal SAR. Esto genera interpretaciones contrastantes que pueden ser resueltas con un método de corrección mejorado”*

De acuerdo a la hipótesis planteada, se proponen los siguientes objetivos:

- Objetivo Principal:
  - Realizar una evaluación de las posibles deformaciones observadas en volcanes de los Andes del Sur Chileno al reconocer el impacto del efecto troposférico en las mediciones de InSAR.
- Objetivos Específicos:
  - Analizar estadísticamente el comportamiento del retardo troposférico, incluyendo sus variaciones y dependencias.
  - Desarrollar un método de corrección troposférica para datos InSAR, diseñado para la fácil implementación por parte del usuario y compatible con nuevas tecnologías, como el aprendizaje automático.
  - Desarrollar un método complementario para la identificación del retardo troposférico en datos InSAR, aplicado a la reinterpretación de procesos de deformación y actividad volcánica en los volcanes chilenos.

- Verificar la validez y aplicabilidad de los métodos de estimación del error atmosférico, así como las interpretaciones InSAR, en el contexto de los volcanes chilenos.

## Área de estudio

A lo largo de la Cordillera de Los Andes, contamos con una gran diversidad geológica y climática. Esta cadena montañosa forma el arco volcánico que abarca la parte oeste de América del Sur (Figura 1a), producto de la subducción de las placas tectónicas oceánicas Nazca y Antártica bajo la placa sudamericana. Este arco volcánico se compone de más de 200 estratovolcanes y 12 sistemas de calderas gigantes potencialmente activos, resultado de la subducción de las placas oceánicas de Nazca y Antártica bajo la placa sudamericana [Stern, 2004].

La Cordillera de Los Andes está dividida en la Zona Volcánica Norte (NVZ: Northern Volcanic Zone; 2°N-5°S), Central (CVZ: Central Volcanic Zone; 14°S-28°S), Sur (SVZ: Southern Volcanic Zone; 33°S-46°S) y Austral (AVZ: Austral Volcanic Zone; 49°S-55°S) (ver Figura 1). Estas secciones del arco volcánico son producto del ángulo de subducción entre la placa tectónica oceánica y continental, con una inclinación suficientemente pronunciada ( $\sim 25^\circ$ ) para generar vulcanismo. No obstante, la separación entre los segmentos volcánicos está dada por los segmentos de placa plana peruana y pampeana (peruvian and pampean flat-slab segment en inglés), y la brecha volcánica patagónica (patagonian volcanic gap en inglés).

El segmento de placa plana es una zona de reducción del ángulo de subducción que abarca desde el sur del Ridge Carnegie en el sur de Ecuador hasta el centro de Perú en el Ridge Nazca, donde la actividad magmática ocurrió antes de 10 Ma, pero la intensidad de la actividad disminuyó progresivamente de norte a sur y también la migración hacia el sur del lugar de subducción de la cresta Nazca hasta 5 y 2 Ma [Stern, 2004]. El segmento de placa plana pampeana ocurre entre CVZ y SVZ, donde se genera una reducción del ángulo de subducción desde el CVZ hacia el sur y no hay una ruptura en la placa subducida, sino que el límite sur de este segmento se genera por la subducción de la ridge de Juan Fernández [Stern, 2004]. Por último, la brecha volcánica patagónica

es producto de la triple unión de las placas tectónicas de Nazca, Sudamericana y Antártica que separa la SVZ y AVZ, donde la subducción de la dorsal oceánica genera un término en el vulcanismo de arco y un desarrollo de un extenso campo de basaltos alcalinos [Stern, 2004].

Este trabajo se enfoca principalmente en los volcanes ubicados en la Zona Volcánica Sur (SVZ). Sin embargo, para comprender las características del retardo troposférico, se amplía el área de estudio para incluir los volcanes de las Zonas Volcánicas Norte (NVZ) y Central (CVZ) durante el Capítulo 2. Considerar estas tres zonas permite evaluar las variaciones del retardo troposférico según el tipo de clima presente en cada una de estas zonas: tropical en la NVZ, desértico en la CVZ y templado en la SVZ [Beck et al., 2018].

El vulcanismo en la Zona Volcánica Norte (NVZ) es producto de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana, generando un arco con dirección noreste-suroeste que hacia el norte se separa en la Cordillera Occidental y Central [Hall & Wood, 1985; Stern, 2004]. Esta sección de los Andes podría dividirse en 8 secciones menores relacionadas con estructuras importantes y duraderas del continente [Hall & Wood, 1985]. Las lavas de composición andesita a andesita basáltica y rocas que datan desde el Paleozoico hasta el Mesozoico son características [Jaillard et al., 2000; Ramos, 2009]. Entre los volcanes destacados de la NVZ se encuentran el Nevado del Ruiz, conocido por su erupción en 1985 [Herd, 1986; Voight, 1990; Naranjo et al., 1986], y el volcán Galeras, que tuvo actividad eruptiva en 1992-1993 [Stix et al., 1997; Baxter & Gresham, 1997].

Desde el punto de vista atmosférico, esta NVZ presenta un clima predominantemente tropical, caracterizado por temperaturas mayores a 18[°C en los meses más fríos y, en los meses más secos, las precipitaciones superan los 60 [mm/mes], generando así altos niveles de humedad [Beck et al., 2018]. Este clima templado está acompañado por climas frescos a fríos o extremadamente fríos, donde la temperatura diaria mínima y máxima se encuentran por debajo de 15 °C y 25 °C, respectivamente [Roncancio et al., 2020]. En esta zona se genera un régimen estacional bimodal, que consiste en dos estaciones húmedas y dos secas, producto de los fenómenos oceano-climáticos con la topografía, lo cual afecta el comportamiento de la temperatura [Hurtado, 2009; Roncancio et al., 2020; Espinoza

et al., 2020]. Fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO: El Niño Southern Oscillation) o el Monzón Sudamericano (SAMS: South American Monsoon System) tienen un gran impacto en el clima de la zona [Espinoza et al., 2020; Cerón et al., 2021].

La Zona Volcánica Central (CVZ) es un arco volcánico de tipo contraccional donde el magmatismo ha estado presente a lo largo de la evolución de los Andes, con la identificación de productos magmáticos difusos y voluminosos desde el Cenozoico superior hasta el Cuaternario [Acocella, 2021b]. Esta zona se caracteriza por una corteza que alcanza un grosor de hasta 65 km [Stern, 2004], lo cual debido a su espesor permite la cristalización fraccionada, generando así lavas de tipo andesita, dacita e ignimbritas [Jaillard et al., 2000]. De esta manera, el vulcanismo de esta zona se destaca por la presencia de estratovolcanes y complejos volcánicos con magmas de tipo intermedios y evolucionados (andesita-dacita) desarrollados desde el Pleistoceno superior hasta el Holoceno, y que se encuentran asociados a flujos piroclásticos, caída y depósito de rocas y ceniza, y avalanchas de escombros [Stern et al., 2007; Lara et al., 2021].

Las condiciones climáticas de estas zonas permiten una buena exposición de las características vulcanológicas y de la corteza más antigua a lo largo de la costa oeste de Sudamérica [Stern et al., 2007]. El clima árido estepario y desértico predomina en la CVZ, donde las temperaturas mensuales son menores a 18[°C, y particularmente en las zonas más elevadas se genera un clima de tipo tundra polar con temperaturas que oscilan entre -5 y 10[°C] [Sarricolea et al., 2017; Beck et al., 2018]. Producto de las fluctuaciones locales en la insolación solar y cambios en el suministro de humedad proveniente desde el Amazonas por vientos producto de cambios en la circulación de vientos desde el Atlántico y su relación con la importante topografía, durante el verano del hemisferio sur se genera el conocido "Invierno Altiplánico" [Lenters & Cook, 1999; Valdivielso et al., 2022; Valdivielso et al., 2022].

La Zona Volcánica Sur (SVZ) forma un arco volcánico producto de la subducción de la placa de Nazca en un ángulo de 22° frente a la fosa, lo cual también da lugar al sistema de falla Liquiñe-Ofqui de aproximadamente 1200 km de extensión [Acocella, 2021b]. La actividad volcánica se



ha caracterizado por erupciones hawaianas, estrombolianas, subplinianas, plinianas, vulcanianas y freatomagmáticas con las que se han generado grandes campos volcánicos, estratovolcanes, complejos de calderas y centros eruptivos menores [Stern et al., 2007]. Los peligros comúnmente presentes están relacionados con flujos piroclásticos, lahares y caída de cenizas [Stern et al., 2007]. La combinación de vulcanismo y la erosión glaciaria generan una compleja y atractiva topografía, aunque a una altura considerablemente menor que en la CVZ [Stern, 2004].

Este relieve, en combinación con los vientos provenientes del océano Pacífico y las altas precipitaciones, generan un clima predominantemente templado [Sarricolea et al., 2017]. Esto significa que durante el verano el clima es cálido o seco, con temperaturas promedio mayores a  $10^{\circ}\text{C}$ , mientras que en los días fríos, esta temperatura tiene mínimas cercanas a  $0$  hasta  $18^{\circ}\text{C}$  [Beck et al., 2018]. En Chile, se genera una variedad climática debido a la combinación de la topografía presente y eventos océano-atmosféricos, como la corriente de Humboldt, el Anticiclón del Pacífico y el sistema de vientos del oeste [Cortez et al., 2021], puesto que la precipitación es de tipo orográfica [Garreud et al., 2017]. En este caso, la precipitación media anual es superior a 1500 mm, y la cantidad de días lluviosos supera los 100 al año [Sarricolea et al., 2019].

Cabe destacar en las tres zonas descritas previamente la influencia de los fenómenos oceano-atmosféricos, como el ENSO (El Niño Southern Oscillation en inglés), que genera variaciones en el régimen de precipitaciones y otras variables al interactuar con los distintos relieves topográficos [Montecinos & Aceituno, 2003; Puertas Orozco & Carvajal Escobar, 2008; Garreud, 2009; Poveda et al., 2011]. Esto genera cambios importantes en la humedad relativa de la atmósfera, variable influyente en el retardo troposférico.

En este contexto, el volcán Llaima ( $38.6^{\circ}\text{S}$ ,  $71.6^{\circ}\text{O}$ , 3179 m), en el cual se centra la mayor parte de este estudio, es un estratovolcán en el cual la generación de lahares, flujos de lava y caída de tefra son los principales peligros [Stern et al., 2007]. Durante el periodo 2007-2009, experimentó su último ciclo eruptivo [Romero-Moyano et al., 2014; Franco et al., 2019]. Este volcán es considerado uno de los más activos de Chile y representa un gran peligro para los centros poblados cercanos,

como Melipeuco, Cherquenco y Curacautín (Figura 1b). Debido a su actividad volcánica y su ubicación en una zona con topografía diversa, el volcán Llama proporciona una oportunidad única para estudiar el retardo troposférico diario que afecta las mediciones InSAR, ya que las condiciones climáticas y topográficas pueden tener un gran impacto en las mediciones en este lugar.

## **Metodología**

El objetivo de este trabajo es estudiar las variaciones espacio-temporales del retardo troposférico diario, así como el efecto atmosférico sobre interferogramas reales. Además, se propone el desarrollo de un nuevo método para generar correcciones troposféricas más precisas.

A continuación, describiremos los métodos utilizados a lo largo de este estudio, que involucran la generación de interferogramas para todos los volcanes considerados en la investigación. Luego, presentaremos la metodología empleada para generar los retardos troposféricos diarios promedio y estudiar las variaciones espacio-temporales del retardo troposférico. Por último, abordaremos los algoritmos de Aprendizaje Automático empleados en el método de corrección troposférica (Redes Neuronales) y para identificar la presencia de un gran efecto atmosférico durante la adquisición de datos SAR de los interferogramas propuestos (k-means).

## **Interferogramas**

Volcano	abbr.	Satelite	Path	Frame	Flight Direction	Date (yyyymmdd)	Hour	Absolute Orbit	Beam Mode	Frame
Nevados Del Ruiz	NDR	ALOS	447	3520	D	20080306	15:14	11269	FBS	HH
						20100312	15:17	22005	FBS	HH
Galeras	Gal	ALOS	152	0	A	20070303	3:55	5880	FBS	HH
						20080905	3:52	13932	FBD	HH+HV
Reventador	Rev	ALOS	108	7170	A	20080107	3:57	10401	FBS	HH
						20090224	3:59	16440	FBS	HH
Hualca-hualca	HHu	ALOS	103	6860-6870	A	20100119	3:45	21239	FBS	HH
						20110122	3:41	26607	FBS	HH
Uturuncu	Utu	ALOS	98	6730	A	20090310	3:31	16644	FBS	HH
						20100313	3:32	22012	FBS	HH
Robledo	Rob	ALOS	101	6640	A	20100318	3:37	22085	FBS	HH
						20101219	3:34	26111	FBS	HH
Copahue	Cop	ALOS	115	6410	A	20101227	4:01	26228	FBS	HH
						20110211	4:00	26899	FBS	HH
Llaima	Lla	ALOS	116	6400	A	20070404	4:05	6346	FBS	HH
						0071120	4:04	9701	FBS	HH
						20071005	4:05	9030	FBD	HH+HV
						20090222	4:05	16411	FBS	HH
						20070306	4:07	5923	FBS	HH
						20080122	4:06	10620	FBS	HH
		Envisat	304	6399	A	20090311	4:07	16659	FBS	HH
						20030204	3:30	4867	FBS	VV
						20050104	3:30	14887	FBS	VV
						20061205	3:30	24907	FBS	VV
						20070424	3:30	26911	FBS	VV
						20071016	3:30	29416	FBS	VV
		Envisat	10	4383	D	20080304	3:30	31420	FBS	VV
						20080408	3:30	31921	FBS	VV
						20031125	14:06	9082	FBS	VV
						20040309	14:06	10585	FBS	VV
						20070403	14:06	26617	FBS	VV
						20070508	14:06	27118	FBS	VV
Cordón Caulle	CCa	ALOS	118	6360	A	20080108	14:06	30625	FBS	VV
						20081118	14:05	35134	FBS	VV
		Envisat	176	6345	A	20100213	4:10	21604	FBS	HH
						20100331	4:10	22275	FBS	HH
						20110309	3:49	47173	FBS	HH
						20110508	3:50	48035	FBS	HH
						20110607	3:51	48466	FBS	HH
						20110707	3:51	48897	FBS	HH
						20111005	3:52	50190	FBS	HH
						20111204	3:53	51052	FBS	HH
Chaitén	Cha	ALOS	121	6310	A	20120202	3:53	51914	FBS	HH
						20120303	3:53	52345	FBS	HH
Chaitén	Cha	ALOS	121	6310	A	20070928	4:14	8928	FBD	HH
						20100218	4:16	21677	FBS	HH+HV

Tabla 1: Datos de imágenes SAR ALOS-PALSAR y ENVISAT-ASAR utilizadas para generar interferogramas SAR.

Los interferogramas han sido generados utilizando la herramienta GMTSAR [Sandwell et al., 2011a; 2011b]. Para este propósito, se han descargado datos SAR de los sensores ALOS-PALSAR [JAXA/METI, 2007] y Envisat ASAR [European Space Agency, 2002], como se muestra en la Tabla 1. ALOS-PALSAR proporciona datos SAR en banda L (1.27 GHz) con una resolución espacial de 10-20 m (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>). Por otro lado, Envisat ASAR opera en banda C (5.33 GHz) con una resolución espacial de  $8 \times 4 \text{m}^2$  (<https://esar-ds.eo.esa.int/oads/access/>).

Los interferogramas han sido corregidos topográficamente utilizando el modelo de elevación digital (DEM) SRTM-3 (Shuttle Radar Topography Mission) [NASA, 2013]. Estos datos proporcionan información sobre la altura de la superficie terrestre con una resolución de 90 m, y pueden descargarse desde <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>. Cabe mencionar que no se han realizado

correcciones ionosféricas en los interferogramas y se ha aplicado un filtro de 300 [m] y desenrollado de fase.

### **Retardo troposférico diario promedio**

Para comprender las variaciones del retardo troposférico, se han utilizado conjuntos de datos de retardos troposféricos diarios promedio. Este proceso se ha llevado a cabo para 10 volcanes de la Cordillera de Los Andes: Nevados del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle y Llaima.

Este proceso para cada volcán consistió en generar mallas de retardos troposféricos usando el toolbox TRAIN (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise en inglés) [Bekaert et al., 2015a; 2015b] con datos era5 [Muñoz Sabater et al., 2019; 2021] para cada día entre 2007 y 2011. Para cada día del año, se promediaron elemento a elemento todas las mallas generadas, lo que resultó en 365 mallas promedio que representan las variaciones diarias del retardo troposférico para cada volcán.

Estas mallas tienen dos funcionalidades importantes. En primer lugar, permiten explorar la variación de los retardos troposféricos diarios a través de los volcanes considerados en tres zonas de los Andes, las cuales tienen diferentes tipos de climas. Esto nos permite evaluar, por ejemplo, los periodos del año en los que el retardo troposférico diario aumenta, lo que puede proporcionar información valiosa sobre las condiciones atmosféricas en cada región.

En segundo lugar, estas mallas se han utilizado para generar correcciones troposféricas para datos InSAR mediante dos métodos. En el Capítulo 2, se implementó un método de generación simple de correcciones troposféricas utilizando ADTC-InSAR. En el Capítulo 3, se aplicó un enfoque basado en inteligencia artificial para obtener correcciones troposféricas más precisas. Ambos métodos usan la información contenida en las mallas de retardos troposféricos para realizar las correcciones necesarias en los datos InSAR y mejorar la interpretación de las deformaciones observadas en los volcanes.

## **Machine Learning**

El Aprendizaje Automático es el estudio científico de algoritmos y modelos estadísticos que permiten a los sistemas informáticos realizar tareas específicas sin una programación explícita [Mahesh, 2020]. Estos algoritmos tienen diversas aplicaciones, incluyendo visión artificial, predicción, análisis semántico, procesamiento del lenguaje natural y recuperación de información [Shinde y Shah, 2018]. La ventaja del Aprendizaje Automático radica en que puede generar aprendizaje sin la intervención directa de los humanos, lo que permite que pueda ser de dos tipos: supervisado y no supervisado.

En el aprendizaje supervisado, el algoritmo ajusta parámetros de una función utilizando pares de datos de entrada y salida previamente etiquetados. Por otro lado, en el aprendizaje no supervisado, el objetivo es descubrir y presentar estructuras interesantes dentro de los datos, lo que puede ser útil para tareas como agrupación o reducción de características de los datos [Mahesh, 2020].

El Aprendizaje Automático, o Machine Learning, ha sido aplicado en el análisis de datos InSAR a través del reconocimiento de patrones [Anantrasirichai et al., 2018; Brengman & Barnhart, 2021; Naghibi et al., 2022]. Y también se ha utilizado para predecir el Retardo Troposférico en datos InSAR [Shamshiri et al., 2020; Zhao et al., 2021; Chen et al., 2022]. Estas aplicaciones de Machine Learning en datos InSAR ofrecen una valiosa herramienta para mejorar la interpretación y análisis de deformaciones volcánicas y otros fenómenos geodésicos, permitiendo obtener resultados más precisos y confiables en diversas áreas de la investigación geocientífica.

En este trabajo, se hace uso de dos tipos de aprendizaje automático con fines predictivos, considerando que la predicción involucra clasificación, análisis y recomendación [Shinde & Shah, 2018]. Por lo tanto, hemos aplicado las Redes Neuronales para la generación de correcciones troposféricas y el algoritmo k-means para la clasificación de casos y determinar si el efecto atmosférico es significativo.

### **Redes Neuronales**

Las redes neuronales son un algoritmo de aprendizaje automático que pretende reconocer las

relaciones subyacentes en un conjunto de datos mediante la imitación de la forma en que opera el cerebro humano [Mahesh, 2020]. Considerando que las redes neuronales aplican un aprendizaje supervisado, donde se tienen pares de datos de entrada y salida, denominados “INPUT” y “OUTPUT” respectivamente. Este proceso consiste en ajustar parámetros mediante la minimización del error entre los outputs reales y los estimados por el método, con el fin de realizar una predicción cada vez más precisa.

La unidad mínima de una red neuronal es la neurona (figura 4a). La neurona recibe la información  $p$ , que es sometida a la función de activación  $f(wp + b)$ . Los parámetros escalares  $w$  y  $b$  son ajustados mediante alguna regla de aprendizaje para que la relación INPUT/OUTPUT de las neuronas cumpla con algún objetivo específico [Hagan & Demuth, 1999]. En una neurona con múltiples entradas (INPUT), la función de activación se aplica como  $f(\mathbf{W}\mathbf{p} + \mathbf{b})$ , donde el vector  $\mathbf{p}$  representa los valores de entrada  $p_j$ , y  $\mathbf{W}$  es la matriz de pesos  $w_{i,j}$ .

La estructura completa de una red neuronal consta de 3 tipos de capas (Figura 4b): capa de entrada, capas ocultas y capa de salida. La capa de entrada está compuesta por  $N$  neuronas que representan las variables de entrada consideradas en la red. Las capas ocultas pueden ser 1 o más capas, y cada una compuesta por una cantidad variable de neuronas. La cantidad de capas ocultas y la cantidad de neuronas en cada capa oculta dependen de la arquitectura específica de la red neuronal y la complejidad del problema que se esté abordando. La capa de salida es la última capa de la red, y su función es entregar los resultados finales de la red, los cuales pueden ser variables según el objetivo particular de la red y la naturaleza del problema a resolver.

En este caso, se hará uso de una red neuronal recurrente, la cual genera una retroalimentación de la información. En este tipo de red, la información viaja a través de las neuronas hacia adelante, pero también hacia atrás, e incluso puede retroalimentarse a sí misma. Las neuronas pueden estar completamente o parcialmente conectadas [Medsker & Jain, 2001].

A continuación, se presenta una breve descripción de los elementos que es necesario definir manualmente y sobre los cuales el algoritmo realizará el aprendizaje. Estos elementos incluyen la

función de activación, la función de pérdida y el optimizador.

En primer lugar, la precisión de la predicción de la red neuronal está determinada por la función de activación ( $f(\mathbf{z})$ ) utilizada. Esta función permite tomar la salida de una capa anterior y generar una nueva entrada para la siguiente capa [Sharma et al., 2017]. Comúnmente, se emplean funciones no lineales como ReLU y Sigmoide (Figura 5).

ReLU (Rectified Linear Unit) [Nair & Hinton, 2010] es una función que se activa cuando la transformación lineal ( $z = wp + b$ ) es mayor a cero y en distintos momentos, lo que hace que sus resultados abarquen desde 0 hasta  $\infty$  (ver Figura 5a). Cuando el valor del gradiente es cero, los parámetros  $\mathbf{W}$  y  $\mathbf{b}$  no pueden actualizarse en la retroalimentación. ReLU está definido por la siguiente expresión:

$$ReLU(z) = \begin{cases} z, & z > 0 \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

Sigmoide [Iliev et al., 2017] es una función que produce valores comprendidos entre 0 y 1, y no es simétrica (ver Figura 5b). La función sigmoide es definida matemáticamente como:

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (5)$$

Por otra parte, la función de pérdida es un indicador de la desviación entre el valor real y el valor predicho por la red neuronal. Una función de pérdida ampliamente utilizada es el Error Cuadrático Medio (MSE: Mean Squared Error). Su formulación está dada por:

$$MSE(y, \hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y - \hat{y}_i)^2 \quad (6)$$

Donde  $y_i$  es el valor predicho por el modelo,  $\hat{y}_i$  es el valor desde la matriz OUTPUT y  $N$  es el número de observaciones

MSE evalúa la diferencia cuadrática media entre valores reales y predichos. Este abarca valores entre  $0 - \infty^+$ , donde 0 indica una precisión del 100% y a medida que el MSE se aleja de 0, el error generado al predecir valores con el modelo propuesto es mayor. De esta manera, el MSE permite conocer de manera global la proximidad entre los datos reales y los predichos por la red neuronal.

Por último, el optimizador ajusta los valores de los pesos  $W$  con el propósito de reducir el error de la función de pérdida utilizada en la Red Neuronal. En este trabajo, se usó el optimizador Adam (Adaptive Moment Estimation en inglés). Adam es un optimizador que emplea un promedio exponencialmente decreciente de gradientes pasados. Es decir, la tasa de decaimiento es adaptativa debido a que se utiliza un promedio exponencialmente decreciente de los gradientes cuadrados previos. Se define [Kingma & Ba, 2017] como:

Mientras  $\theta_t$  no converja, hacer:

$$\left\| \begin{aligned} t &= t + 1 \\ g_t &= \nabla_{\theta} f_t(\theta_{t-1}) \\ m_t &= \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \\ v_t &= \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \\ \hat{m}_t &= \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \\ \hat{v}_t &= \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \\ \theta_t &= \theta_{t-1} - \alpha \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t + \epsilon}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Como resultado de lo anterior se tiene  $\theta_t$ . Donde,  $\alpha$  es el tamaño de paso,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son las tasas de decaimiento exponencial para las estimaciones de momento que varían entre  $[0, 1]$ ,  $f(\theta)$  es la función objetivo estocástica con parámetros  $\theta$ ,  $\theta_0$  es el vector de parámetros inicial. Y se define los



vectores de momentos iniciales como  $m_0 = 0$  y  $v_0 = 0$ , y el paso de tiempo inicial  $t = 0$ .

### **K-means**

K-means [Lloyd, 1982] es un algoritmo de aprendizaje no supervisado que se utiliza para realizar una agrupación de datos (clusterización). El objetivo del algoritmo de k-means es dividir  $M$  observaciones de  $N$  dimensiones en  $K$  grupos, de tal manera que se minimice la suma de los cuadrados de las distancias dentro de cada grupo [Hartigan & Wong, 1979].

El agrupamiento se genera a través de un proceso iterativo que consiste en asignar  $k$  centroides de acuerdo al número de clústeres requeridos manualmente. Se estima la diferencia entre cada observación y los centroides, para asignar cada observación al conglomerado más cercano. En cada conglomerado se elige un nuevo centroide de acuerdo al valor medio de cada grupo, lo que será útil para repetir nuevamente el proceso. Este procedimiento se repite hasta que los grupos se estabilicen o hasta alcanzar un número máximo de iteraciones asignado previamente.

Existen múltiples métodos para estimar la cantidad de centroides según los datos. De hecho, la función `nbClust` [Charrad et al., 2014] en el software R recopila diversos métodos. La función `nbClust` aplica distintos métodos para estimar los  $k$  centroides a los datos presentados, y el valor  $k$  que más se repite es el que se reconoce como el valor óptimo.

Una característica importante de k-means es que permite agrupar los datos de tal manera que se reconozcan características claras, a pesar de ser un algoritmo que depende de los  $k$  centroides iniciales [Peña et al., 1999].

## **Capítulo 2. ADTC-InSAR: a tropospheric correction database for Andean volcanoes**

### **Abstract**

Monitoring geophysical hazards requires a near real-time response and precise interpretation of InSAR data, typically recording minute surface deformations. Accurate tropospheric adjustment is an essential aspect of InSAR processing. This study provides a free database of ready-to-use Tropospheric Correction for InSAR for the three volcanic zones from north to south of the Andes. Average Daily Tropospheric Correction for InSAR (ADTC-InSAR) is a collection of average daily tropospheric delay matrices created using ECMWF re-analysis of the global atmosphere and surface conditions (era5) as atmospheric data and TRAIN software. The construction method and annual variation according to the climatic zones are provided, and its effectiveness is evaluated. ADTC-InSAR facilitates the generation of tropospheric corrections in InSAR with easy access, fast application, and accuracy comparable to TRAIN. Its purpose is to serve as a starting point for tropospheric correction in the event of emergency response to extreme occurrences and as a reference for other research and academic objectives.

### **Background & Summary**

Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR), a technique based on a phase difference between two images, allows the study of Earth's ground deformation induced by earthquakes [Simons et al., 2002], mass wasting in landslides [Riedel & Walther, 2008; Yin et al., 2010], volcanic unrest, and deflation after magma withdrawal [Massonnet et al., 1995; Chang et al., 2010; Biggs et al., 2010], among the others. Over the past decade, the introduction of new constellations of satellites with higher capacity and more advanced sensors resulted in an unprecedented ability to track the temporal evolution of changes across the entire Earth's surface. This implies an increasing number

of scenes in accessible databases and the need for automated analysis, which is an effort that the scientific community is releasing [Morishita et al., 2020; Albino et al., 2020].

A source of error of InSAR is the atmospheric delay caused by the refraction of the signal as it crosses the troposphere, resulting in a change in trajectory. The tropospheric delay has a dry component (or dry contribution) determined by atmospheric pressure and temperature. The order of magnitude is in meters and is affected by topography. The wet component (or wet contribution) is a function of the partial pressure of water vapor. As a result, it is influenced by the turbulent region of the atmosphere and is not affected by topography; it has a centimeter order of magnitude.

The importance of the tropospheric delay lies in the magnitude of the changes generated, considering that volcanic areas usually show ground deformations in the order of a few centimeters. Zebker et al. [1997] indicates that a change of 20% in relative humidity can generate a difference between 10 and 14 [cm] of delay, which can be more significant than the detected deformation even considering that the wet component only represents 10% of the total [Misra & Enge, 2006]. A more precise measurement of the tropospheric delay throughout the year is required for the most accurate interpretation. We can see this at Llaima volcano (Southern Andes, Chile: [-71.730 °,-38.697 °]) where different interpretations have been generated from InSAR. According to Fournier et al. [2010], between 2007-2008, there was subsidence on the volcano's eastern flank, which is presumed to be related to the January 2008 eruption and collapse. Bathke et al. [2011] specify that a deflation of  $\sim 10$  [cm] occurred between 2003 and 2007, followed by  $\sim 8$  [cm] of inflation that lasted until the end of 2008. Delgado et al. [2017] suggests that there could be an interferogram signal one month before the April 2009 eruption, indicating an inflation of approximately 6-15 [cm]. However, atmospheric effects raise questions about the certainty of deformations resulting from internal changes in the volcano. Remy et al. [2015] stated that no deformation was evidenced between 2003-2011 and that the patterns observed in the interferograms are the product of tropospheric error but pointed out the collapse of the eastern flank in 2008.

The Andes is a natural laboratory for InSAR studies due to the variety of active processes and

latitudinal and topographic variation. This offers diverse climatic conditions in which the humid input would exert significant and different control on the tropospheric delay in each zone.

Methods for determining this delay range from using correlation with topography to more sophisticated models. Regardless of quality, heterogeneity in the treatment of this aspect hinders remote sensing studies from being compatible and comparable.

We aimed to investigate this topic through approaches based on globally available and recognized atmospheric data. As a result of this study, Average Daily Tropospheric Correction for InSAR (ADTC-InSAR) database has been developed using era5 atmospheric reanalysis to produce a homogeneous and high-quality correction that offers information on tropospheric delay behavior at the continental scale. It is provided for three significant volcanic segments in the Andes that exhibit a range of Koppen-Geiger climates [Beck et al., 2018]. These are the Northern Volcanic Zone (NVZ), the Central Volcanic Zone (CVZ) , and the Southern Volcanic Zone (SVZ). These zones have tropical, desert, and temperate climates, respectively (see Figure 6).

We propose an ADTC-InSAR database that may assist in the research and understanding of tropospheric delay magnitudes and to understand better how the wet and dry components of the delay fluctuate in response to the prevailing climate. With this database, we were able to generate tropospheric corrections with good precision and fast application for InSAR data in the volcanic areas used as a case study.

## Methods

Historically, the tropospheric delay needed for interferogram correction has been measured with a number of methods. These methods must consider complementary data in order to generate a tropospheric correction [Rosen et al., 2000]. Some methods generate corrections considering the correlation with topography [Massonnet et al., 1995; Elliott et al., 2008; Nikkhoo et al., 2016], time and/or spatial filters [Velez et al., 2011; 2016; Lundgren et al., 2015; 2017; Tizzani et al., 2015; Le Mével et al., 2016; Euillades et al., 2017], InSAR or GPS time series [Rosen et al., 1996; Onn and

Zebker, 2006; Jay et al., 2014; Wendt et al., 2017; Yu et al., 2018a], using methods that involve the reconstruction of the path of the ray and estimation of the distance traveled [Hofmeister, 2016; Haji-Aghajany & Amerian, 2017; 2020; Haji-Aghajany et al., 2019], and obtaining the tropospheric delay of the signal utilizing the integral of the refractivity through the atmosphere by using atmospheric variables such as the total tropospheric pressure, the temperature, and the partial pressure of water vapor [Jolivet et al., 2011; 2014; Remy et al., 2015; Lundgren et al., 2015; Bekaert et al., 2015a; 2015b; Poland et al., 2017; Haji-Aghajany et al., 2017; Cao et al.2021; Roukounakis et al., 2021]. This is beneficial when the connection between delay and elevation is not linear [Doin et al., 2009]. As will be detailed later, we will utilize a program that implements the latter strategy, which requires atmospheric data.

The study area consist of the 10 volcanoes of the Andean volcanic arc: Nevados Del Ruiz, Galeras, and Reventador in NVZ; Hualca hualca, Uturuncu and Robledo in CVZ; Copahue, Llaima, Cordón Caulle and Chaitén in SVZ. A distinct prevailing climate surrounds each volcanic zone. We identify mainly tropical, desert, and temperate climates in the NVZ, CVZ, and SVZ zones, respectively [Beck et al., 2018] (see Figure 6).

### **Generation of interferograms**

For the generation of interferograms, we use Generic Mapping Tools Synthetic Aperture Radar (GMTSAR) software [Sandwell et al., 2011a, 2011b] (<https://topex.ucsd.edu/gmtsar/>) with Land Observation System Phased-Array Synthetic-Aperture Radar (ALOS-PALSAR) and Shuttle Radar Topography Mission 3 arc-Second Global Digital Elevation Model (DEM-SRTM [NASA, 2013]; <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) data. GMTSAR utilizes the p2p\_ALOS.csh code to generate the interferograms with ALOS-PALSAR data. This function does data preprocessing, focuses and aligns Single Look Complex (SLC) images, filters the interferogram, unwraps phase, and geocodes the data.

For running GMTSAR, the configuration file config.ALOS.txt is required. In this file, these

options have been selected: *topo-phase* = 1, for topographic correction; *switch-master* = 0, to utilize the Primary image as a reference; *filter-wavelength* = 300, for the interferogram filter; *correct-iono* = 0, to avoid generating ionospheric corrections; and *threshold-snaphu* = 0.1, for phase unwinding with snaphu.

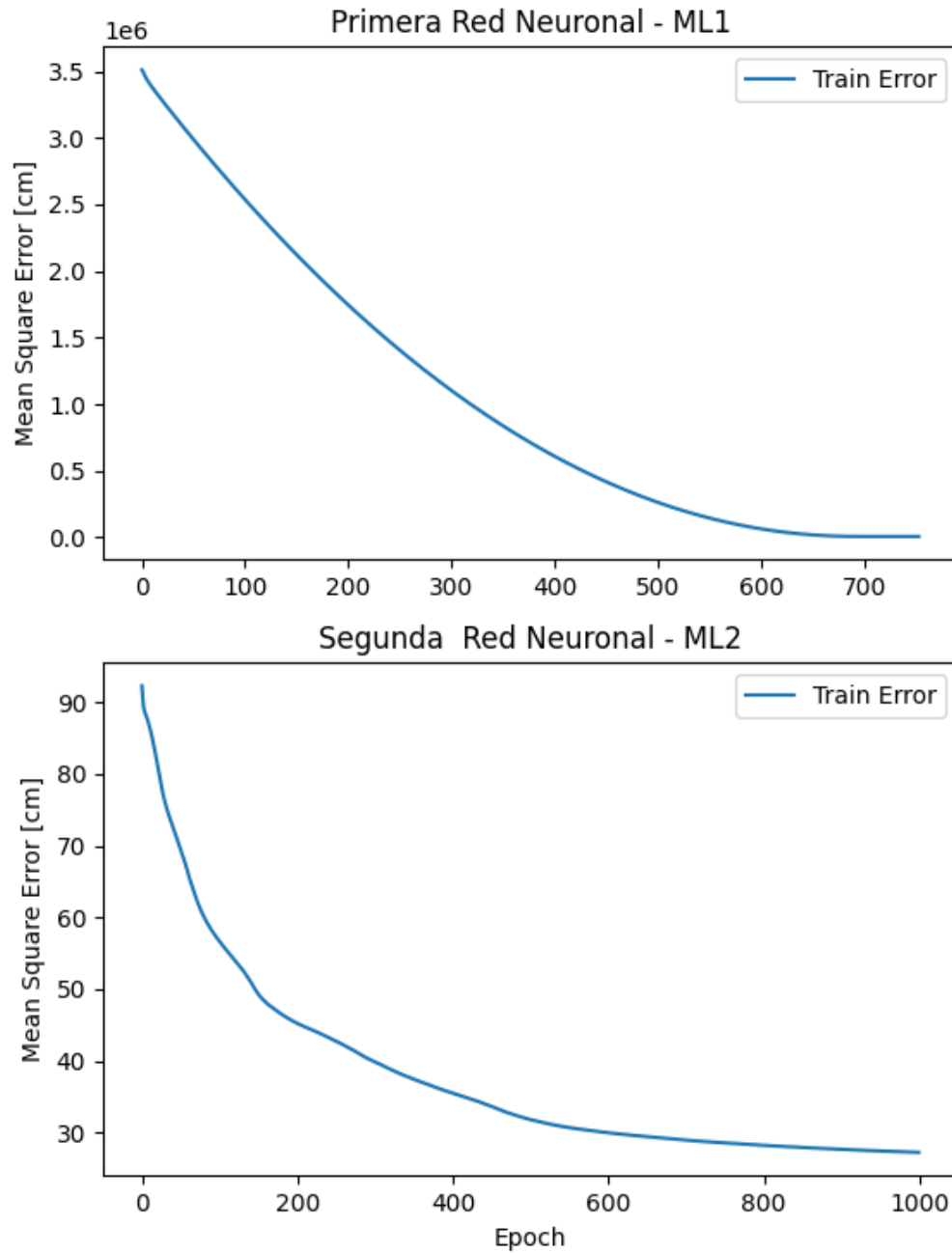


Figura 3: Esta línea de tiempo presenta una recopilación de estudios InSAR en volcanes chilenos, donde las rectas rojas representan inflación, las azules corresponden a deflación, las verdes son estudios que no identifican deformación y las amarillas son estudios con resultados indeterminados. Los rectángulos indican periodos en los cuales se observan distintas interpretaciones de los resultados InSAR que se superponen en el tiempo.

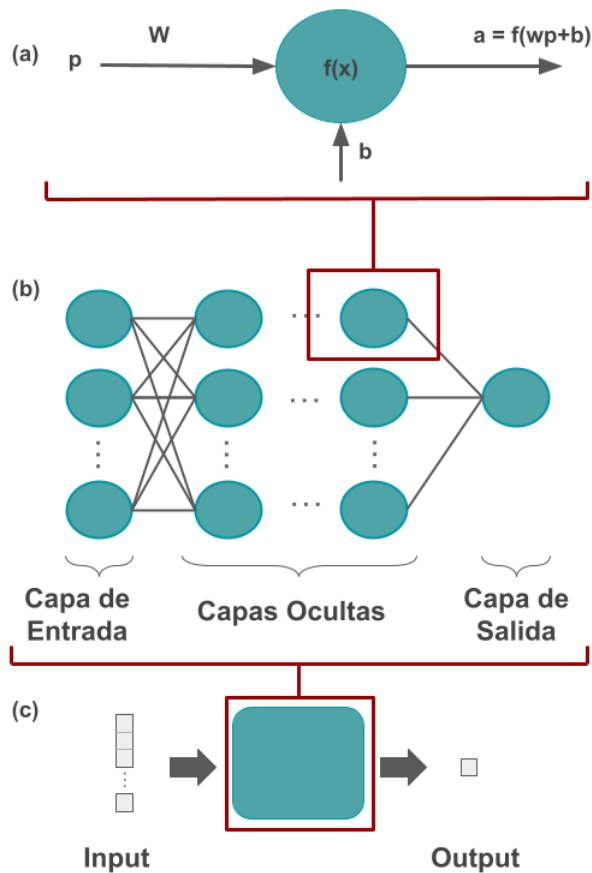


Figura 4: Esquema de Representación de una red neuronal. (a) Estructura de la unidad mínima: neurona. (b) Estructura de capas dentro una red neuronal, indicando los tipos de capas neuronales: Entrada, Oculta y Salida. (c) Esquema general de red neuronal, identificando que hay una entrada de datos (Input) a una “máquina” de donde se obtiene un resultado (Output).

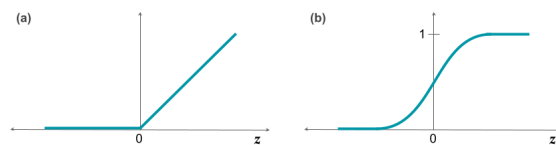


Figura 5: Gráficas que representan las funciones de activación (a) ReLU y (b) Sigmoide.



Volcano	Abbr.	Path	Primary image		Secondary image		Baseline		
			Date (yyyymmdd)	Absolute Orbit	Date (yyyymmdd)	Absolute Orbit	Temporal [Days]	Spatial [m]	
Nevados Del Ruiz	NDR	447	20080306	11269	20100312	22005	FBS	736	187.73
Galeras	Gal	152	20070303	5880	20080905	13932	FBD	552	-319.262
Reventador	Rev	108	20080107	10401	20090224	16440	FBS	418	148.619
Hualca-hualca	HHu	103	20100119	21239	20110122	26607	FBS	368	-1236.799
Uturuncu	Utu	98	20090320	16644	20100313	22012	FBS	358	-1219.686
Robledo	Rob	101	20100318	22085	20101219	26111	FBS	276	-227.810
Copahue	Cop	115	20101227	26228	20110211	26899	FBS	46	228.07
Llaima	Lla	116	20071120	9701	20071005	9030	FBD	46	-201.040
Gordón Caulle	CCa	118	20100213	21604	20100331	22275	FBS	46	-734.158
Chaitén	Cha	121	20100218	21677	20070928	8928	FBD	874	6.487

Table 2: Table showing the SAR images used to generate interferograms in each of the volcanoes (column 1) with their respective abbreviations (column 2) in the study area (section 2) including the path (column 3) corresponding to ALOS-PALSAR images, the date (column 4 and 7) on which the image was captured (Primary and Secondary images), its absolute orbit (column 5 and 8) and acquisition mode (FBS: Fine Beam Single Polarisation; FBD: Fine Beam Dual Polarisation; column 6 and 9) are showed. The temporal baseline (column 10) and spatial baseline (column 11) are also displayed.

Advanced ALOS PALSAR (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>) data from the Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA, <https://global.jaxa.jp/>) between 2007 and 2011 were utilized to generate interferograms (see Table 2). The advantage is due to its L wavelength (1.27GHz), which permits higher penetration into the vegetation cover and lesser correlation loss. The utilized data contain Fine Beam Single (FBS) and Fine Beam Double (FBD) HH+HV polarization (where H: horizontal and V: vertical), with 20 and 10 m spatial resolution and an incidence angle of 34.3 °; they were downloaded from <https://search.asf.alaska.edu/#/>. In addition, topographic information is required for topographic and tropospheric corrections. DEM-SRTM3 [NASA, 2013], measured vertically in meters and with a 90 m spatial resolution (downloaded from <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>) has been utilized.

### **Generation of ADTC-InSAR**

The average tropospheric correction was constructed using TRAIN (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise [Bekaert et al., 2015a; 2015b]; <https://github.com/dbekaert/TRAIN>) with era5 atmospheric [Muñoz Sabater et al., 2019; 2021] and DEM SRTM3 [NASA, 2013] data.

The tropospheric correction is based on the era5 atmospheric reanalysis that superseded ERA-Interim. Thus, whereas ERA-Interim had an ~80 km horizontal spatial resolution and 60 vertical levels to 0.1 hPa, era5 now has a 30 km horizontal spatial resolution and 137 vertical levels from the surface to above 80 km altitude (see <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>). Additionally, the temporal resolution also increased from 6 hours to 1 hour. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts provides the era5 data (ECMWF; <https://api.ecmwf.int/>) via its ECMWF API library (<https://pypi.org/project/ecmwf-api-client/>)

For each day between 2007 and 2011, the dry, wet, and total daily tropospheric delay were calculated using TRAIN to build the daily average database. Then, the daily tropospheric delays for each day between 2007 and 2011 are then used to build a daily average grid for a whole year. For example, the matrices produced on January 1, 2007, 2008, 2009, 2010, and 2011 are averaged

to obtain a single mesh. This term refers to the average daily tropospheric correction for dry, wet, and total conditions.

### **Tropospheric correction**

To compute the tropospheric correction using the daily average database, it is necessary to collect the dates when the SAR images for the interferograms were acquired: `date_Primary` and `date_Secondary`. We require the ADTC-InSAR of the total daily tropospheric delay corresponding to the previously indicated dates. If `date_Primary` is August 6, 2009, we search for August 6 in the ADTC-InSAR. This results in two meshes representing the ADTC-InSAR of the daily total tropospheric delay for the dates `date_Primary` and `date_Secondary`: `mesh_Primary` and `Mesh_Secondary`. The meshes are interpolated so that their points match those in the unwrapped interferogram. The data is converted from centimeters to radians, and the difference between their points is computed: `mesh_Secondary-mesh_Primary`. Thus, ADTC-InSAR, has made the tropospheric correction for the interferogram under consideration available.

### **Analysis of average daily tropospheric delay**

Two lines of analysis have been developed for evaluating the information of the daily average tropospheric delay: (1) to investigate the temporal behavior at the seasonal and annual time scales using various statistics such as median, mean, and standard deviation; and (2) to investigate the relationship between the total daily tropospheric delay, dry and wet contribution with Koppen-Geiger climates. As will be detailed further, the northern, central, and southern volcanic zones are characterized by their tropical, desert, and temperate climates, respectively.

### **Analysis of tropospheric correction with ADTC-InSAR**

This work aims to examine the efficiency of using ADTC-InSAR as a tropospheric correction. This consists of knowing if ADTC-InSAR is appropriate for use as a generic correction prior to, as a

first guess, or even in place of data from specific dates, which is the common practice. For doing this, we compare a correction generated by ADTC-InSAR to one generated with specific dates. It is worth noting that specific dates cover days found throughout the 5 years window (2007-2011), while ADTC-InSAR only queries the day and month considered.

Thus, for each volcano, we generated two databases of tropospheric corrections for 500 random date pairings (described further below) to be compared, which we refer to as corrections with "ADTC-InSAR" and "TRAIN specific-dates".

ADTC-InSAR correction implies locating the matching daily dates in the ADTC-InSAR database generated for the volcano to acquire the corresponding tropospheric correction. In contrast, "TRAIN specific-dates" tropospheric correction entails producing the tropospheric corrections for InSAR conventionally, i.e., using TRAIN, for each previously selected random date. We intend to determine the degree of similarity and difference by comparing the magnitudes of the results produced by each method in each volcano.

It is worth mentioning that a Monte-Carlo process is applied to choose these 500 pairings of random dates. That is a well-recognized approach for tackling estimation and optimization problems [Kroese et al., 2014] in a wide variety of domains, including statistics, mathematics, and the physical sciences. However, the statistics barely vary significantly more than 100 dates after the volcano testing, and at 300, they level off. Consequently, 500 corrections were made with "TRAIN specific-dates" data (from 2007 to 2011) and 500 with ADTC-InSAR. The difference between identical pairs of day corrections was then calculated.

In this section, different statistics are applied depending on the instance. In the first place, the mean ( $\mu$ , Eq. 8), median, standard deviation ( $\sigma$ , Eq. 9), quartiles 1 and 3, kurtosis ( $k$ , Eq. 10), and skewness ( $s$ , Eq. 11) are used to appreciate the data distribution of the corrections for 500 pairs of random dates in each volcano and the difference between the corrections. For example, the mean, median, standard deviation, and quartiles allow us to understand where the data are concentrated. At the same time, kurtosis and skewness provide information on how they are distributed.

The statistics used are defined in the following equations:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |x_i - \mu|^2} \quad (9)$$

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (10)$$

$$s = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (11)$$

Where,  $x_i$  is the  $i$ th observations,  $\mu$  is the mean,  $\sigma$  is the standard deviation,  $n$  is the number of the observations, and  $E(x)$  represents the expected value of the quantity  $x$ . Moreover, quartiles 1, 2 and 3 ( $Q_1$ ,  $Q_2$  and  $Q_3$ ) correspond to measures of data distribution, which has scalar values.  $Q_1$ ,  $Q_2$  and  $Q_3$  correspond to the 25th, 50th and 75th percentiles of the data distribution. In particular,  $Q_2$  is equivalent to the median.

In second place, when comparing the corrected interferograms with "TRAIN specific-dates" and those with ADTC-InSAR, the squared correlation coefficient ("R squared",  $R^2$ , Eq. 12), Nash-Sutcliffe coefficient [Nash & Sutcliffe, 1970] ( $nse$ , Eq. 13), and the modified Willmott coefficient [Willmott, 1981] ( $d$ , Eq. 14) are utilized (in Table 5). These statistics allow two data sets to be compared to estimate their similarity. The "R squared", or the coefficient of determination provides information on how well the "ADTC-InSAR" approximates the "TRAIN specific-dates", when  $R^2 = 1$ , these data sets fit perfectly. The Nash-Sutcliffe coefficient varies between inf and 1; when  $nse=1$ , the data sets match perfectly. Furthermore, finally, the Willmott coefficient varies between 0 and 1; when  $d=1$ , the data have a perfect agreement, and if  $d=0$ , there is no agreement.

The statistics used are defined in the following equations:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right]^2 \quad (12)$$

$$nse = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (13)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)} \quad (14)$$

Where,  $X_i$  and  $Y_i$  are the  $i$ th observations of datasets  $X$  and  $Y$ ,  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  are the means of datasets  $X$  and  $Y$ , and  $n$  is the number of the observations.

We wanted as minimal change as possible in the interferogram data in order to be able to compare it to the effect that may be produced by one approach or another. This is done to assess if the correction increases final result uncertainty. Therefore, we selected interferograms dates which do not exhibit deformation.

## Data Records

ADTC-InSAR in ASCII-format is available for download at <https://figshare.com/s/e5d1b64fdd2e1dd36a2f>.

ADTC-InSAR are data sets containing the average daily tropospheric delays corresponding to the day of each year for 10 volcanoes in the Andes: Nevados del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualcahualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle and Chaitén. The database provides the average daily tropospheric delay for the total as well as its wet and dry components. For each of them, and for every month, one file is provided per volcano (36 files for each volcano). These files each include columns containing the average daily tropospheric delays for each day of the relevant month. In addition, the longitude and latitude files of the points for each volcano where the average daily tropospheric delays were measured are supplied.

Also, for the user to employ ADTC-InSAR as a tropospheric correction, the `Corr_ADTC_InSAR.m`

and `Corr_ADTC_InSAR.py` scripts, executable in MATLAB and PYTHON, respectively, are also provided.

Finally, a README file providing this detailed information is also included.

## Technical Validation

This section presents two approaches for assessing the usefulness of ADTC-InSAR as a database for tropospheric corrections in InSAR data: (1) climate-related behavior of tropospheric delay and its components, and (2) ADTC-InSAR application to interferograms.

### Climate-related behavior of daily tropospheric delay and its components

Examining the temporal dynamics of a daily tropospheric delay requires first identifying whether its components rise, decrease, or remain constant over the year. We also attempt to understand better why these changes occur and the connection between volcanic zones. Due to the cyclical nature of the process, the average daily tropospheric delay is shown on polar graphs (Figure 7a-c). Boxplots and histograms illustrate the seasonal variation of extreme values (Figure 7d-f). Second, the link between wet, dry, and total tropospheric delay is then shown using scatter plots (Figure 7g). In addition, the percentage contribution of the wet and dry component to the total are estimated (Table 3). This enables us to deduce which component of the daily tropospheric delay substantially impacts the total amount and whether differences are detected between volcanic zones.

According to what is observed in the Koppen-Geiger climate data (see Figure 6, and also Table 2 in Beck et al. [2018], NVZ has a substantial tropical climates presence in all the variables (Af, Am, and Aw). It is characterized by high temperatures ( $T^{\circ} > 18[^{\circ}\text{C}]$  in the coldest months) and copious precipitation ( $\geq 60$  [mm/month] in the driest months). All these characteristics indicate a high humidity level. Type Cfb, which lacks dry seasons but has hot summers ( $> 10[^{\circ}\text{C}]$ ), is the second most-prevalent type of temperate climate type. In the warmer months, Polar-tundra (ET) type temperatures range between  $0-10[^{\circ}\text{C}]$ . As shown in Figure 6, precipitations vary significantly

throughout the year. Compared to other volcanic zones (CVZ and SVZ), the temperature at the height of 2 meters is relatively high and stable. Roncancio et al. [2020] describe these zones as having a temperate, cool-to-cold, or extremely cold climate, with lowest and maximum daily temperatures, respectively, below 15 °C and 25 °C. The temperature behavior is significantly influenced by the orogenic characteristics of the Andes, humidity, and winds from the low plains, all of which influence the bimodal rainy regime [Roncancio et al., 2020].

CVZ climates correlate to arid zones characterized by desert and steppe climates (BWk and BSk), with monthly temperatures below 18[ °C]. The polar tundra climate (ET) is caused by the high elevation temperature of the Andes [Sarricolea et al., 2017], with temperatures ranging between -5 and 10[ °C] (Figure 6). In this geographical area, the so-called Altiplano winter depicted in Figure 6 is present, which is accompanied by summer rains. These are the result of local fluctuations in solar insolation and are closely linked to changes in large-scale circulation, such as variations in the supply of moisture east of the central Andes [Lenters & Cook, 1999].

According to Figure 6, the prevailing climate in the SVZ corresponds to a temperate climate, mostly due to the decrease in elevation of the Andes, the impact of the westerly winds, the high precipitation, and the oceanic conditions [Sarricolea et al., 2017]. It depicts a hot summer with a dry season or without a dry season at all (Csb or Cfb, respectively). Consequently, the average temperature throughout the warmest months is regularly over 10[ °C]. In contrast, the average temperature during the coldest months ranges from 0 (or even lower) to 18[ °C]. Figure 6 illustrates that precipitations vary significantly throughout the year, whereas seasonal temperatures range between -5° to 15°C. Having described and recognized that the predominant climates in NVZ, CVZ, and SVZ are tropical, desert, and temperate, respectively, it is conceivable to evaluate the ADTC-InSAR database obtained in the volcanoes of this study (see Figure 6).

When considering volcanic climatic zones, the behavior of daily tropospheric delay is better understood. Following are some distinguishing features of NVZ, CVZ, and SVZ. NVZ, for instance, has a tropical rainforest climate (Figure 6), which means a high humidity percentage. Consequently,



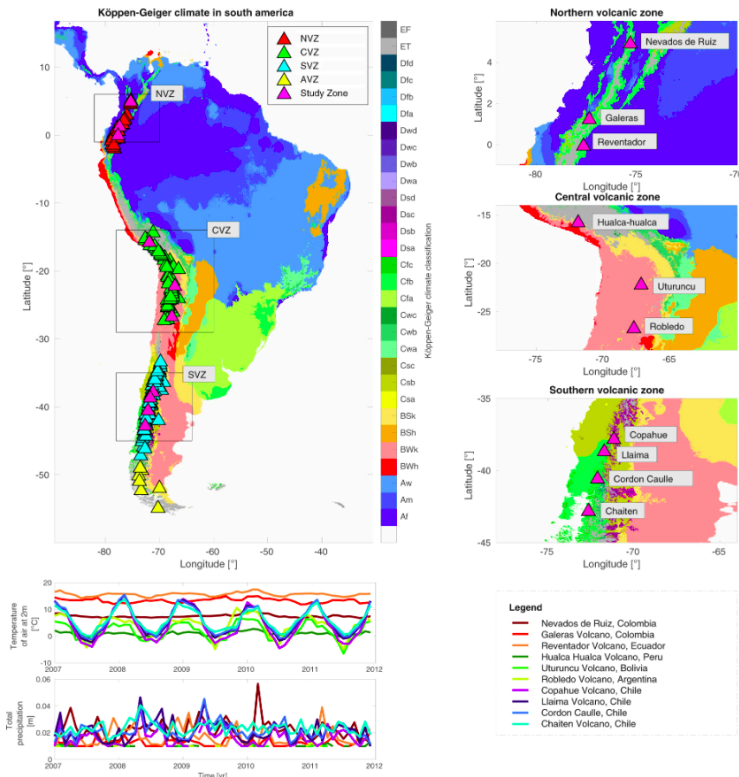


Figure 6: On the upper left of the figure are the Köppen-Geiger Climates [Beck et al., 2018], and the color bar on the right represents each Köppen-Geiger climate. The Andes Mountains volcanoes are divided into three zones: North Volcanic Zone (NVZ), the Central Volcanic Zone (CVZ), and Southern Volcanic Zone (SVZ). We extracted from this maps, the study areas shown on the right, which comprise the following volcanoes (magenta triangles): Nevados del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle, and Chaitén. The two graphs on the bottom left offer time series of precipitation and air temperature at 2 meters for each volcano, with the legend on the right. Note that each volcanic zone is distinguished by a distinct color range: the Northern Volcanic Zone is red, the Central Volcanic Zone is green, and the Southern Volcanic Zone is blue.

it is easy to see why the NVZ region has greater wet daily tropospheric delays than CVZ and SVZ regions (see Figure 7c). Due to the NVZ's location on the equator, this region exhibits distinct climatic behaviors: bimodality (two dry and two wet seasons) and unimodality (one dry and one wet season) [Urrea et al.2019]. Indeed, the region's central-south wet seasons begin in February-March (summer) and September-October (spring). The dry periods occur in June (winter) and December (summer). These dates coincide with periods (between spring and autumn) with increased tropospheric wet delay in the NVZ volcanoes (Figure 7f). Thus, it increases from a mean

value of  $18.07 \pm 1.64$ , and  $17.94 \pm 3.46$  [cm] in winter and summer (mainly dry periods) to  $19.21 \pm 1.79$  [cm], and  $20.15 \pm 1.74$  [cm] on average in spring and autumn (mainly wet seasons), respectively. On the other hand, the large dry tropospheric delay magnitudes (Figures 7b and 7e) had mean values of  $177 \pm 0.21$  [cm], which might be a result of high temperatures since the dry component is a function of atmospheric temperature and pressure [Bekaert et al., 2015a; 2015b].

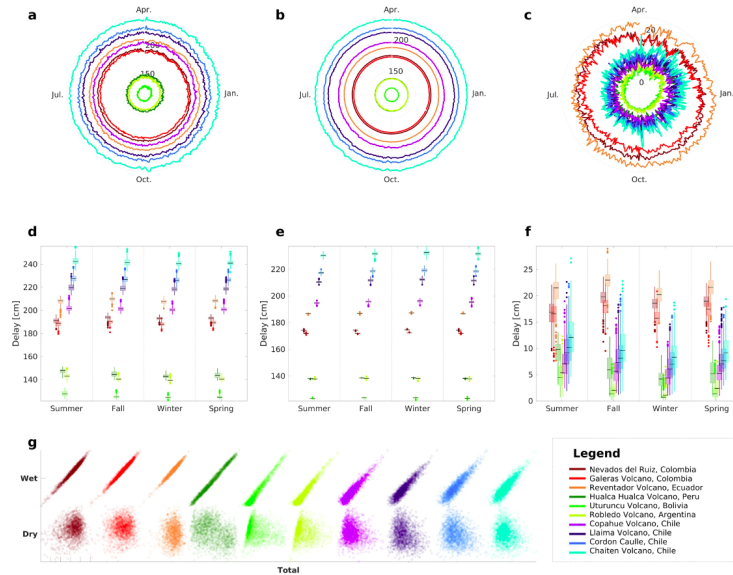


Figure 7: Comparison between total, dry and wet average daily tropospheric delay: (a-c) Polar plots illustrating the mean of average daily tropospheric delay of the (a) total, (b) dry, and (c) wet daily delay for each volcano, with the months progressing clockwise and the delays' magnitudes labeled on the radial axis. (d-f) The graphs depict boxplots of the (d) total, (e) dry, and (f) wet daily tropospheric delay for all volcanoes during each season of the year (summer, fall, winter, spring) corresponding to the southern hemisphere. (g) The figure depicts scatter plots between the daily total tropospheric delays and their wet (top) and dry (bottom) components for each volcano. Each volcanic zone is distinguished by a spectrum of different colors: Northern Volcanic Zone is a range of red colors (Brown: Nevados del Ruiz, Colombia; red: Galeras, orange: Reventador), Central Volcanic Zone is range of green colors (dark green: Hualca hualca, light green: Uturuncu, lemon green: Robledo), and Southern Volcanic Zone is a range of blue colors (lilac: Copahue, purple: Llaima, blue: Cordón Caulle, cyan: Chaitén).

The CVZ volcanoes, Uturuncu and Robledo, have an arid-cold-desert climate (Figure 6). Figure 6 depicts the polar-tundra climate of the Hualca-hualca volcano (also in CVZ), which implies low temperatures and low humidity. These climatic conditions may explain the lower magnitudes of the daily wet and dry tropospheric delays compared to other zones (see Figures 7b,c,e,f). Notably,

the wet daily tropospheric delay rises in the CVZ volcanoes from December to April (summer-autumn, see Figure 7c). In the spring-summer seasons, there is also an increase in the seasonal data distribution (Figure 7f). The latter may have something to do with the so-called Altiplanic winter. Changes in the intensity and duration of the Altiplano humid airflow’s intensity and duration [Garreaud et al., 2003] enhance precipitation during summer, between December and February [Torres-Batlló & Martí-Cardona, 2020].

The high dry daily tropospheric delay values in the SVZ are consistent with a temperate climate with warm summers. However, because temperatures in this zone are lower than in tropical zones such as NVZ, these delays are not as large. Likewise, precipitation is greater in NVZ, resulting in shorter wet daily tropospheric delays in SVZ.

Misra and Enge [2006] reported that the wet component accounts for just 10% of the total delay. The total contribution of the wet component in the NVZ is ten percent, as seen in Table 3. In contrast, this proportion falls to less than 5% in all other locations (CVZ and SVZ). The drop in the humid contribution results from the lower humidity and temperature variations in this area since the temperature at which a change in humidity is triggered can considerably impact the resulting delay [Hanssen & Feijt, 1997]. Thus, outstanding contributions to the total daily tropospheric delay are restricted to tropical climate zones. Regardless, the dry contribution is much more significant than the wet contribution. It controls the total daily delay magnitude.

<b>Volcanic zone</b>	<b>Volcano</b>	<b>Dry [%]</b>	<b>Wet [%]</b>
NVZ	Nevados Del Ruiz	90.3	9.7
	Galeras	91.0	9.0
	Reventador	89.6	10.4
CVZ	Hualca-hualca	96.0	4.0
	Uturuncu	98.8	1.2
	Robledo	98.4	1.6
SVZ	Copahue	97.3	2.7
	Llaima	96.7	3.3
	Cordón Caulle	96.4	3.6
	Chaitén	96.0	4.0

Table 3: Table displaying the percentage contribution of the dry (third column) and wet (fourth column) daily delays to the total daily lag of each volcano (second column) in the volcanic zones (first column) studied.

As demonstrated in Figure 7g, correlations between the wet-to-total daily tropospheric delay,

are more than 90% in all regions. Moreover, based on the positions of the extreme values (Figure 7a-c), the distributions of wet and total daily tropospheric delays are equivalent. It demonstrates that the total daily tropospheric delay variations may be conditioned by its humid contribution.

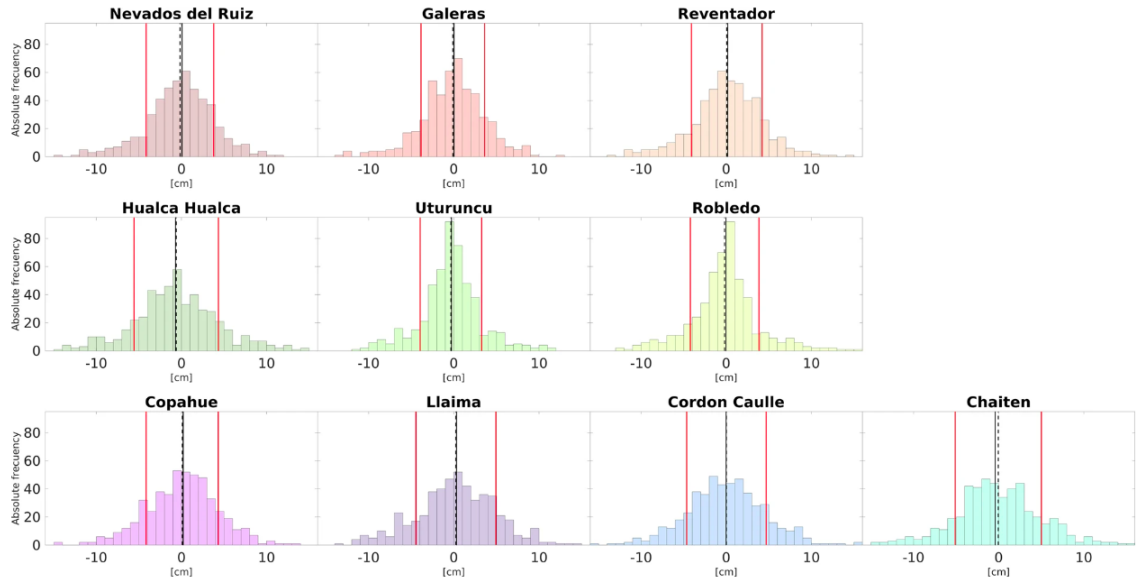


Figure 8: Histogram plots illustrate differences in tropospheric corrections between the “TRAIN specific-dates” and the ADTC-InSAR for the ten volcanoes in this study using 500 pairs of random dates. The histograms depicts three statistical parameters: the mean (solid black line), the median (segmented black line), and the standard deviation range (solid red line).

In conclusion, we determined that it is essential to establish the tropospheric correction depending on the position of a volcano in a specific climate condition. We also noted that despite the substantial difference between dry and wet contributions, the wet contribution dominates the correction with “specific-dates”: the dry contribution varies less with time, whereas the wet part varies considerably. The variability in relative humidity has a considerable impact on the wet component of the daily tropospheric delay. As a result, the wet contribution would be associated with the rainy seasons of these zones, such as the Altiplanic winter in CVZ and the wet seasons in NVZ. Consequently, a more thorough assessment of relative humidity derived from satellite missions or in-situ meteorological data may improve the local tropospheric correction for the InSAR data.

### **Application of ADTC-InSAR to Interferograms**

We assess the pertinence of ADTC-InSAR by statistically comparing its findings to “TRAIN specific-dates”. It was accomplished in two ways: first, by generating corrections for 500 randomly chosen date pairs at each volcano, and second, by applying the method to real interferograms.

	<b>Nevados Del Ruiz</b>	<b>Galeras</b>	<b>Reventador</b>	<b>Hualca-hualca</b>	<b>Uturuncu</b>	<b>Robledo</b>	<b>Copahue</b>	<b>Llaima</b>	<b>Cordón Caulle</b>	<b>Chaitén</b>
Median [cm]	0.07	0.01	0.17	-0.70	-0.28	-0.03	0.20	0.31	-0.02	-0.42
Mean [cm]	-0.17	-0.12	0.05	-0.62	-0.35	-0.20	0.09	0.24	0.01	-0.05
Standard deviation [cm]	3.97	3.74	4.16	4.96	3.61	4.03	4.23	4.70	4.67	5.06
$Q_1$ [cm]	-2.27	-2.30	-2.09	-3.54	-2.11	-2.07	-2.53	-2.61	-2.98	-3.14
$Q_3$ [cm]	2.34	2.22	2.66	2.21	1.55	1.59	2.71	3.45	2.85	2.89
Kurtosis	3.74	4.06	4.30	3.46	4.29	4.81	3.39	3.09	3.63	3.54
Skewness	-0.36	-0.32	-0.35	0.12	0.05	0.26	-0.14	-0.10	0.16	0.14

Table 4: The table presents different statistical indicators for each data set of the difference between applying tropospheric corrections with "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR in 500 pairs of different dates in each volcano (Figure 8). The statistics used are: the mean and median central tendency measurements, the standard deviation, the first and third quartiles ( $Q_1$  and  $Q_3$ : accumulation of 25% and 75% of the data, respectively), kurtosis and skewness.

The difference between “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR corrections for 500 random date pairings is calculated and illustrated using histograms (see Figure 8), while the statistics for these data distributions are included in Table 4.

According to the statistics, the mean and median had comparable values ranging from -0.62 to 0.24, and -0.70 to 0.31 [cm], respectively, indicating that over the 500 cases, the extremes do not appear to have a significant impact in the mean, which are mainly centered about 0 [cm]. The leptokurtic kurtosis ( $K > 3$ ) implies a larger accumulation of data near the mean and a rapid fall towards the extremes, whereas a skewness close to 0 suggests a symmetrical distribution. In addition, based on the values of quartiles (which contain 50% of the data), which vary from -2.41 to 2.50, and the standard deviation (red lines in Figure 8), most of the discrepancies between the two databases lie between relatively small values. Based on that, we can infer that ADTC-InSAR database is, therefore a viable choice for generating InSAR data corrections.

However, the ADTC-InSAR database as being an average over several years may tend to minimize extremes in atmospheric effects. Consequently, there may be greater or lesser differences between the two correction databases depending on the degree of day-to-day variation at a particular location for a particular day. For instance, in the case of the Altiplano winter in the ZVC, this correlates to pairings of dates that contain days that are in periods with greater precipitation.

As stated previously, a comparison of corrections applied to interferograms of representative volcanoes from the three climatic zones was performed. Figure 9 shows ALOS-PALSAR data of Nevados del Ruiz (NVZ), Robledo (CVZ) and Copahue (SVZ) volcanoes. These unwrapped interferograms show no deformations, consistent with previous research. In detail, no studies indicate deformation in Nevados del Ruiz between the interferogram dates (March 06, 2008, to March 12, 2010). InSAR and GPS stations have detected deformations at this volcano [Lundgren et al., 2015b; Hernández Serrato & Noboa Tobar, 2021], an increase in seismic activity [Ordoñez et al., 2015; Londoño & Kumagai, 2018], and the extrusion of a dome since 2015 [Londoño, 2016]. Even Reath et al. [2020] indicate that the volcano has behaved like an open system between approxi-

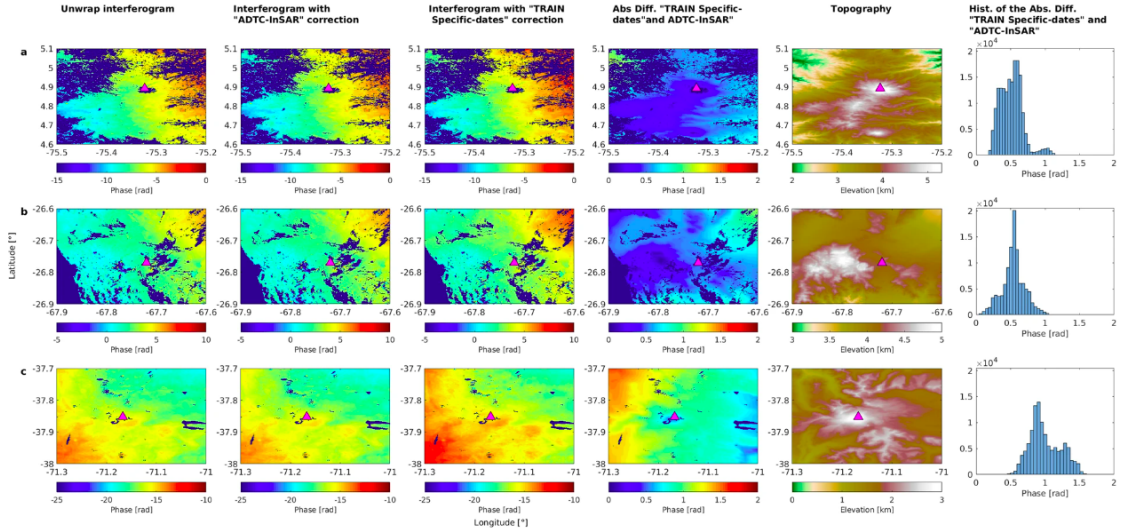


Figure 9: Application of tropospheric correction to a real interferogram at the (a) Nevados del Ruiz, (b) Robledo and (c) Copahue volcanoes: (first column) unwrapped interferograms, in Nevados Del Ruiz between 2008/03/06 and 2010/03/12 (path 447- frame 3520), in Robledo between 2010/03/18 and 2010/12/19 (path 101 - frame 6640), in Copahue between 2010/12/27 and 2011/02/11 (path 115 - frame 6410; see Table 2); (second column) unwrapped interferogram corrected with ADTC-InSAR; (third column) unwrapped interferogram corrected with "TRAIN specific-dates"; (fourth column) the absolute difference between the correction with ADTC-InSAR and with "TRAIN specific-dates"; (fifth column) the volcanoes topography in kilometers; and (sixth column) a histogram of the absolute difference shown on fourth column. The X-axis of each graphs represent longitude, the Y-axis represents latitude, and the color bars represent phase in radians.

mately 2005 and 2012, with no magma injection or ejection from the reservoir. Since 1992, small deformations have been reported at the Robledo volcano [Pritchard & Simons, 2004; Henderson & Pritchard, 2013; Brunori et al., 2013]. Even between 2005 and 2010, deformations of 0.87 [cm/yr] were reported [Brunori et al., 2013], which are not visible in the interferograms of Figure 9, because they do not cover the same period of time (March 18, 2010 and December 19, 2010) and their low magnitude. Lastly, deflations were detected in the Copahue volcano between 2002 to 2007 [Euilades et al., 2008; Fournier et al., 2010; Velez et al., 2011] and inflation has been observed since 2011 [Velez et al., 2016; Lundgren et al., 2017]. However, the interferogram does not span the time period between these two events as it only considers from December 27, 2010, to February 11, 2011.

The second purpose is also to examine the spatial disparities these two correction databases can cause on the interferograms. As a result, "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR tropospheric



corrections were applied to all interferograms (Table 2). The estimation of the difference between the two approaches can be observed in Figure 9, which displays the results for Nevados del Ruiz, Robledo and Copahue volcanoes. Observed in the first column are unwrapped interferograms. ADTC-InSAR and “TRAIN specific-dates’ corrected interferograms are shown in the second and third columns. The fourth column shows the difference between both corrections (in absolute values). In column 5 is the topography of the area. In the sixth column is the difference’s histogram (column 4).

<b>Difference between correction with "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR</b>			
	<b>Nevados Del Ruiz</b>	<b>Robledo</b>	<b>Copahue</b>
Median [rad]	0.50	0.54	0.94
Mean [rad]	0.50	0.53	1.00
Standard deviation [rad]	0.15	0.16	0.22
Kurtosis	3.34	2.82	2.39
Skewness	0.39	-0.47	0.43
<b>Comparison between correction with "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR</b>			
	<b>Nevados Del Ruiz</b>	<b>Robledo</b>	<b>Copahue</b>
$R^2$	0.9946	0.9862	0.9771
$nse$	0.92	0.78	0.40
$d$	0.83	0.73	0.57

Table 5: Statistical pertaining to corrections with "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR. The median, mean, standard deviation, kurtosis and skewness statistics are applied to the difference between applying the "TRAIN specific-dates" correction and ADTC-InSAR to real interferograms (fourth column of Figure 9), and at 500 cases of differences in corrections (Figure 8).  $R^2$ ,  $nse$  and  $d$  are utilized to compare "TRAIN specific-dates" and ADTC-InSAR corrections to real interferograms (second and third column of Figure 9).

Table 5 presents the statistics pertaining to the comparison of both corrections applied to the interferograms (second and third columns in Figure 9), followed by its difference (column 4 in Figure 9) and the statistics of the histogram of column 6 (in Figure 9). First, note that the spatial variability of the corrected interferograms (second and third column of Figure 9) are spatially very similar. This is evidenced by the spatial standard deviations of the fields that do not differ significantly. Thus, the standard variations of the second column (corrected with ADTC-InSAR) are 1.71, 9.03 and 1.21[rad], and for the third column (corrected with "TRAIN specific-dates") are 1.79, 8.82 and 1.32 [rad], for Nevados del Ruiz, Robledo, and Copahue, respectively. In the fourth column is the absolute spatial difference. In the case of Nevados del Ruiz and Robledo the difference between both corrections is centered at 0 [rad] (blue tones), while Copahue has mostly values closest to 1 [rad]

(from yellow to cyan). It can also be noted that specifically over the summits (Nevados del Ruiz:  $[-75.32^\circ, 4.89^\circ]$ ; Robledo:  $[-67.72^\circ, -26.77^\circ]$ ; Copahue:  $[-71.17^\circ, -37.85^\circ]$ ) is where the differences are the smallest. The latter is confirmed by the values of the histogram, which range from 0.19-to-1.18, 0.05-to-0.90, and 0.41-to-1.60 [rad] for Nevados del Ruiz, Robledo and Copahue, respectively, therein confirming the visual impression. Moreover, means and medians are comparable, with kurtosis varying between 2.39 and 3.34, confirming that extremes do not play a meaningful role. Instead, although skewness is low ( $< |0.5|$ ), the difference of corrections established over 500 cases (Fig. 8) shows that, in general, the corrections are symmetrical. Therefore, the asymmetry for these dates is only a particular case.

Lastly, spatial efficiency statistics between the two corrected fields (second and third columns of Figure 9) are computed (see Table 5). First, spatial correlation is very high ( $R^2 > 0.95$ ) for all the volcanoes. Two efficiency metrics, the *nse* and the modified *d*, were also determined. These vary depending on the analyzed volcanoes and indicate that the ADTC-InSAR correction is very convenient to use in the Nevados del Ruiz ( $nse=0.92$  and  $d=0.83$ ) and Robledo ( $nse=0.78$  and  $d=0.73$ ) for these dates. Instead, the efficacy for the Copahue volcano, for these dates, is lower, with  $nse=0.40$  and  $d=0.57$ . Despite the latter represents low efficiency values, they however imply that the corrections performed to the interferograms are in good agreement.

This approach allow concluding that both tropospheric correction procedures behave similarly with small differences on interferograms, most likely due to circumstances on the day the SAR measurements were taken, which are not discernible when using an average mesh, such as ADTC-InSAR.

## Usage Notes

ADTC-InSAR provides information on the total average daily tropospheric delay and its wet and dry components for each days of the year. It can be used to analyze tropospheric delay behavior and correct InSAR data for tropospheric effects. Nevertheless, it must be kept in mind that,

depending on the volcano and climatic zone, there are times of the year when the wet component of the average daily tropospheric delay tends to rise (see Figure 7a-b). Since these grids are average conditions, they may reduce the severity of unusual extreme precipitation circumstances, resulting in discrepancies with a correction based on “TRAIN specific-dates”.

The complete database weighs 49 GB, because ADTC-InSAR is a set of arrays within ASCII-files structures. As a result, the computational capabilities available must be considered. Each file [Abbr.]\_era5\_clim\_[month] contains the average daily tropospheric delays (in cm) for each volcano, where [Abbr.] indicates the volcano according to Table 2, and [month] corresponds to the month. Each of these ASCII files contains a matrix of  $N \times M$ , where each column contains the average daily tropospheric delays for the day of the month ( $M$  is the maximum number of days each month). It should be noted that each value  $n$  ( $< N$ ) of each column has the longitude and latitude position contained in the [Abbr.]\_ll files, respectively (ASCII-files containing 2-column arrays: longitude and latitude; these are found in the LONLAT\_ASCII folder).

Finally, we intend to indicate why this database benefits the scientific community.

Our approach was centered on extreme events requiring effectiveness. Interferogram correction is laborious, time-consuming, and consequently often unattainable in emergency situations. Downloading atmospheric data, processing them with software, and addressing other obstacles requires professional software management, which is not within usual staff capabilities, especially in a crisis. This easily accessible database saves time in generating a preliminary estimate of what is occurring prior to the release of actual datasets, which is crucial for good emergency response.

In addition, a comprehensive description of the mean variability of tropospheric corrections over some specific volcanoes is valuable regardless of the occurrence of an extreme event. Practically, this database may be used to estimate the optimal time of year to gather InSAR data based on the behavior of the tropospheric delay throughout the year. It can already serve as a comparative reference for reanalysis purposes. Thus, in the future, in addition to expanding the temporal range covered by the daily means, so that they may be used as a reference for certain decades, we will

expand the database geographically to cover not only additional volcanic zones, but also specific regions of interest for SAR research [Euillades et al., 2021].

We emphasize that, only a basic installation of Matlab or Python is required. This is convenient since it accommodates the user's preferences and demands without requiring much effort.

Finally, based on all the above, this data set can also be used as a practical resource for undergraduate and postgraduate courses in geoscience institutions.

### **Code availability**

ADTC-InSAR has been developed in MathWorks MATLAB version R2019a [The MathWorks Inc., 2019] using TRAIN MATLAB software. It is possible to generate tropospheric corrections for the previously mentioned volcanoes using the `Corr_ADTC_InSAR.m` and `Corr_ADTC_InSAR.py` scripts. These are freely available in <https://figshare.com/s/e5d1b64fdd2e1dd36a2f>.

# Capítulo 3. Aplicación de redes neuronales recurrentes en la generación de una corrección troposférica en ambientes volcánicos

## Resumen

En el ámbito de las mediciones de deformaciones superficiales utilizando datos InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), el impacto del retraso atmosférico constituye una importante problemática. El retardo de la señal es una consecuencia directa de las condiciones atmosféricas y la ubicación del punto de medición SAR (Synthetic Aperture Radar). A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversos métodos para abordar esta dificultad y en la actualidad, el aprendizaje automático está tomando gran fuerza en este campo de investigación.

En este estudio, presentamos un enfoque novedoso basado en el uso de redes neuronales recurrentes para generar una corrección troposférica precisa. Estas redes incorporan variables espacio-temporales y datos de retardo atmosférico diario promedio, lo que les permite estimar con precisión los valores de correcciones atmosféricas diarias. En particular, aplicamos este método a interferogramas generados sobre el volcán Llaima, obteniendo resultados que posicionan a nuestra propuesta como una corrección rápida y eficiente. Esto abre nuevas perspectivas para mejorar la precisión y la confiabilidad de los análisis de deformación en entornos volcánicos.

## Introducción

El Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés Interferometric Synthetic Aperture Radar) es un método altamente efectivo para medir los desplazamientos de la superficie terrestre [Osmanoğlu et al., 2016]. Este enfoque permite obtener información detallada de grandes áreas y lugares de difícil acceso. Su capacidad de operar con microondas permite obtener imágenes tanto de día como de noche, incluso en condiciones nubladas.

El avance tecnológico ha permitido, a lo largo del tiempo, la adquisición de una mayor cantidad de datos. Esto ha creado la necesidad de desarrollar métodos efectivos y preferiblemente automatizados para evaluar estos datos de manera eficiente. Aquí es donde entra en juego el aprendizaje automático. Este conjunto de algoritmos y modelos estadísticos permite a los sistemas informáticos realizar tareas específicas sin la necesidad de programación explícita [Mahesh, 2020].

Las técnicas basadas en el aprendizaje automático se han aplicado con éxito en diversos campos, que van desde el reconocimiento de patrones, la visión por computadora, la ingeniería espacial, las finanzas, el entretenimiento, la biología computacional, hasta aplicaciones biomédicas y médicas [El Naqa & Murphy, 2015]. En el contexto de InSAR, el aprendizaje automático se ha utilizado exitosamente para el reconocimiento de patrones [Anantrasirichai et al., 2018; Brengman & Barnhart, 2021; Naghibi et al., 2022] y para predecir el Retardo Troposférico en los datos de InSAR [Shamshiri et al., 2020; Zhao et al., 2021; Chen et al., 2022].

El retardo troposférico desempeña un papel crucial en las mediciones realizadas en áreas volcánicas. Este efecto puede ser tan significativo que un patrón identificado en un interferograma podría interpretarse erróneamente como deformación volcánica, cuando en realidad es causado por el efecto troposférico. Por ejemplo, un cambio del 20% en la humedad relativa puede dar lugar a diferencias en las correcciones troposféricas de 10 a 14 cm [Zebker et al., 1997]. Estas diferencias son importantes, especialmente considerando que las deformaciones volcánicas pueden variar en magnitud desde milímetros hasta centímetros por año [Fournier et al., 2010].

En este estudio, se promueve la utilización del aprendizaje automático al implementar un método de correcciones troposféricas que utiliza como entrada el retardo troposférico diario promedio, datos temporales y espaciales. Gracias a esto, se ha logrado desarrollar un método que permite generar correcciones rápidas y eficientes sin la necesidad de la descarga continua de datos atmosféricos con este propósito.

Aplicamos nuestro método a interferogramas generados en la región volcánica sur de la Cordillera de Los Andes, específicamente en el área que abarca los volcanes y complejos volcánicos de Copahue,

Lonquimay, Llaima, Villarrica, Quetrupillan y Lanin ( $37.85^{\circ}\text{S}$  -  $39.63^{\circ}\text{S}$ , Figura 10). Estos volcanes representan una amenaza para las áreas pobladas cercanas debido a su alta actividad volcánica. Por ejemplo, el volcán Villarrica tuvo su erupción más reciente en 2015 [Bertin et al., 2015; Johnson & Palma, 2015; Romero et al., 2018], mientras que el volcán Llaima mostró actividad entre 2007 y 2009 [Franco et al., 2019; Romero Moyano et al., 2014], al igual que el volcán Copahue entre 2012 y 2013 [Petrinovic et al., 2014; Caselli et al., 2016].

Además, la región presenta un clima generalmente templado, pero en las cimas de los volcanes se genera un clima de tipo tundra [Beck et al., 2018]. Estos climas están determinados por factores como la radiación solar, la circulación atmosférica, la orografía y la proximidad a cuerpos lacustres u océanos. En la Figura 10a se muestra la compleja topografía y la red hidrográfica de la zona de estudio, así como su cercanía al océano Pacífico.

## Zona de Estudio

La zona volcánica sur ha demostrado ser un lugar donde las condiciones atmosféricas y topográficas pueden generar un retraso importante en la señal SAR durante la adquisición de la imagen. El relieve, generado debido al vulcanismo cuaternario y a las altas tasas de erosión glaciaria [Stern, 2004], así como su cercanía al océano Pacífico, desde el cual se desprenden eventos oceánico-atmosféricos como el Anticiclón del Pacífico, la corriente de Humboldt y El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), ocasiona cambios en las temperaturas y precipitaciones [Montecinos & Aceituno, 2003; Cortez et al., 2021] que resultan en errores durante la adquisición SAR.

De esta manera, suponemos que diferentes interpretaciones a partir de datos InSAR pueden ser producto del efecto troposférico durante la adquisición de los datos. Por ejemplo, antes y durante el ciclo eruptivo 2007-2009 del volcán Llaima ( $[-71.730^{\circ}, -38.697^{\circ}]$ ), donde Fournier et al. [2010] indican que, entre 2007 y 2008, en el flanco este del volcán se generó una subsidencia relacionada con la erupción y colapso de enero de 2008, pero no una deformación del volcán producto de movimiento interno de magma. Bathke et al. [2011] señalan que, entre 2003 y 2007, ocurrió una deflación,

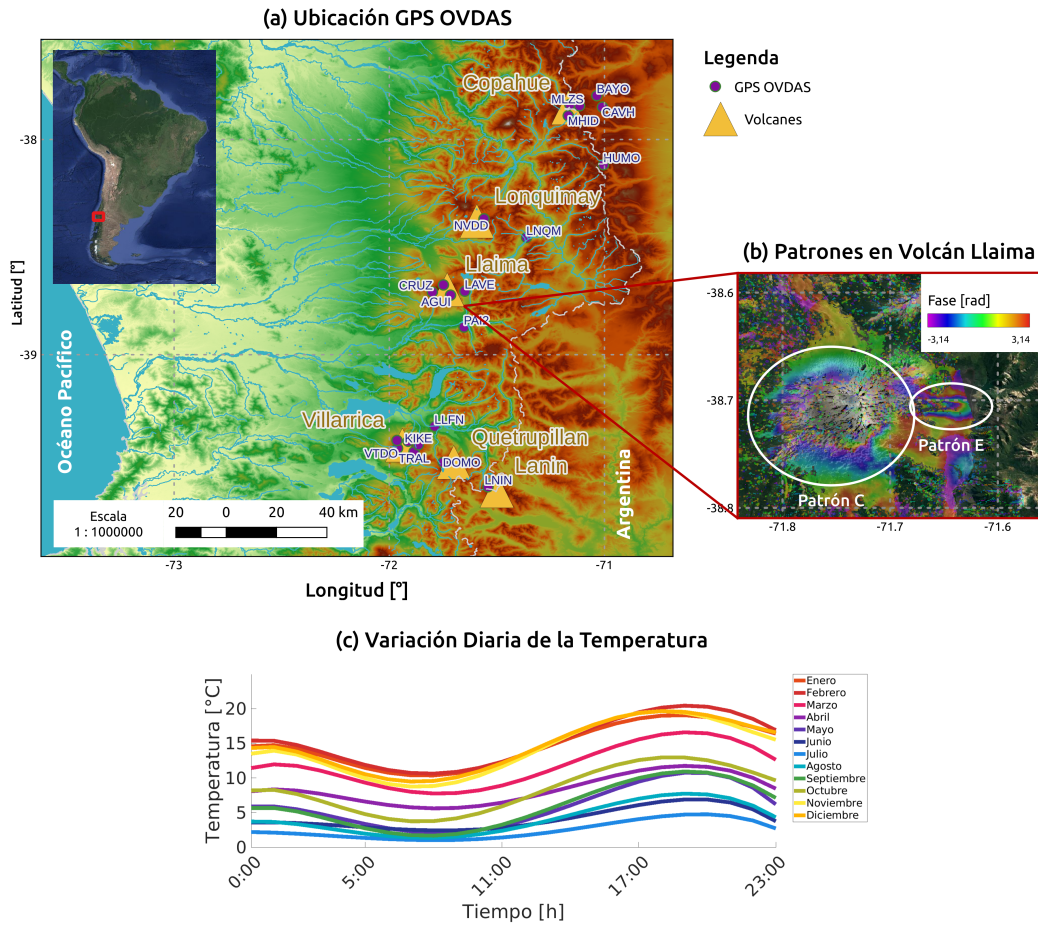


Figura 10: Descripción del área de estudio. (a) Ubicación de GPS del OVDAS utilizados para el entrenamiento de redes neuronales. (b) Patrones identificados en los interferogramas generados para el volcán Llaima entre 2003-2009. (c) Variación diaria de la temperatura a 2 metros [Muñoz Sabater et al., 2019] por cada mes del 2022.

seguida por una inflación hasta finales de 2008, de magnitudes de 10 y 8 [cm] respectivamente. Posteriormente, Remy et al. [2015] y Delgado et al. [2017] confirman el deslizamiento del flanco este del volcán, pero debido a la señal troposférica en la imagen SAR, no es posible confirmar una deformación producto de movimientos internos de magma.

Debido a la evidente influencia atmosférica en la interferometría SAR, se considera que el volcán Llaima es un sitio de estudio adecuado para la aplicación de correcciones troposféricas. Además, dado que se encuentra en una zona volcánica bastante activa, se dispone de una cobertura de red



GPS de monitoreo volcánico que permite aplicar el método propuesto en este estudio (Figura 10). En particular, en la Figura 10b se pueden observar dos posibles deformaciones relacionadas con los estudios mencionados anteriormente: los patrones C y E, que se encuentran en el centro del volcán y en su flanco Este. Estos serán útiles para evaluar posibles desplazamientos.

## Método

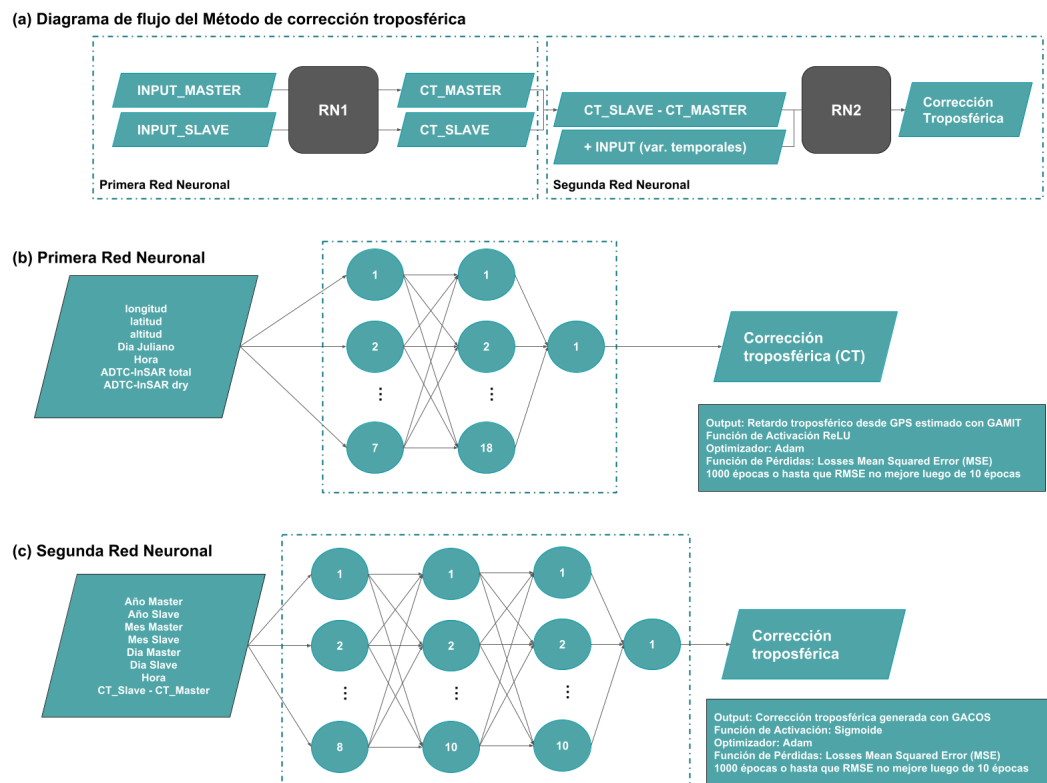


Figura 11: Método para generación de corrección troposférica por medio de redes neuronales. (a) Estructura general para obtener la corrección troposférica, donde los cuadrados negros representan las dos redes neuronales que se describe con mayor detalle en (b) y (c). En la primera (b) y segunda (c) red neuronal muestra las estructuras de dichas redes neuronales: INPUT, estructura de la cantidad de neuronas y capas, y qué representa el valor de salida de tales redes, además, de las características para entrenar la red, tales como función de activación, optimizador y función de pérdidas.

En la Figura 11 se presenta un esquema que ilustra el procedimiento del método propuesto. Se puede observar que consta de dos componentes principales: la generación del retardo troposférico

y la generación de la corrección troposférica final. Ambas etapas se basan en el uso de una red neuronal recurrente que permite la retroalimentación de información, donde los datos se propagan tanto hacia adelante como hacia atrás en la red, incluso interactuando una neurona consigo misma. En esta arquitectura, las neuronas pueden estar completamente o parcialmente conectadas [Medsker & Jain, 2001].

Este tipo de red recurrente se emplea principalmente para la predicción y clasificación de datos [Mahesh, 2020]. Se trata de un enfoque de aprendizaje supervisado que requiere pares de datos de entrenamiento. Los datos de entrada, denominados “INPUT”, se utilizan para generar una predicción, mientras que los datos de salida, denominados “OUTPUT”, representan los valores con base en los cuales la red se ajusta y corrige mediante el uso de un optimizador, con el objetivo de lograr la predicción más precisa posible.

En este caso, la generación del retardo troposférico se realiza mediante una primera red neuronal (Figura 11b), la cual utiliza como datos de salida (OUTPUT) los retardos troposféricos diarios obtenidos cada 2 horas a partir de mediciones GPS realizadas en las cercanías de los volcanes Copahue, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Quetrupillán (Figura 10a). Estos datos, recopilados entre 2017 y 2021, fueron proporcionados por el Observatorio Vulcanológico de los Andes del Sur (OVDAS) y procesados utilizando el software GAMIT-GLOBK (<http://geoweb.mit.edu/gg/>). De esta colección de datos, se seleccionaron aleatoriamente 15,000 registros para el entrenamiento de la red neuronal, variando el GPS y el tiempo de adquisición.

Dadas la ubicación de los GPS se seleccionaron sus correspondientes latitudes, longitudes y altitudes, y según tiempos en que se calcularon los retardos troposféricos se seleccionaron las variables temporales de día juliano y hora, obteniendo así los correspondientes INPUT para los OUTPUT escogidos aleatoriamente (Tabla 6). Estos conjuntos de datos INPUT y OUTPUT se combinan para entrenar la primera red neuronal y lograr la generación de un retardo troposférico diario ajustado al momento de la adquisición SAR.

Con la primera red neuronal entrenada, se calcula la diferencia entre los resultados de dos

INPUT					OUTPUT
Longitud [°]	Latitud [°]	Altura [m]	Día Juliano	Hora	Retardo troposférico desde GPS [cm]
-71.167	-37.889	2060.995	276	12	1862.2
-71.648	-38.704	1123.16	244	6	2095.8
-71.034	-37.795	1603.426	181	12	1945.4
-71.559	-38.368	1830.873	225	12	1894.6
-71.799	-38.708	1755.61	230	12	1922.7
-71.115	-37.843	2153.336	301	16	1823.1
-71.115	-37.843	2153.336	363	18	1892.6
-71.61	-38.384	225.034	327	8	1787.4
-71.748	-38.675	1992.279	58	14	1904.2
-71.034	-37.795	1603.426	85	22	2003.9

Tabla 6: Ejemplo de los datos utilizados para el entrenamiento de la primera red neuronal. Se especifican las variables INPUT que corresponden a longitud, latitud, altitud, día juliano y hora. Además, se incluyen las variables OUTPUT que consideran el retardo troposférico generado con datos GPS por GAMIT/GLOBK.

fechas distintas para generar una corrección intermedia que se utiliza como INPUT en la segunda red neuronal.

La generación de la corrección troposférica final se realiza mediante una segunda red neuronal (Figura 11c), en la cual se consideran como datos de salida (OUTPUT) los valores de las correcciones troposféricas obtenidas a partir de GACOS ("Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR" en inglés) [Yu et al., 2017; 2018a; 2018b] en el periodo comprendido entre 2014 y 2022. Los datos de GACOS corresponden a mapas de retraso troposférico mediante un modelo de descomposición troposférica iterativa (ITD; Iterative Tropospheric Decomposition) [Yu et al., 2017; 2018a, 2018b], que utiliza datos provenientes de un modelo meteorológico de alta resolución ECMWF, SRTM-DEM [Farr et al., 2007], y ASTER-GDEM [Tachikawa et al., 2011]. Para este propósito, se seleccionaron 20,000 datos puntuales que abarcan diferentes ubicaciones y momentos de adquisición.

Los datos de entrada (INPUT) en esta etapa consisten en la diferencia entre los retardos troposféricos diarios generados en la primera red neuronal (corrección intermedia). En este caso, se añaden las variables temporales de año, mes, día y hora de adquisición de las imágenes Primaria y Secundaria utilizadas en el proceso. Estos datos INPUT y OUTPUT provenientes de GACOS se combinan para entrenar la segunda red neuronal y lograr la generación precisa de la corrección troposférica final (Tabla 7).

INPUT						OUTPUT		
Imagen Primaria			Imagen Secundaria			Hora de adquisición	Corrección intermedia	Corrección GACOS
Año	Mes	Día	Año	Mes	Día			
2014	2	7	2014	2	9	21.183	8.536	-9.57E+00
2014	10	18	2022	10	21	13.767	-1.11E+01	2.49E-01
2017	5	16	2020	5	19	13.317	-3.13E+00	1.25E+01
2016	3	28	2022	3	2	1.817	-2.12E+01	-2.61E+00
2017	5	16	2020	5	19	13.317	-7.30E+00	1.44E+01
2016	4	13	2017	4	7	17.95	-5.07E-01	-6.23E+00
2014	8	22	2016	8	14	6.883	-3.92E+00	8.11E+00
2014	10	18	2022	10	21	13.766	-1.12E+01	1.11E+00
2017	5	16	2020	5	19	13.316	-8.05E+00	1.37E+01
2016	3	28	2022	3	20	1.816	-1.63E+01	-2.66E+00

Tabla 7: Ejemplo de los datos utilizados para el entrenamiento de la segunda red neuronal. Se especifican las variables INPUT, que corresponden al año, mes, día y hora de la adquisición de las imágenes SAR Primaria y Secundaria, así como la corrección intermedia proveniente de la primera red neuronal. También se incluyen las variables OUTPUT, que consideran el retardo troposférico generado a partir de los datos de GACOS.

Para ambas redes neuronales, la selección de los datos de entrada (INPUT) se realiza de acuerdo con la correspondencia de posición geográfica y tiempo (fecha y hora) con los datos de salida (OUTPUT) que representan las características de adquisición de las imágenes SAR Primarias y Secundarias. Es importante destacar que este método se enfoca en generar pronósticos puntuales, lo cual implica ingresar los datos correspondientes a cada punto específico del interferograma que se va a corregir. De esta manera, se garantiza que el proceso de corrección se ajuste de manera precisa a las características y necesidades de cada punto individual dentro del interferograma.

Las redes neuronales fueron entrenadas utilizando la función de activación ReLU [Nair & Hinton, 2010] y la función de activación Sigmoide [Iliev et al., 2017], respectivamente. Además, se empleó la función de pérdidas de Error Cuadrático Medio (Mean Squared Error, MSE) y el optimizador Adam [Kingma & Ba, 2017]. Durante el entrenamiento, se realizaron actualizaciones de parámetros durante 1000 épocas o hasta que el MSE dejará de mejorar después de 10 épocas consecutivas. Esta configuración garantiza un proceso de aprendizaje eficiente y una convergencia óptima de las redes neuronales.

En el caso específico del volcán Llaima, los interferogramas fueron realizados basándose en datos ALOS PALSAR (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>) [JAXA/METI, 2007] y Envisat (<https://earth.esa.int/eogateway/instruments/asar>) [European Space Agency,

2002]. Estos se crearon mediante el uso de GMTSAR [Sandwell et al., 2011a; 2011b] (<https://topex.ucsd.edu/gmtsar/>) y haciendo uso del modelo de elevación digital STRM3 [NASA, 2013].

En estos interferogramas, se han identificado patrones que podrían indicar deformaciones superficiales (Figura 10b). Se realizaron mediciones tanto antes de la corrección como después de la corrección, para comparar las correcciones generadas con el método propuesto y las correcciones generadas con GACOS. Además, se estimaron las correlaciones espaciales entre las correcciones propuestas y las correcciones obtenidas con GACOS. La correlación espacial indica similitud entre los patrones de corrección generados por ambos métodos y se define matemáticamente por:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right)}} \quad (15)$$

Donde:

- $r$  es el coeficiente de correlación espacial.
- $A_{mn}$  y  $B_{mn}$  son los valores de corrección para cada punto de la matriz generada por el método propuesto y GACOS, respectivamente.
- $\bar{A}$  y  $\bar{B}$  son las medias de las correcciones generadas por el método propuesto y GACOS, respectivamente.
- $m$  y  $n$  son el número total de puntos considerados en el interferograma para los métodos propuesto y GACOS, respectivamente.

Esta ecuación permite determinar el grado de similitud entre las correcciones generadas por ambos métodos. Un valor de  $r$  cercano a 1 indica una alta correlación positiva, lo que significa que las correcciones propuestas se asemejan a las correcciones de GACOS, mientras que un valor cercano a -1 indica una alta correlación negativa. Un valor cercano a 0 sugiere que no hay correlación entre las correcciones de ambos métodos.

El objetivo de este análisis es validar la precisión y efectividad del método propuesto en comparación con GACOS, que es un método ampliamente utilizado en la corrección troposférica en interferometría SAR. La comparación entre ambos métodos proporciona una base para evaluar la fiabilidad del nuevo método y determinar su aplicabilidad en estudios geofísicos, en particular en la monitorización de volcanes y otros fenómenos geológicos que requieren una corrección troposférica precisa.

Para evaluar la efectividad de las distintas correcciones generadas aplicadas a los interferogramas, se han utilizado diferentes estadísticos, tales como la media ( $\mu$ , Ec. 16), la desviación estándar ( $\sigma$ , Ec. 17), la curtosis ( $k$ , Ec. 18) y la asimetría ( $s$ , Ec. 19). Los primeros tres permiten comprender dónde se concentran los datos y los últimos muestran cómo se distribuyen.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |x_i - \mu|^2} \quad (17)$$

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (18)$$

$$s = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (19)$$

Donde,  $x_i$  es la  $i$ -ésima observación,  $\mu$  es la media,  $\sigma$  es la desviación estándar,  $n$  es el número de observaciones y  $E(x)$  representa el valor esperado de la cantidad  $x$ . La mediana corresponde al valor donde se encuentra el 50% de los datos cuando se ordenan por magnitud. De esta manera, podemos comparar estadísticamente los 3 conjuntos de datos obtenidos para cada interferograma.

Por otro lado, para evaluar el ajuste de la corrección, se puede considerar que los interferogramas corregidos con GACOS son los valores de referencia y los interferogramas corregidos con las correcciones intermedias ML1 y finales ML2 son los modelados. Teniendo estos, es posible aplicar estadísticos para identificar si la corrección intermedia o final genera interferogramas corregidos

mejor ajustados a los de referencia, lo que permite evaluar la mejora entre ambas correcciones. En este caso, se propone aplicar el coeficiente de correlación al cuadrado ("R al cuadrado",  $R^2$ , Ec. 20) que proporciona información sobre cuán bien el modelo se aproxima a los datos de referencia, siendo  $R^2 = 1$  el valor que indica un ajuste perfecto. El coeficiente de Nash-Sutcliffe [Nash y Sutcliffe, 1970] ( $nse$ , Ec. 21) varía entre el infinito negativo y 1; cuando  $nse = 1$ , los conjuntos de datos coinciden perfectamente. Y por último, el coeficiente modificado de Willmott [Willmott, 1981] ( $d$ , Ec. 22) varía entre 0 y 1; cuando  $d = 1$ , los datos tienen un ajuste perfecto, y si  $d = 0$ , no hay acuerdo.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right]^2 \quad (20)$$

$$nse = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (21)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)} \quad (22)$$

Donde,  $X_i$  y  $Y_i$  son las  $i$ -ésimas observaciones de los conjuntos de datos  $X$  e  $Y$ ,  $\bar{X}$  y  $\bar{Y}$  son las medias de los conjuntos de datos  $X$  e  $Y$ , y  $n$  es el número de observaciones.

## Resultados

El método propuesto se utiliza para generar correcciones troposféricas y se ha aplicado a interferogramas alrededor del volcán Llaima durante el período comprendido entre 2003 y 2009. Con el fin de mostrar de manera general el efecto del método propuesto, se presentan las correcciones intermedias y finales estimadas empleando este método. La corrección intermedia se genera con los resultados de los retardos troposféricos obtenidos en la primera red neuronal (ML1), mientras que la corrección final se genera al aplicar la segunda red neuronal (ML2).

El entrenamiento de la red muestra una evolución del MSE, como se muestra en la Figura 12,

considerando que se podía generar hasta 1000 épocas o hasta que durante 10 épocas consecutivas el MSE no disminuyera.

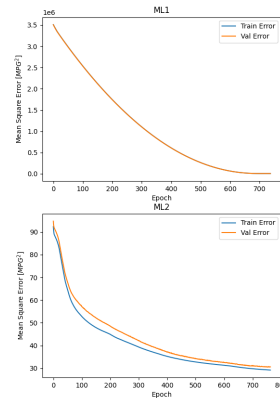


Figura 12: Evolución del MSE a través de las épocas empleadas para el entrenamiento de la primera (gráfico superior) y segunda (gráfico inferior) red neuronal.

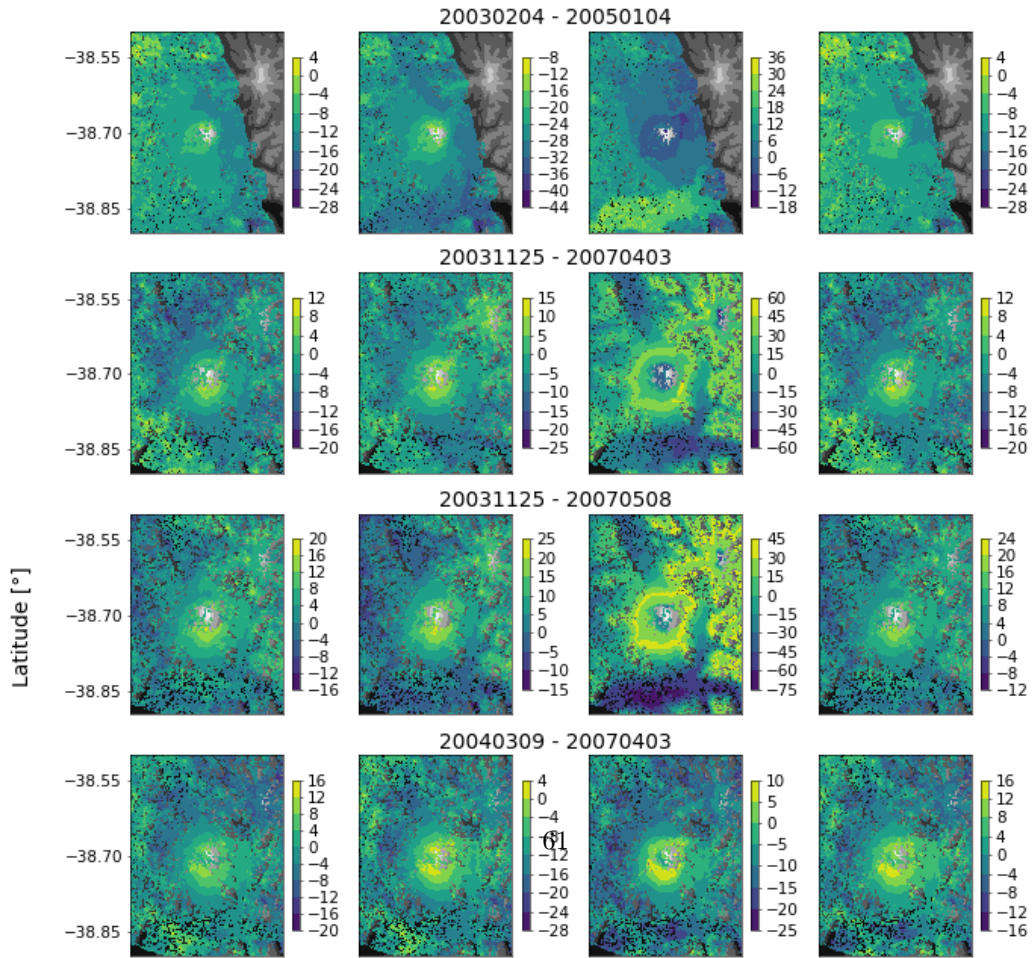
En la Tabla 8, se muestra la correlación espacial entre la corrección intermedia y final obtenida mediante el método propuesto, y la corrección generada utilizando GACOS. Una correlación cercana a 1 indica una relación directa entre las variables, mientras que un valor cercano a -1 indica una relación inversa.

En la Tabla 8 se presentan mediciones realizadas en relación con los patrones de deformación identificados en los interferogramas (consultar Figura 10b). Se incluyen mediciones tanto en los interferogramas sin corregir, como en aquellos corregidos utilizando GACOS, así como las correcciones intermedias y finales generadas mediante el método propuesto. Además, en las Figuras 13-15 se visualizan las diferencias y similitudes resultantes al aplicar las diferentes correcciones en los interferogramas.



Adquisición SAR		Correlación con GACOS		Deformación en patrón C				Deformación en patrón E			
Imagen Primaria	Imagen Secundaria	ML1	ML2	Interf. original	Corrección aplicada			Interf. original	Corrección aplicada		
					GACOS	ML1	ML2		GACOS	ML1	ML2
20030204	20050104	-0.85	0.84	1.78	3.91	-7.12	2.12	0.15	0.81	-4.45	0.37
20031125	20070403	-0.57	-0.28	4.27	5.92	16.42	4.41	0.71	1.51	21.35	0.80
20031125	20070508	-0.47	0.05	4.33	6.36	34.85	4.45	2.11	2.70	24.02	1.77
20040309	20070403	0.18	0.18	4.15	5.02	8.22	4.20	1.05	1.47	0.23	1.04
20040309	20070508	0.86	0.87	4.28	5.52	24.79	4.62	2.33	2.53	2.90	2.33
20061205	20080304	0.77	-0.65	-2.62	-3.25	4.39	-3.32	2.17	1.91	21.23	1.26
20061205	20080408	0.76	-0.65	-1.95	-3.51	3.15	-2.85	0.39	-0.25	20.87	-1.47
20070306	20080122	0.85	0.85	1.47	3.16	11.23	2.66	5.48	5.86	5.50	5.38
20070306	20090311	-0.77	0.76	-3.72	-4.54	2.91	-4.73	4.76	4.68	5.53	4.75
20070403	20081118	-0.13	-0.11	-4.33	-5.21	-37.50	-6.77	2.23	1.70	-16.99	0.90
20070404	20090222	-0.80	0.43	-5.53	-10.08	1.68	-4.80	0.11	-1.41	-1.60	-0.77
20070424	20080304	-0.19	-0.15	-3.19	-3.17	-10.46	-3.38	1.53	1.60	0.14	1.49
20070508	20080108	0.31	0.29	-4.81	-7.75	-25.59	-6.19	-1.25	-2.04	-2.89	-1.40
20071016	20080304	-0.13	-0.03	-0.61	0.39	-1.87	-0.64	3.29	3.87	19.05	3.65

Tabla 8: Resultados de las correcciones troposféricas generadas con el método propuesto, tanto en su etapa intermedia (solo con la primera red; ML1) como en su etapa final (aplicada ambas redes; ML2). Se presentan las fechas de las adquisiciones SAR de las imágenes Primaria y Secundaria (columna 1-2). Correspondientemente, se muestra la correlación entre las correcciones espaciales intermedias y finales respecto a la corrección con GACOS (columnas 3-4). La medición de la deformación medida en patrones C y E identificados (Figura 10b) entre los interferogramas originales (columnas 5,9), interferogramas corregidos con GACOS (columnas 6,10), corrección intermedia (columnas 7,11) y corrección final (columnas 8,12).



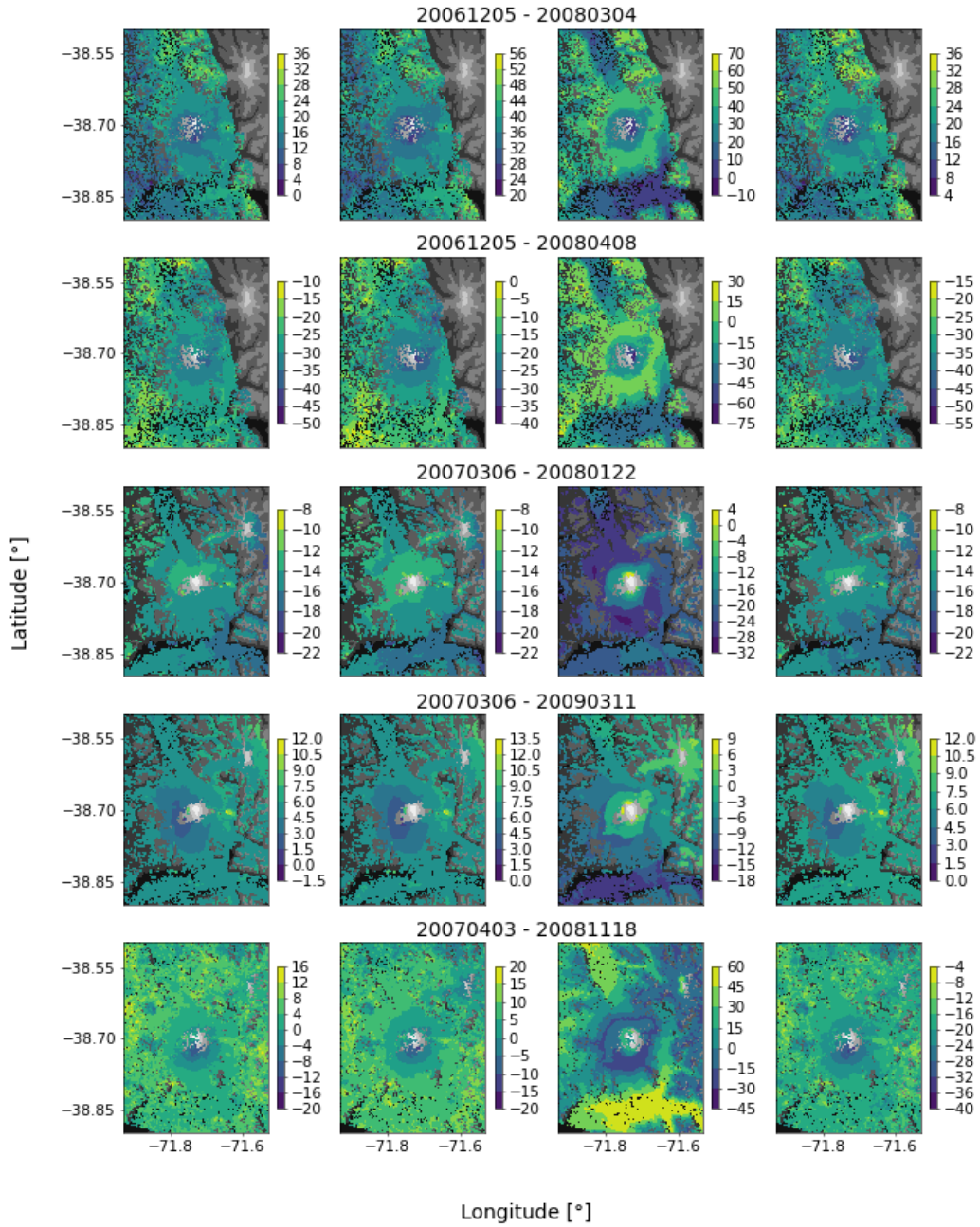


Figura 14: Continuación Figura 13

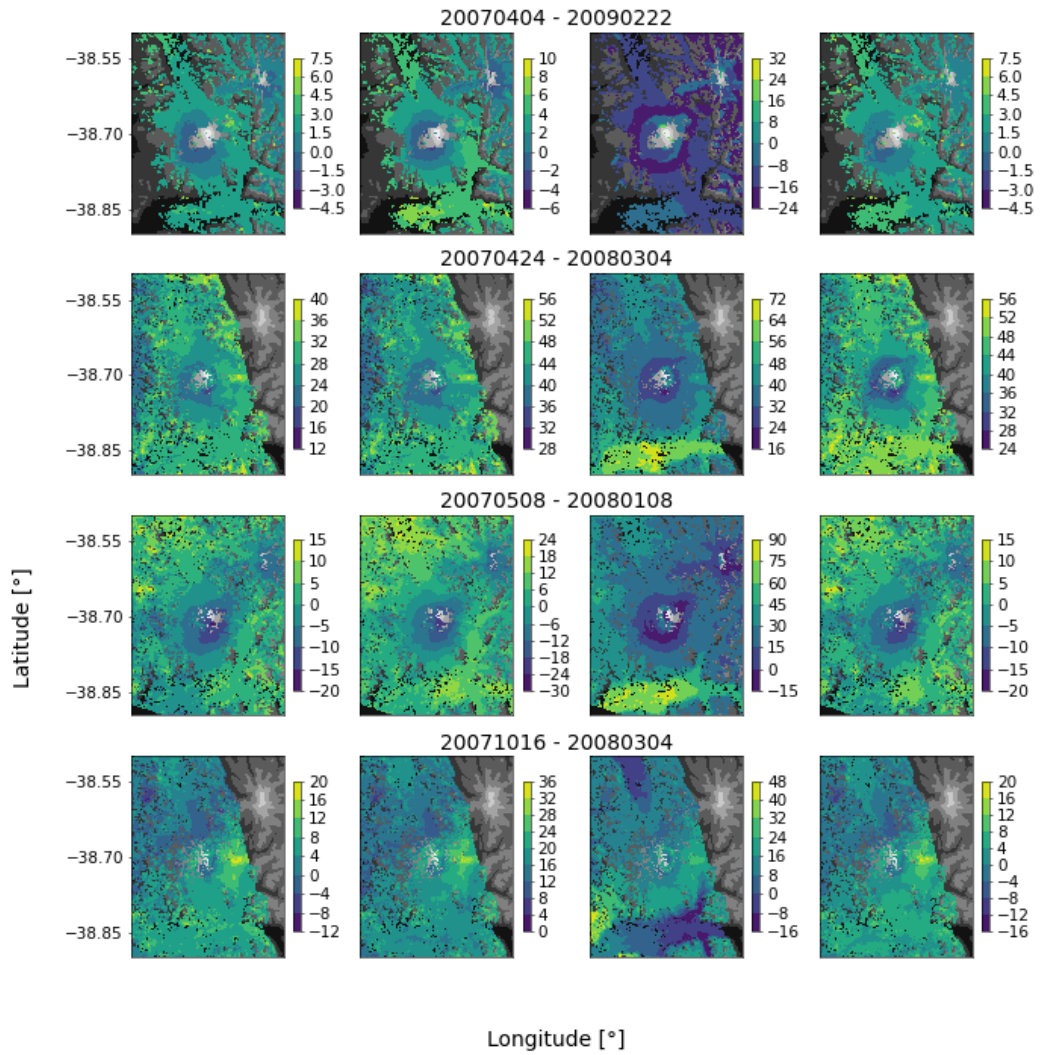


Figura 15: Continuación Figura 14

Las Tablas 9 y 10 muestran las estadísticas que comparan las correcciones generadas para los interferogramas del volcán Llaima. En la Tabla 9 se presentan las medianas, medias y desviaciones estándar de los valores de los puntos de los interferogramas corregidos con las correcciones intermedias ML1 y finales ML2 de nuestro método, así como con GACOS. Se observan diferencias más significativas entre la media y la mediana en la corrección intermedia (ML1), mientras que los resultados son más similares entre la corrección final (ML2) y la realizada con GACOS. La corrección intermedia ML1 genera valores absolutos mayores que la corrección final ML2 y GACOS. Además, la curtosis y la simetría (Tabla 9) indican una distribución de datos más similar entre la corrección final ML2 y GACOS. Esto también se refleja en la figura 16, donde la distribución de datos se ha centrado en cero (0) para facilitar la comparación. Se observa claramente que al aplicar la corrección ML2 (azul) y GACOS (verde) a los interferogramas del volcán Llaima, se obtienen distribuciones de valores del interferograma corregido más similares.

La Tabla 10 muestra resultados de los interferogramas corregidos con la corrección intermedia ML1 y la final ML2 en relación con aquellos corregidos con GACOS. A través de  $R^2$ , se obtienen valores superiores a 0.5 con la corrección final ML2 y  $R^2 < 0.5$  para los interferogramas corregidos con ML1. Los mejores valores de NSE también se encuentran con la corrección final ML2, mostrando en varios casos  $NSE > 0$ , mientras que la corrección intermedia ML1 muestra  $NSE < 0$ . Por último, los valores de  $d$  son mayores al corregir los interferogramas con la corrección ML2, mientras que en la mayoría de los casos con ML1,  $d$  es menor a 0.3.

## Discusión

Luego de la aplicación de la corrección troposférica propuesta, que emplea dos etapas de procesamiento a través de redes neuronales para obtener una corrección más precisa y refinada, ha sido posible generar una evaluación de la comparación entre las correcciones intermedias ML1 y la final ML2 con respecto a la corrección GACOS.

Por un lado, la corrección intermedia ML1 muestra, en varios casos, una correlación espacial

Fechas Interferogramas		Mediana			Media			Desviación Estándar			Curtosis			Simetría		
		phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - GACOS	phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - GACOS	phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - GACOS	phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - GACOS	phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - GACOS
<b>Imagen Primaria</b>	<b>Imagen Secundaria</b>															
20030204	20050104	-27.49	-12.65	4.91	-28.70	-12.51	4.94	8.08	2.68	3.22	3.42	4.71	3.63	-0.58	0.31	0.09
20031125	20070403	-22.52	-5.07	-4.97	-19.26	-5.01	-4.95	19.28	3.80	4.44	2.52	3.13	2.91	0.50	0.20	0.25
20031125	20070508	1.10	-0.76	0.94	6.55	-1.10	0.87	22.66	4.16	3.45	2.91	3.00	3.47	0.84	-0.12	-0.24
20040309	20070403	4.52	-4.60	7.63	4.34	-4.77	6.96	5.27	4.88	5.12	3.44	3.24	2.75	0.00	0.19	-0.35
20040309	20070508	25.00	1.15	7.12	24.57	0.81	6.83	9.15	5.59	5.28	3.97	2.61	3.09	0.42	-0.26	-0.48
20061205	20080304	0.66	13.85	-2.27	3.61	14.41	-2.46	15.44	4.06	3.70	2.67	3.27	3.88	0.70	0.11	0.00
20061205	20080408	-47.95	-22.17	-39.18	-44.68	-21.40	-38.60	16.84	4.19	3.48	2.13	3.28	4.34	0.54	0.49	0.78
20070306	20080122	-6.99	-14.84	-15.28	-7.84	-14.78	-15.33	4.53	1.02	0.94	2.55	3.62	4.16	-0.40	-0.03	-0.06
20070306	20090311	16.30	3.80	3.48	15.88	3.69	3.49	4.09	0.89	0.82	2.83	5.42	5.31	-0.18	-0.50	0.16
20070403	20081118	0.21	24.34	0.27	-3.84	24.22	0.23	21.58	2.92	3.35	2.23	5.22	3.52	-0.53	-0.47	-0.06
20070404	20090222	18.38	1.43	0.39	16.49	1.09	0.30	5.36	1.18	0.99	4.50	3.62	4.64	-1.08	-0.78	0.45
20070424	20080304	16.28	11.65	12.28	13.94	11.80	12.01	7.59	3.25	2.90	3.99	4.61	3.86	-1.25	0.16	-0.11
20070508	20080108	-24.18	-2.33	-5.27	-29.08	-2.36	-5.22	16.01	4.32	3.65	5.15	2.70	4.33	-1.56	-0.12	0.55
20071016	20080304	-4.30	6.17	-8.70	-1.79	5.55	-9.13	11.12	3.80	4.49	2.75	2.92	2.36	0.54	-0.16	-0.20

Tabla 9: La tabla muestra la mediana (columnas 3-5), media (columnas 6-8), desviación estándar (columnas 9-11), curtosis (columnas 12-14) y simetría (columnas 15-17) para cada interferograma generado sobre el volcán Llaima (columnas 1 y 2). Cada estadística se calcula sobre los valores de los interferogramas corregidos con la corrección intermedia ML (phuw - ML1) y final ML2 (phuw - ML2), así como con GACOS (phuw - GACOS).

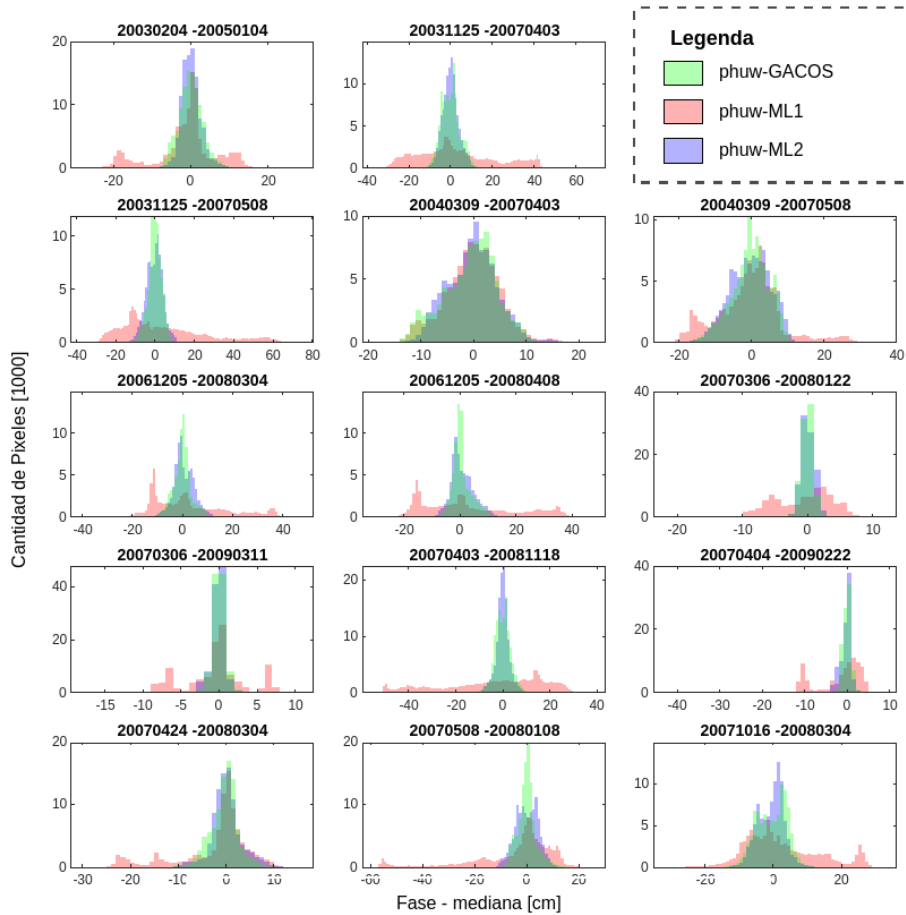


Figura 16: Los gráficos muestran la distribución de los valores de los píxeles del interferograma al restarles la mediana, considerando los interferogramas corregidos con la corrección intermedia ML1 (Rojo) y la corrección final ML2, y la corrección troposférica generada con GACOS (Azul).

negativa respecto a la corrección con GACOS, la cual mejora al estimar la corrección final ML2 (ver Tabla 8). Mientras que, por otro lado, la Tabla 9 muestra que la media y mediana de los interferogramas con las correcciones intermedias ML1 y final ML2 se alejan de los interferogramas con la corrección GACOS, pero la desviación estándar de los interferogramas corregidos con ML2 es bastante cercana a los resultados con GACOS.

De igual manera, al aplicar las correcciones troposféricas a los interferogramas, la estimación de posibles desplazamientos en los patrones C y E (Figura 10b) con la corrección intermedia ML1 muestra una diferencia de alrededor de 10 cm respecto a los interferogramas corregidos con GACOS.

Fechas Interferogramas		$R^2$		nse		d	
Primaria image	Secondary image	phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - ML1	phuw - ML2	phuw - ML1	phuw - ML2
20030204	20050104	0.05	0.48	-116.47	-28.90	0.07	0.12
20031125	20070403	0.22	0.69	-25.22	0.69	0.19	0.70
20031125	20070508	0.02	0.71	-44.23	0.25	0.12	0.61
20040309	20070403	0.80	0.88	0.52	-4.38	0.66	0.26
20040309	20070508	0.01	0.81	-13.89	-0.51	0.19	0.44
20061205	20080304	0.08	0.81	-17.68	-19.97	0.19	0.14
20061205	20080408	0.01	0.67	-25.60	-23.85	0.13	0.13
20070306	20080122	0.20	0.78	-82.70	0.39	0.10	0.61
20070306	20090311	0.02	0.92	-254.29	0.84	0.05	0.80
20070403	20081118	0.08	0.75	-39.33	-50.69	0.15	0.10
20070404	20090222	0.07	0.09	-294.06	-1.32	0.05	0.38
20070424	20080304	0.03	0.38	-6.38	0.13	0.25	0.55
20070508	20080108	0.28	0.51	-57.26	-0.32	0.10	0.49
20071016	20080304	0.41	0.92	-5.64	-9.77	0.37	0.21

Tabla 10: La tabla muestra los valores de  $R^2$  (columnas 3-4), coeficientes  $NSE$  (columnas 5-6) y  $d$  (columnas 7-8) al considerar los interferogramas (columnas 1-2) corregidos con GACOS como los valores de referencia. Los valores modelados corresponden a los interferogramas corregidos con la corrección intermedia (phuw - ML1) y final (phuw - ML2), y los valores de referencia corresponden a los interferogramas corregidos con GACOS.

Esta diferencia disminuye a  $\sim 1$  cm cuando se realiza la corrección con la corrección final ML2 (Tabla 8). Estos resultados son favorables a pesar de que durante el entrenamiento el valor del MSE no llegó a su mínimo (Figura 12).

En cuanto a la distribución de los datos de cada interferograma, la curtosis y el coeficiente de simetría en la Tabla 9 muestran que la distribución de los interferogramas corregidos con ML2 y GACOS es similar y bastante diferente a los interferogramas corregidos con ML1. Por lo tanto, al utilizar ML2, se obtienen resultados similares a los obtenidos mediante GACOS. Recordando que cuando  $R^2 = 1$ ,  $NSE = 1$  y  $d = 1$ , un modelo está perfectamente ajustado. La Tabla 10 muestra cómo ha mejorado notablemente el ajuste del modelo entre la corrección intermedia ML1 y la final ML2, adaptándose de mejor manera a la corrección generada en los interferogramas con la corrección que hemos considerado como referencia, GACOS. Incluso los resultados también se pueden observar claramente en los interferogramas. En las columnas 2 y 4 de las Figuras 13-15, se aprecia una gran similitud entre los interferogramas corregidos troposféricamente con GACOS y con la corrección final ML2 del método propuesto. Diferenciándose significativamente de la columna 3,

donde se muestra la corrección generada con los datos obtenidos a partir de la corrección intermedia ML1 del método. Particularmente, los interferogramas con la corrección intermedia ML1 muestran cambios de magnitudes más grandes en las laderas del volcán Llama y en el valle al sur del volcán; aquí se ejemplifica la importancia de la topografía en la estimación del retardo, que es corregido mediante la segunda red neuronal.

Lo anterior muestra que la inclusión de variables espaciales como altura, longitud y latitud resulta importante, ya que posiciona geográficamente la medición del retardo troposférico. La topografía puede afectar la precipitación [Falvey & Garreaud, 2007], puesto que esta puede ser influenciada por la topografía y la dirección del viento predominante [Basist et al., 1994]. La complejidad de la topografía y la ubicación geográfica generan cambios en el clima local, como la intensidad de las precipitaciones [Sarricolea et al., 2019].

Las variables temporales consideran las variaciones de las condiciones atmosféricas a lo largo del tiempo en diferentes escalas. Por ejemplo, la hora del día refleja las variaciones diarias, como las fluctuaciones de la temperatura a 2 metros promedio por cada mes del año 2022 (Figura 10c) [Muñoz Sabater et al., 2019a]. Asimismo, se observan variaciones a lo largo del año, donde los meses de noviembre a febrero muestran magnitudes mayores en comparación con los meses de junio a agosto. A escalas de años, pueden generarse diferencias debido a fenómenos como el ENSO, que afecta la precipitación según su fase e intensidad [Montecinos & Aceituno, 2003; Diaz et al., 2001]. Además, el cambio climático futuro podría generar un clima más seco en esta zona [Beck et al., 2018; González-Reyes et al., 2021].

Inicialmente, se utilizaron los retardos troposféricos obtenidos a partir de datos GPS debido a que proporcionan información puntual relevante. Sin embargo, estos datos presentan magnitudes más altas que las correcciones generadas con GACOS, aunque muestran una buena correlación (Tabla 8). Además, en esta red se logra una alta precisión espacial al considerar la latitud, longitud y altura de los puntos de medición. No obstante, las magnitudes se ajustan mediante la segunda red, que incorpora datos de GACOS. En esta etapa, se observa una notable mejora en las magnitudes



de las mediciones de los patrones en los interferogramas, disminuyendo así la sobreestimación de magnitudes. Cabe destacar que esta segunda red tiene en cuenta con mayor detalle las variaciones temporales al considerar diferentes escalas de tiempo en sus correcciones. La inclusión de variables temporales permite capturar las variaciones estacionales y climáticas que afectan el retardo troposférico en diferentes escalas de tiempo. Contribuyendo a mejorar la precisión y la calidad de las correcciones finales.

Este trabajo ejemplifica los emocionantes desafíos que enfrenta el aprendizaje profundo aplicado a la interferometría. La calidad y cantidad de datos son factores de suma importancia, ya que impactan tanto en el rendimiento como en la capacidad de generalización de los modelos de aprendizaje profundo, y superar estos desafíos no es una tarea sencilla [Zuo et al., 2022]. Asimismo, la interpretabilidad y explicabilidad desempeñan un papel fundamental en la comprensión de los procesos físicos que los modelos aprenden de los datos [Sapoval et al., 2022]. Por otro lado, la integración y validación resultan críticas para implementar los modelos en escenarios y aplicaciones del mundo real [Lee et al., 2020].

Existen diversas estrategias útiles para superar estos desafíos. Una de ellas es la ampliación y síntesis de datos, que permite mejorar tanto la calidad como la cantidad de los mismos [Sapoval et al., 2022]. El aprendizaje de transferencia y la adaptación de dominio son enfoques que nos permiten aprovechar el conocimiento adquirido en un dominio o tarea con datos limitados o diferentes [Sapoval et al., 2022]. Además, los mecanismos de atención y las herramientas de visualización contribuyen a mejorar la interpretabilidad y explicabilidad de los modelos [Oh et al., 2022], permitiendo comprender cómo toman decisiones y qué factores influyen en ellas. Los marcos de referencia y las pruebas desempeñan un papel importante al facilitar la integración y validación de los modelos [Sun & Demanet, 2022]. La cuantificación de la incertidumbre y la aplicación de técnicas de regularización son herramientas valiosas para medir y reducir la incertidumbre y la variabilidad de los modelos [Sun & Demanet, 2022], mejorando así su confiabilidad. Por último, el modelado híbrido y el aprendizaje informado por la física combinan los modelos de aprendizaje profundo con

modelos físicos o conocimientos previos [Sun & Demanet, 2022]. En definitiva, aunque los desafíos son reales, también lo son las soluciones.

Proponemos medidas efectivas para mejorar el entrenamiento de este método a lo largo de los Andes. Una de ellas consiste en utilizar una red de GPS que abarque los volcanes de norte a sur, aprovechando otras estaciones GPS del OVDAS y de instituciones dedicadas al monitoreo volcánico, como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en Colombia (<https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Paginas/Redes-de-monitoreo.aspx>), el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) en Ecuador (<https://www.igepn.edu.ec/nosotros>) y el Centro Vulcanológico Nacional (CENVUL) en Perú (<https://www.igp.gob.pe/servicios/centro-vulcanologico-nacional/red-volcanica>). Además, se podría incorporar otras variables atmosféricas para obtener información más precisa sobre las variaciones climáticas. Por ejemplo, datos sobre la fase e intensidad del fenómeno ENSO. De esta manera, ampliaremos el rango de utilidad de este método, permitiendo su aplicación en múltiples países por los cuales cruza la Cordillera de Los Andes.

Sin dejar de lado las limitaciones y consideraciones discutidas anteriormente, es esencial reconocer la interacción de nuestro modelo con las variaciones geográficas y atmosféricas. Los resultados obtenidos son alentadores, pero la verdadera prueba de su eficacia reside en su desempeño frente a conjuntos de datos externos y no utilizados en las fases iniciales de entrenamiento o validación. Esta capacidad de generalización se vuelve aún más crucial cuando consideramos regiones con condiciones climáticas extremas, como la Cordillera de Los Andes.

Asimismo, es vital que se cuente con un conjunto de datos diverso y representativo para garantizar la robustez del modelo en todas las situaciones posibles. La posibilidad de integrar este enfoque con otros métodos tradicionales en interferometría podría potenciar aún más su eficacia y aplicabilidad en diferentes contextos. Además, cualquier implementación en tiempo real o en situaciones de recursos limitados debe considerar el costo computacional, y aquí, el feedback de los usuarios que lo implementan puede ser de gran valor para realizar mejoras continuas.

Mirando hacia adelante, el cambiante entorno global nos presenta desafíos, pero también oportunidades. Los impactos de los cambios ambientales y climáticos son ineludibles y, como tal, requieren que modelos como el nuestro se adapten de manera proactiva. Más allá de mantener la precisión, es fundamental garantizar su relevancia y utilidad en un mundo en constante evolución. Las recomendaciones y estrategias que hemos discutido anteriormente son solo el comienzo. A medida que avanzamos, la investigación constante, el feedback de usuarios y el estar atentos a las nuevas tecnologías o avances en interferometría serán fundamentales para adaptarnos y mejorar.

En resumen, la aplicación del aprendizaje profundo a la interferometría presenta desafíos. Sin embargo, existen estrategias y técnicas prometedoras para superarlos. La clave radica en una adaptación inteligente e implementación de estas técnicas, considerando tanto la calidad como la cantidad de los datos, la interpretabilidad y explicabilidad de los modelos, así como su integración y validación en contextos reales. Con esto en mente, se subraya la importancia de una evolución y adaptación constantes. Tanto los desafíos actuales como los futuros brindan oportunidades para investigaciones adicionales y refinamientos en nuestra metodología. Nuestra misión consiste en afrontar estos desafíos con determinación y compromiso.

## **Conclusiones**

La aplicación del aprendizaje profundo a la interferometría puede enfrentar ciertos desafíos, pero existen estrategias y técnicas prometedoras que pueden ayudar a superar estas dificultades. Es crucial adoptar un enfoque inteligente y cuidadoso al implementar estas técnicas, considerando factores como la calidad y cantidad de los datos, la interpretabilidad y explicabilidad de los modelos, así como su integración y validación en situaciones reales.

En este trabajo, se propuso el entrenamiento de dos redes neuronales recurrentes con el fin de generar correcciones troposféricas para datos InSAR. Estas fueron entrenadas utilizando retardos troposféricos obtenidos de GPS, logrando una alta correlación espacial, y la segunda para corregir la magnitud de las correcciones. Este método se basó en la utilización de datos de retardo tro-

posférico diario promedio, los cuales mostraron una tendencia anual y fueron ajustados de manera excelente para cada caso específico, considerando tanto los aspectos espaciales como temporales. Esto permitió captar variaciones espacio-temporales de las condiciones atmosféricas que pueden presentarse en la zona de estudio.

Las correcciones resultantes permitieron estimar deformaciones en interferogramas con mínimas diferencias en comparación con las correcciones obtenidas mediante GACOS, considerado como la corrección de referencia. Los beneficios significativos de este método radican en su capacidad para generar correcciones troposféricas de manera rápida y efectiva, sin requerir la adquisición constante de datos atmosféricos.

En base a lo anterior, se ha logrado desarrollar un enfoque accesible y eficiente para la corrección troposférica, comparable en rendimiento a GACOS, pero con la ventaja adicional de un tiempo de procesamiento reducido. Sin embargo, es pertinente mencionar algunos aspectos a considerar en futuras aplicaciones y estudios. Es esencial evaluar cómo se generalizará este modelo en regiones geográficas distintas y bajo condiciones atmosféricas que no se hayan observado previamente. La fortaleza del método actualmente radica en la calidad y cantidad de datos con los que fue entrenado. Así que, aunque hemos reducido la necesidad de adquisiciones constantes, no podemos subestimar la importancia de mantener una base de datos actualizada y diversificada.

Además, es crucial considerar la infraestructura computacional al escalar este método. Aunque hemos logrado reducciones en el tiempo de procesamiento, es vital evaluar los requerimientos de hardware y software para implementaciones a gran escala o en situaciones de tiempo real.

Por último, es fundamental seguir evaluando la robustez y confiabilidad de este enfoque, especialmente en presencia de ruidos o posibles errores en los datos. Continuar validando y comparando con métodos como GACOS nos asegurará de mantener un estándar de calidad y precisión. A pesar de que el método propuesto ha demostrado ser altamente efectivo en la generación de correcciones troposféricas, con valores muy cercanos a los obtenidos mediante el uso de GACOS, presentando diferencias promedio de desplazamientos de aproximadamente 2 cm, lo cual corresponde a menos de

la mitad de la longitud de onda de banda C ( $\sim 5$  [cm]), sigue siendo importante el refinamiento de este método para lograr una corrección mucho más precisa en cuanto a deformaciones de pequeña escala.

Este método se presenta como un avance para la integración del aprendizaje automático en el ámbito de mejoras de estimaciones geodésicas, no solo en deformaciones volcánicas sino también en múltiples disciplinas, como deslizamientos de suelo o sismos.

## Capítulo 4. Identifying the tropospheric effect in InSAR data in a volcanic environment

- Atmospheric and topographic conditions can cause distortions in InSAR data
- Multiple tropospheric corrections supply information about strong atmospheric effects
- The method lowers uncertainty in small-scale volcanic deformation analysis with InSAR

### Abstract

Analyzing Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) data, crucial for understanding remote volcanic deformation, is complex due to atmospheric effects. Particularly in mountainous areas, where ground instruments are limited, distinguishing between volcanic and atmospheric sources in InSAR is challenging. Atmospheric refraction complicates the interpretation by producing interferogram patterns that closely mirror genuine deformation. In addressing this issue, a simple method is proposed to identify tropospheric delay-induced disturbances. It allows the recognition of tropospheric effects by interpreting variables representing the interaction between topography, atmospheric conditions, and interferograms.

The approach is applied to two Chilean volcanoes, Llaima and Cerdón Caulle, during their 2007-2009 and 2011-2012 eruptions, respectively. Results reveal notable tropospheric interference requiring removal to refine volcanic deformation interpretation. This technique efficiently detects genuine small-scale deformation, informing ground-based monitoring and reducing uncertainty during volcanic unrest periods. Consequently, it aids in accurately assessing volcanic activity and fortifying ongoing monitoring efforts.

## Introduction

InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) has become an indispensable tool for mapping ground deformations using satellite images [Hooper et al., 2004; Henderson & Pritchard, 2013; Albino et al., 2020]. Its ability to penetrate clouds and enable measurements day or night has proven invaluable for monitoring remote areas, being particularly useful during episodes of volcanic unrest and crisis. However, the trajectory of the radar wave becomes distorted due to refraction inside the atmosphere, compromising the millimeter-level accuracy necessary for measuring volcanic deformation [Lu et al., 2007; Biggs & Pritchard, 2017]. A signal can be affected by at least 10 cm due to a 20% change in relative atmospheric humidity, and for every kilometer of elevation change, it increases by at least 0.7 cm [Zebker et al., 1997; Parker et al., 2015]. This effect results in inaccuracies and uncertainty in volcanic deformation measurements and volume change estimates [Pritchard & Simons, 2004a].

Consequently, mountainous regions like the Andes pose significant challenges for InSAR due to their complex topography and dynamic atmospheric conditions that contribute to variable climatic factors across the region [Garreaud, 2009]. In the northern segment ( $12^{\circ}\text{N}$ - $5^{\circ}\text{S}$ ), dry and wet seasons alternate [Roncancio et al., 2020]; the central segment ( $5^{\circ}\text{S}$ - $33^{\circ}\text{S}$ ) experiences subtropical climatic anomalies [Garreaud, 1999]; and the southern segment ( $33^{\circ}\text{S}$ - $46^{\circ}\text{S}$ ) undergoes increased orographic and summer rainfall [Garreaud et al., 2017; Schumacher et al., 2020]. Furthermore, the influence of ENSO on temperature and precipitation [Montecinos & Aceituno, 2003; Puertas Orozco & Carvajal Escobar, 2008; Poveda et al., 2011] generates fluctuations in relative humidity, resulting in significant radar signal delays and substantial distortions in InSAR data.

Interferograms can be corrected using methods involving correlation with topography [Massonet et al., 1995; Elliott et al., 2008; Nikkhoo et al., 2016], temporal and/or spatial filters [Velez et al., 2011, 2016; Tizzani et al., 2015; Lundgren et al., 2015, 2017; Le Mével et al., 2016; Euilades et al., 2017], reconstruction of the ray's trajectory and distance traveled [Hofmeister, 2016;

Haji-Aghajany et al., 2017; 2019; Haji-Aghajany & Amerian, 2017; 2020], or utilization of global atmospheric models [Jolivet et al., 2011, 2014; Bekaert et al., 2015a; 2015b; Poland et al., 2017; Yu et al., 2017; 2018a; 2018b; Roukounakis et al., 2021; Cao et al., 2021a; 2021b]. Tools like TRAIN [Bekaert et al., 2015a; 2015b] in MATLAB [MATLAB, 2019] can generate a linear tropospheric correction by establishing a linear relationship between topography and interferogram phase, or by employing atmospheric models like the fifth-generation ECMWF atmospheric reanalysis (era5) [Muñoz Sabater, 2021a, 2021b]. GACOS employs atmospheric and topographic models to generate tropospheric corrections using tropospheric delay maps estimated from the High Resolution ECMWF weather model, SRTM-DEM [Farr et al., 2007], and ASTER-GDEM [Tachikawa et al., 2011], utilizing an Iterative Tropospheric Decomposition (ITD) model [Yu et al., 2017; 2018a, 2018b]. Alternatively, the ADTC-InSAR database [Lopez-Pozo et al., 2022] provides matrices of daily average tropospheric delay for each day of the year to generate a correction.

Given the varying effectiveness of methods across different locations, it is crucial to correctly determine tropospheric effects, particularly for detecting small-scale deformations [Bekaert et al., 2015b]. For this, the correlation between topography and interferograms is evaluated to detect significant tropospheric effects or to determine a magnitude threshold for confirming a specific deformation [Shirzaei & Bürgmann, 2012; Parker et al., 2015; Wendt et al., 2017]. However, uncertainties may persist; In the Southern Volcanic Zone (SVZ) of the Andes, conflicting interpretations have been proposed for the Cordón Caulle Volcanic Complex during the unrest that led to its eruption in 2011 [Jay et al., 2014; Wendt et al., 2017; Euillades et al., 2017] and for Llaima Volcano years before and during its 2008 eruption [Fournier et al., 2010; Bathke et al., 2011; Remy et al., 2015; Delgado et al., 2017]. Similarly, tropospheric effects have been evident at the Hudson volcano and hinder the interpretation of deformations [Pritchard & Simons, 2004b].

Because several corrections reveal a significant tropospheric effect regardless of their efficiency, we propose a novel method to differentiate interferogram patterns arising from significant tropospheric effects while excluding volcanic deformations. For this purpose, statistical variables are



introduced that relate interferograms, topography, and different tropospheric corrections, which are then grouped using k-means clustering [Lloyd, 1982; Peña et al., 1999], followed by an interpretation of the resulting clusters.

To illustrate the method, we employed two case studies: the eruptive cycles of Llaima volcano from 2007 to 2009 and Cordon Caulle volcano from 2011 to 2012, utilizing interferograms spanning from 2003 to 2009 and from 2011 to 2012. The inherent ambiguity in interpreting interferograms during those episodes makes them exemplary.

## Conceptual base of the method

The method proposes two types of variables: correlation and change in cross-sectional slope.

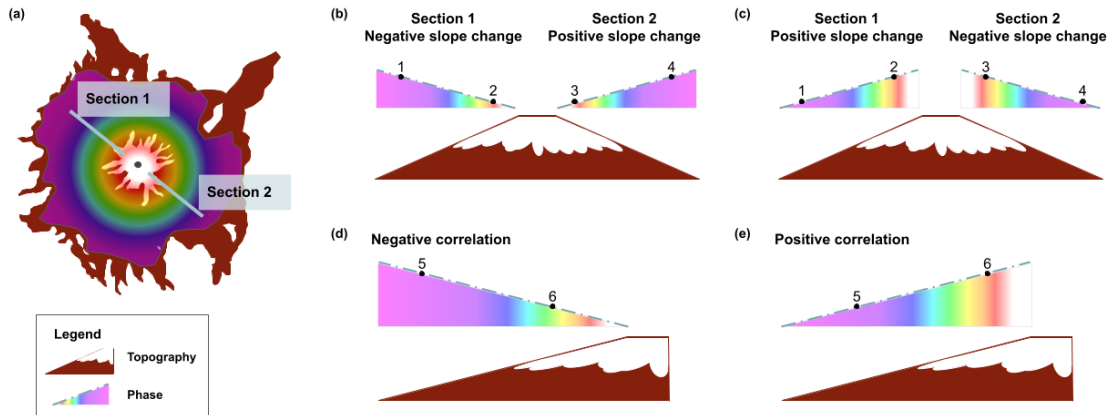


Figure 17: Illustration of slope change in cross-sections and correlation variables. (a) Scheme illustrating the selection of sections 1 and 2 from the cross-sections. (b-c) Diagram showing the effect of slope change between the corrected interferogram and an uncorrected interferogram across the cross-sections, with topography. (d-e) Scheme illustrating the correlation variable for interpreting the tropospheric effect with topography.

The change in slope of the points in the interferogram across the cross-section, when tropospheric correction is applied ( $\phi_{uw} - \phi_{uw-corr}$ ), can indicate that there is a significant tropospheric effect during the acquisition of the images. Figure 17a illustrates sections 1 and 2 of the cross-section that crosses the interferometric pattern. If the slope change is negative in section 1, the phase difference at point 1 is greater than at point 2 (Figure 17b, Equation 23). This leads to the

difference between two points in tropospheric correction during Secondary image acquisition being greater than in Primary image for section 1 (Equation 26), and this is projected in the same way in section 2, as it exhibits the same behavior with a mirror effect (slope change and relief).

Given that the tropospheric effect during Secondary image acquisition is greater than during Primary image acquisition, atmospheric conditions during image acquisition generate an inflation-like pattern. The contrary would be implied in the situation exemplified in Figure 17c.

$$[\Delta ph_{uw_1} > \Delta ph_{uw_2}] \wedge [\Delta ph_{uw_3} < \Delta ph_{uw_4}] \quad (23)$$

$$[ph_{uw_1} - (ph_{uw_1} - (corr_{S_1} - corr_{M_1})) > ph_{uw_2} - (ph_{uw_2} - (corr_{S_2} - corr_{M_2}))] \wedge \dots$$

$$\dots [ph_{uw_3} - (ph_{uw_3} - (corr_{S_3} - corr_{M_3})) > ph_{uw_4} - (ph_{uw_4} - (corr_{S_4} - corr_{M_4}))] \quad (24)$$

$$[corr_{S_1} - corr_{M_1} > corr_{S_2} - corr_{M_2}] \wedge [corr_{S_3} - corr_{M_3} < corr_{S_4} - corr_{M_4}] \quad (25)$$

$$[corr_{S_1} - corr_{S_2} > corr_{M_1} - corr_{M_2}] \wedge [corr_{S_3} - corr_{S_4} < corr_{M_3} - corr_{M_4}] \quad (26)$$

Additionally, the negative correlations between topography and tropospheric corrections represented in Figure 17c show that at point 5 the difference between both must be higher than at point 6 (equation 27). Following a similar approach as in the previous variables, it can be derived that the difference between Secondary image measurements at the time of capture is greater than that of the Primary image (equation 30). This would once again indicate that, due to atmospheric effects, an inflation-like pattern could be observed in the interferograms.

$$\Delta ph_{uw_5} > \Delta ph_{uw_6} \quad (27)$$

$$ph_{uw_5} - (ph_{uw_5} - (corr_{S_5} - corr_{M_5})) > ph_{uw_6} - (ph_{uw_6} - (corr_{S_6} - corr_{M_6})) \quad (28)$$

$$corr_{S_5} - corr_{M_5} > corr_{S_6} - corr_{M_6} \quad (29)$$

$$corr_{S_5} - corr_{S_6} > corr_{M_5} - corr_{M_6} \quad (30)$$

In this manner, if a cluster is characterized by containing a majority of slope changes and correlations indicative of cases where the tropospheric effect could appear as an inflation-like signal in the interferograms, then it is interpreted that this tropospheric effect is significantly positive.

The same analysis can be conducted in the opposite case, as depicted in Figure 17b,d. A markedly negative tropospheric effect would be associated with clusters showing positive correlations and positive and negative slope changes in sections 1 and 2, respectively. Finally, if neither of the two cases presented occurs, a marked tropospheric effect is ruled out.

## Method application

This method introduces variables relating to interferograms, topography, and tropospheric corrections. For this purpose, it is necessary to consider the generation of interferograms and different tropospheric corrections.

Interferograms have been generated using GMTSAR [Sandwell et al., 2011a, 2011b] with ALOS-PALSAR [JAXA/METI, 2007] and ENVISAT-ASAR [European Space Agency, 2002] data, in addition to the digital elevation model SRTM-3 [NASA, 2013]. The quantity of interferograms is shown in Figure 24 (Anexo 3).

Tropospheric corrections applied to each unwrapped interferogram were generated using TRAIN [Bekaert et al., 2015a; 2015b] for a linear topographic method and assimilating atmospheric models

with era5 and GACOS. We also used our daily-average database of tropospheric corrections for Andean volcanoes (ADTC-InSAR [Lopez-Pozo et al., 2022])

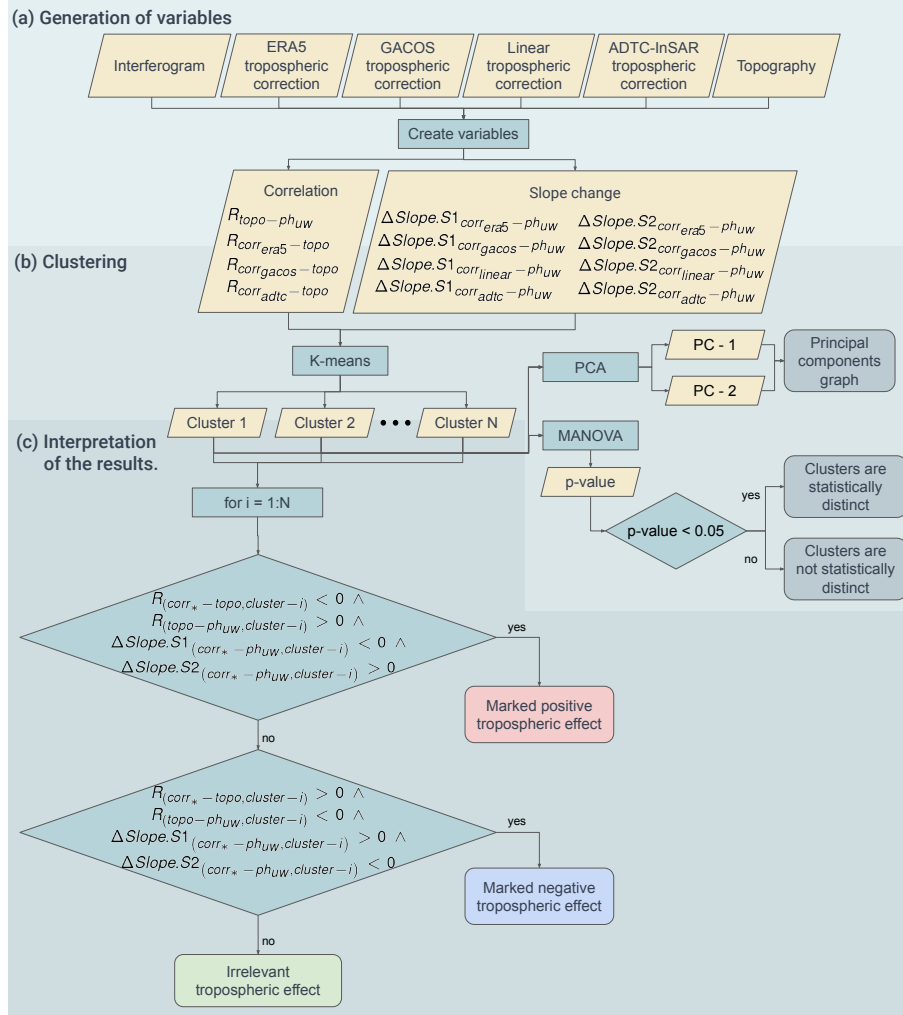


Figure 18: Flow diagram of the method. It begins with (a) the generation of variables related to correlation and changes in slopes from interferogram data, topography, and different tropospheric corrections (era5, GACOS, linear and ADTC-InSAR). It then proceeds to (b) clustering using k-means, which is validated through PCA and MANOVA. Finally, (c) the clusters are interpreted to assign them as clusters with a markedly positive tropospheric effect (P) or negative tropospheric effect (N), or with an irrelevant tropospheric effect (I).

The correlation and slope change variables are generated with the interferograms, topography, and the four tropospheric corrections (Figure 18a).

The Pearson correlation coefficient (R) is a starting point to identify and measure variable

relationships [Haldar, 2013]. In this instance, areas containing a possible deformation pattern are identified, inspecting the group of interferograms for each studied region. Grid points inside each selected area are then extracted, and one value of R is calculated for the correlation between topography-unwrapped interferogram ( $R_{topo-ph_{uw}}$ ) and topography-corrections ( $R_{corr*-topo}$ ).

Cross-sections in the interferograms are chosen to intersect the identified patterns (Figure 17a) to facilitate simplified data analysis [Matgen et al., 2007]. Subsequently, each cross-section is divided into two smaller sections (Sections 1 and 2) to identify variable slopes on each side of the pattern (Figures 18a-b and 17b-c). The difference in slopes across the cross-section of the uncorrected and corrected interferogram ( $Slope.S*_{ph_{uw}} - Slope.S*_{ph_{uw}-corr}$ ) is calculated, and their magnitudes are normalized by dividing them by the segment distance in kilometers. The mean values are then obtained for sections 1 and 2 of the cross-sections associated with a pattern ( $\Delta Slope.S1_{corr*-ph_{uw}}$ ,  $\Delta Slope.S2_{corr*-ph_{uw}}$  in Figures 18a-b).

In this manner, for each pattern, interferogram, and the four tropospheric corrections used, there are four slope changes for each section of the cross-sections, three correlations between topography and tropospheric correction (none for the linear correction because it is always very high), and a correlation between topography and the unwrapped interferogram. When estimating the proposed variables for model execution, it is suggested to apply the Variance Inflation Factor (VIF), which allows detecting high correlation between two or more variables that may harm the application of k-means due to information redundancy. The Variance Inflation Factor varies between 1 and  $+\infty$  and is calculated as follows:

$$VIF = \frac{1}{1 - R_k^2} \quad (31)$$

Where  $R_k^2$  is the coefficient of determination of the auxiliary regression of variable  $X_i$  on the rest of the explanatory variables.

The set of selected variables for each interferogram-pattern pair undergoes clustering through

k-means clustering [Lloyd, 1982; Peña et al., 1999] (Figure 18b) to identify cases that share similar characteristics. Clustering through k-means allows the organization of information for subsequent evaluation and interpretation by the researcher. The simplicity, adaptability, and key features of k-means have made it a popular choice in various scientific fields [Oyelade et al., 2010; Dalmiya et al., 2012; Govender & Sivakumar, 2020].

Using the NbClust function [Charrad et al., 2014] of the statistical software R, the optimal number  $N$  of clusters is obtained according to the resulting data for each volcano. This  $N$  is then used to perform the k-means analysis with R [R-Core-Team, 2020], allowing for a separation of data points in specific clusters with a shared common distribution of variables. Through Principal Component Analysis (PCA) [Hotelling, 1933; Abdi & Williams, 2010], the information of the clusters is reduced to two new vectors that represent the most significant variance in the data, and Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) [Kaufmann & Schering, 2007; Warne, 2014] allows for the statistical distinction evaluation among the clusters with a  $p$ -value  $< 0.05$ .

The resulting clusters are interpreted according to the conceptual base of the method section (Figure 18c). This implies that if the slope changes are generally negative and positive in sections 1 and 2, and the correlations are negative, it is interpreted as a cluster with a markedly positive tropospheric effect (P). Conversely, if the cluster exhibits a markedly negative tropospheric effect, it is labeled as (N). It is identified as having no significant tropospheric effect (I) if it does not correspond to any previously presented cases.

Finally, the P and N groups, which have pronounced tropospheric effects, imply that inflation-like and deflation-like patterns observed in the interferograms are mostly due to changing atmospheric conditions between both SAR image acquisition times. In contrast, group I, with irrelevant tropospheric influence, comprises the cases lacking a tropospheric effect that allows interpreting the interferometric signal as a real ground deformation. Therefore, if a P/N cluster aligns with inflation/deflation, it can be ruled out that such a pattern results from volcanic deformation. In all other cases, such deformation is confirmed.

## Testing the method: Llaima and Cordón Caulle eruptive cycles

The volcanoes Llaima and Cordón Caulle have been used to exemplify the application of this method (see Figure 19a-b). These volcanoes are situated within the rugged landscape of the Southern Andean Volcanic Zone (SVZ: 33°S-46°S), embodying the topographical characteristics that prevail in a subduction-related arc [Di Castri & Hajek, 1976; Stern, 2004]. Located amidst the intricate topographical trinity of the Coastal Range, Central Valley, and the Andes Mountain Range, their relief owes much to Quaternary volcanism and high rates of glacial erosion [Stern, 2004]. These complex topographical features combined with very humid atmospheric conditions strongly influence precipitation patterns [Giorgi et al., 2003; Sarricolea et al., 2019], even allowing for a climate transition from temperate without dry season (Cf) to polar tundra (ET) at higher altitudes (Figure 19a-b). Precipitation is frequent, and extensive wet periods are observed around the volcanoes [Santibáñez, 2017a, 2017b; Sarricolea et al., 2019].

The method has been applied to the eruptive cycles of 2007-2009 at Llaima and 2011-2012 at Cordón Caulle. Such eruptive cycles have been characterized by seismic activity, gas emissions, and volcanic eruptions in January 2008 and April 2009 in the case of Llaima [Moreno et al., 2009; Romero Moyano et al., 2014; Franco et al., 2019], and by a solid plinian column, lava emission, and lahars, started on June 4, 2011, for Cordón Caulle [Silva Parejas et al., 2012; Elissondo et al., 2016]. In these cases, pre-eruptive deformation patterns have generated uncertainty in the interpretation due to possible significant tropospheric effects caused by complex atmospheric and topographic conditions [Fournier et al., 2010; Bathke et al., 2011; Jay et al., 2014; Remy et al., 2015; Wendt et al., 2017; Delgado et al., 2017; Euillades et al., 2017; Novoa et al., 2022].

On the one hand, interferograms were generated between 2003 and 2009 for the Llaima volcano. These reveal two distinct interferometric patterns, one in the central region (pattern  $\alpha$ ) and the other in the volcano's eastern flank (pattern  $\beta$ ) (see Figure 19c). Based on this information, topography and tropospheric corrections were used to extract the variables proposed by the method,

Pattern	Primary image [YYYYMMDD]	Secondary image [YYYYMMDD]	Correlation		Section 1			Section 2			Cluster
			HGT - era5	phuw - HGT	GACOS	Linear	ADTC	GACOS	Linear	ADTC	
Llaima	20030204	20050104	-0.99	0.70	-1.79	-0.26	0.04	2.72	0.39	0.36	P
	20031125	20070403	-0.98	0.51	-1.28	-0.72	-0.09	1.82	0.89	0.34	
	20031125	20070508	-0.98	0.32	-1.74	-2.14	0.38	2.19	2.58	-0.20	
	20040309	20070403	-0.72	0.41	-0.79	-0.13	0.01	1.01	0.16	-0.08	
	20040309	20070508	0.01	0.36	-1.30	-2.99	0.82	1.49	3.73	-0.52	
	20070306	20080122	-0.82	0.42	-1.14	-1.08	0.35	1.72	1.39	-0.53	
	20030204	20050104	-0.58	-0.68	1.27	0.07	2.14	3.34	0.38	-0.37	
	20031125	20070403	-0.71	0.11	4.54	0.35	1.95	4.61	1.03	0.63	
	20031125	20070508	-0.96	-0.09	-0.46	0.32	-1.54	2.77	2.99	0.32	
	20040309	20070403	-0.96	0.32	3.97	0.05	-0.55	2.79	0.18	-0.25	
	20040309	20070508	-0.97	0.27	-0.67	0.71	-3.57	0.95	4.39	-0.56	
	20070306	20080122	-0.99	0.05	-1.22	0.19	-2.65	1.44	1.66	-0.61	
Llaima	20061205	20080304	0.96	-0.68	0.50	0.62	-0.08	-0.71	-0.96	1.14	N
	20061205	20080408	0.95	-0.31	1.27	1.60	0.06	-2.12	-2.68	0.51	
	20070306	20090311	0.99	-0.42	0.69	0.64	-0.15	-1.03	-0.86	-0.22	
	20070403	20081118	0.98	-0.46	0.55	0.81	-0.33	-0.88	-1.05	-0.01	
	20070404	20090222	0.82	-0.54	3.54	2.41	-0.95	-4.51	-3.32	0.83	
	20070424	20080304	0.76	-0.43	-0.35	0.85	0.14	0.12	-1.36	1.09	
	20070508	20081008	0.98	-0.44	2.59	2.26	-1.02	-3.83	-2.82	0.58	
	20071016	20080304	0.95	-0.26	-1.05	0.42	-0.19	1.41	-0.78	1.08	
	20061205	20080408	-0.34	-0.43	-1.21	-0.66	2.43	-3.26	-2.35	0.09	
	20070306	20090311	0.99	-0.41	-0.64	-0.12	-0.16	-1.04	-0.35	-0.78	
	20070403	20081118	0.63	-0.27	-3.22	0.07	0.10	-3.35	-1.15	-0.50	
	20070508	20081008	0.99	-0.70	5.05	0.75	7.02	-3.76	-3.06	-0.88	
Llaima	20061205	20080304	0.97	-0.64	-0.37	-0.10	11.18	-1.32	-0.95	0.34	I
	20070404	20090222	0.29	0.23	-2.19	-0.39	5.87	-8.99	-4.34	1.92	
	20070424	20080304	0.98	-0.48	-0.43	-0.11	7.03	0.52	-1.17	1.63	
	20071016	20080304	0.98	-0.05	2.29	-0.08	10.50	3.47	-0.66	1.48	
	20110309	20110408	-0.87	0.49	-0.79	-0.46	0.25	-1.92	6.02	-1.41	
	20111204	20120202	-0.89	0.62	-0.42	-0.83	-0.32	2.49	10.49	-0.65	
Cordón Caulle	20110309	20110408	-0.92	0.68	-1.14	-2.26	0.66	0.81	2.13	-0.64	P
	20111204	20120202	-0.91	0.36	-0.77	-2.80	-0.08	0.82	3.31	-0.15	
	20110309	20110408	-0.95	0.79	-4.24	-5.66	1.45	0.79	1.29	-0.35	
	20110309	20110508	-0.94	0.14	-2.83	-2.01	2.56	0.65	0.47	-0.58	
	20111204	20120202	-0.86	0.31	-3.28	-8.05	0.17	0.44	1.69	-0.06	
	20110408	20110508	0.58	-0.66	1.03	0.40	0.18	-0.48	-4.21	-0.72	
	20110607	20110607	0.84	0.37	-1.04	-1.04	-0.07	-1.51	7.98	-0.17	
	20110607	20110707	0.08	0.42	0.53	-0.24	-0.16	-0.38	2.65	-0.10	
	20110607	20111005	0.93	0.16	0.32	0.12	-0.30	-0.15	-1.00	0.93	
	20110707	20111005	0.01	0.73	-0.15	0.01	0.02	0.16	4.43	1.58	
	20111005	20111204	0.98	0.68	0.32	-0.37	0.15	-1.98	2.22	0.59	
	20110408	20110508	0.73	-0.56	0.56	1.68	0.26	0.07	-1.47	-0.23	
Cordón Caulle	20110508	20110607	0.90	0.08	0.24	-3.30	0.03	-1.31	3.06	0.41	I
	20110607	20110707	0.72	-0.10	0.54	-0.96	-0.11	0.16	0.98	0.09	
	20110607	20111005	0.38	-0.35	0.37	0.37	-0.53	0.35	-0.42	0.80	
	20110707	20111005	-0.69	0.28	-0.22	-1.69	-0.46	0.16	1.97	0.68	
	20111005	20111204	0.96	0.24	0.70	-0.81	0.11	-0.68	0.77	-0.09	
	20110408	20110508	0.63	-0.53	0.95	3.82	1.00	-0.09	-0.89	-0.16	
Cordón Caulle	20110508	20110607	0.86	0.03	3.10	-7.42	0.62	-1.14	1.91	1.19	I
	20110607	20110707	0.77	0.06	0.65	-2.48	0.14	0.25	0.50	0.08	
	20110607	20111005	0.55	0.30	-0.07	0.94	-1.64	0.41	-0.25	0.41	
	20110707	20111005	-0.72	0.19	-0.77	-4.47	-1.52	0.13	0.97	0.33	
	20111005	20111204	0.96	0.19	2.01	-2.25	-0.29	-0.52	0.60	-0.04	
	20110408	20110508	0.96	0.19	2.01	-2.25	-0.29	-0.52	0.60	-0.04	

Table 11: Result for Llaima and Cordón Caulle. The table presents patterns (column 2), SAR image acquisition dates (columns 3-4), the value of Pearson correlation coefficient between topography and tropospheric corrections from era5 (column 5), and between interferogram and topography (column 6), and changes in interferogram slopes upon applying tropospheric corrections from GACOS, Linear, and ADTC (columns 7-12). Lastly, k-means classification (column 13) is applied using 3 and 2 clusters, respectively.



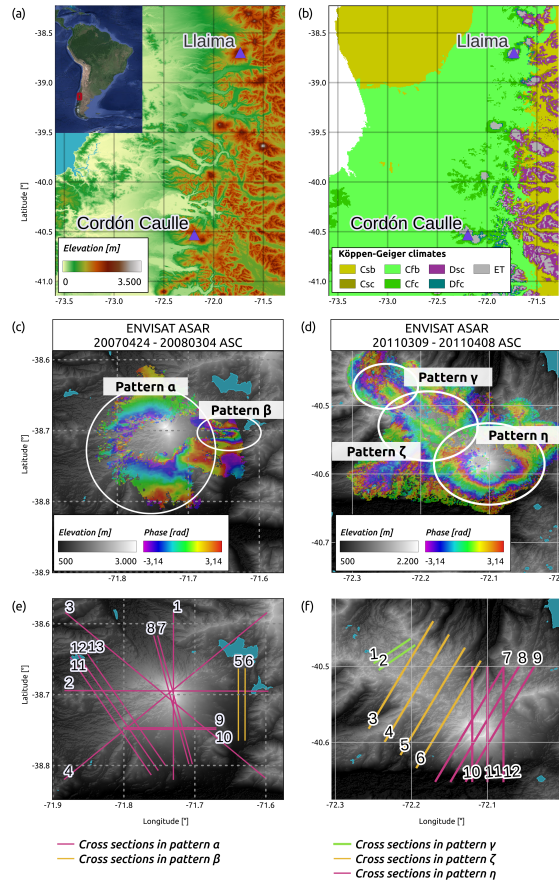


Figure 19: Study area. (a) Topography [NASA, 2013] and (b) Present Köppen-Geiger climates [Beck et al., 2018] around Llaima volcano and Cordón Caulle (purple triangles). (c-d) Deformation patterns and (e-f) cross-sections of (c,e) Llaima and (d,f) Cordón Caulle.

considering the cross-sections indicated in Figure 19e. Among these, only cross-sections 5 and 6 are associated with pattern  $\beta$ . In this case, it was determined that 3 clusters were optimal based on the optimized data for k-means classification. The results of the clustering in the final column of Table 11 show statistically significant group distinctions validated by MANOVA analysis, with a p-value of  $1.778e-14$  ( $p\text{-value} < 0.05$ ). PCA further supports this delineation, as the complementary Figure 20a shows. By examining the variables according to the criteria described in the method, we labeled the groups: Group N with a marked negative tropospheric effect, Group P with a marked positive effect, and Group I where the tropospheric effect is irrelevant (Table 11). The differences in variable magnitudes across these clusters are easily discernible.

On the other hand, to apply the proposed method to Cordón Caulle, interferograms were generated between 2011 and 2012. Due to its elongated shape, the area was divided into three regions named  $\gamma$ ,  $\zeta$ , and  $\eta$  patterns. Twelve cross-sections were selected, as depicted in Figure 19e-f. For this case, the best classification was achieved when considering 2 clusters, associated with a p-value of 1.099e-07, verifying the classification and showing a clear distinction between the clusters (see Figure 20b). These clusters have been interpreted as Group P with a marked positive effect and Group I where the tropospheric effect is irrelevant (Table 11).

It's worth noting that in both cases, through the application of the Variance Inflation Factor (VIF), 4 out of the 12 variables have been discarded: the correlation between the correction generated with ERA5 and topography, the correlation between topography and the interferogram, and the slope changes between the tropospheric corrections GACOS, Linear, and ADTC-InSAR (Table 11).

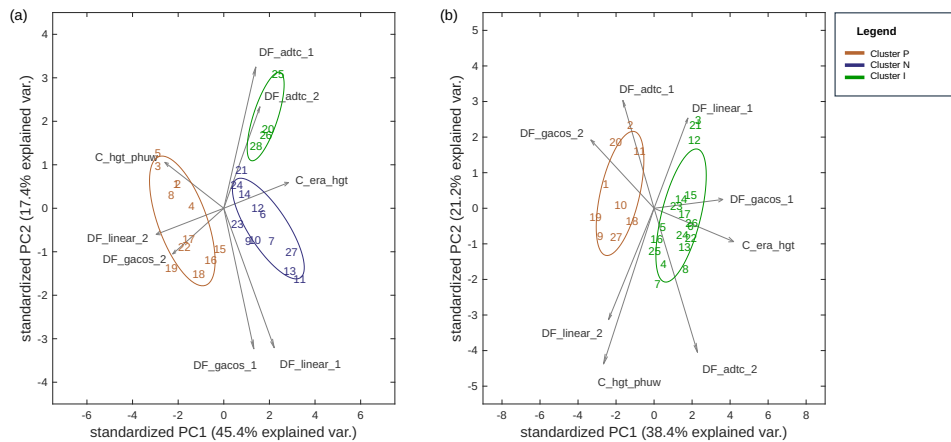


Figure 20: Analysis of clusters generated by k-means. Principal Component Analysis and k-means clusters for (a) Llama and (b) Cordón Caulle.

Figure 21 presents the Line of Sight (LOS) displacement from interferograms of both volcanoes associated with clusters generated using the proposed method. In the case of Llama volcano, pattern  $\alpha$  (Figure 21a) shows that the interferograms display a possible inflation until January 2008 (rectangle 1) and subsequent deflation (rectangle 2). However, since they are associated with

clusters P and N, these deformations are discarded. On the other hand, pattern  $\beta$  (Figure 21b) exhibits deflation (rectangle 3), which is confirmable since it is associated with clusters P and I. Finally, in the Cordón Cauille (Figure 21c), a potential pre-eruptive inflation is observed (rectangle 4), but inflation is ruled out because it is associated with cluster P.

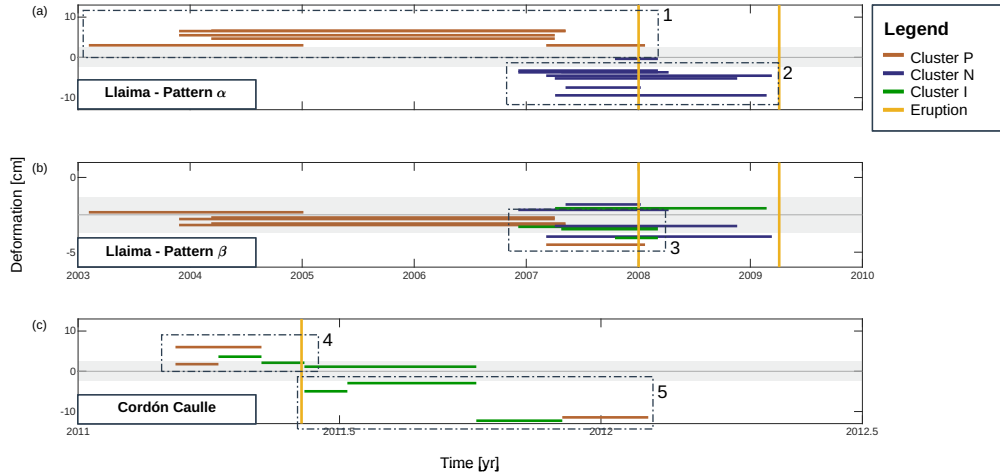


Figure 21: Deformation and clusters generated by k-means. Plots showing measurable deformation in (a)  $\alpha$  and (b)  $\beta$  patterns of interferograms using ALOS-PALSAR and ENVISAT-ASAR data between 2003-2009 for Llama volcano, and (c) interferograms from ENVISAT-ASAR between 2011-2012 for Cordón Cauille. The colors of the lines identify Group P (red), Group N (blue), and Group I (green).

## Discussion

Generally, to discard tropospheric effects in InSAR data, correlations between the interferogram and the topography are used, or the assignment of a deformation magnitude threshold [Shirzaei & Bürgmann, 2012; Parker et al., 2015; Wendt et al., 2017]. In our case, proposing the integration of statistical variables encompassing atmospheric characteristics provides information for analyzing the tropospheric effect. Specifically, employing different corrections estimated using various data and methods allows us to grasp the presence of a genuine trend related to the prominence of a tropospheric effect, especially when multiple corrections exhibit variables with similar behaviors. Atmospheric characteristics are essential in areas like the SVZ where orographic precipitation occurs

[Garreaud et al., 2017]. The precipitation generates significant variations in the tropospheric delay during data acquisition [Lopez-Pozo et al., 2022]. Applying the variance inflation factor led to the exclusion of variables that could potentially cause sensitivity issues in the k-means classifier due to information redundancy. The results of this are revealed through the two Principal Components applied to the k-means classifications, representing approximately  $\sim 60\%$  (Figure 20). It shows a clear independence among the selected variables, with each contributing uniquely to the total variance (directions of the vectors). Moreover, the p-value  $\ll 0$  in both plots indicates a clear and efficient classification generated by k-means. This underscores the fundamental role of incorporating tropospheric corrections to assess the importance of the tropospheric effect in InSAR measurements.

The change in slope when applying tropospheric correction can be interpreted as the measurement of the change in inclination of interferogram points concerning the horizontal axis when applied. This allows a general analysis of a specific area where data loss occurs due to the filter used to reduce interferogram decorrelation [Zebker & Villasenor, 1992; Zhang & Lu, 2022]. Furthermore, since tropospheric corrections have varying efficiencies depending on conditions, location, and time [Bekaert et al., 2015b], incorporating more than one tropospheric correction allows for identifying a trend in atmospheric behavior over the data, providing greater reliability in result interpretation.

The method has allowed us to rule out deformations associated with the  $\alpha$  pattern during the eruptive cycle of the Llaima volcano from 2007-2009, confirming that a strong tropospheric effect hinders the identification of co-eruptive deformations, as previously proposed [Fournier et al., 2010; Remy et al., 2015; Delgado et al., 2017], ruling out an insignificant tropospheric effect [Bathke et al., 2011]. However, our analysis confirms deformation on the  $\beta$  flank, previously interpreted as instability due to the 2008 eruption, particularly between January 1 and March 4, 2008 [Fournier et al., 2010; Delgado et al., 2017].

Through the method, the pre-eruptive inflation before the 2011-2012 eruptive cycle at Cordón Caulle is ruled out due to significant tropospheric effects [Wendt et al., 2017; Euillades et al., 2017]. However, it should be noted that from rectangle 5 in Figure 21c, it is possible to detect a markedly

positive tropospheric effect even though the deformation is associated with significant deflation [Jay et al., 2014; Wendt et al., 2017; Euillades et al., 2017; Novoa et al., 2022]. This is because the method assigns considerable importance to atmospheric conditions.

These volcanoes have served as an example of the application of the proposed method in this study. Although we consider that these cases, where atmospheric and topographic conditions are conducive to this method, may be applicable to other areas. Under the proposed variables, we think this method is particularly useful for volcanic areas with a temperate to tropical climate and in the presence of complex topography that can generate significant tropospheric effects [Lopez-Pozo et al., 2022]. Although the use of these variables is suggested for classification, we do not rule out the possibility of including other variables in the future that may be important for discarding tropospheric effects or modifying the ones already proposed. Just as topography influences atmospheric conditions, vegetation also has an impact on them [Garreud & Aceituno, 2007]. Therefore, integrating a variable that involves vegetation in the future could be useful for classification and subsequent interpretation of the results.

This approach has proven useful in volcanic environments, but we do not dismiss its applicability in other areas due to the impact of tropospheric effects on landslides or seismic activity [Dong et al., 2019, Yu et al., 2020; Gong et al., 2022; Zhou et al., 2023]. In cases of deformation caused by seismic activity, where this effect can be highly significant despite the usual disregard for tropospheric effects due to deformations of usually large magnitude, the opposite can occur, with deformation hidden under the tropospheric effect [Yu et al., 2018c]. In such cases, it has been shown that the sensitivity of corrections in seismic deformations depends on the topographic relief and earthquake geometry [Scott & Lohman, 2016].

In Figure 22, a clear difference in topographic relief between both volcanoes is shown. Due to the significant influence of topography on the climatic development of a site (exemplified mainly in precipitation) [Basist et al., 1994; Garreud & Aceituno, 2007; Amjad et al., 2020; Viale et al., 2019], when variables from more than one volcano are considered, they do not generate a clear and

interpretable classification with the aim of identifying the marked tropospheric effect. Therefore, it is considered not advisable to generate a classification based on variables from more than one volcano at the same time.

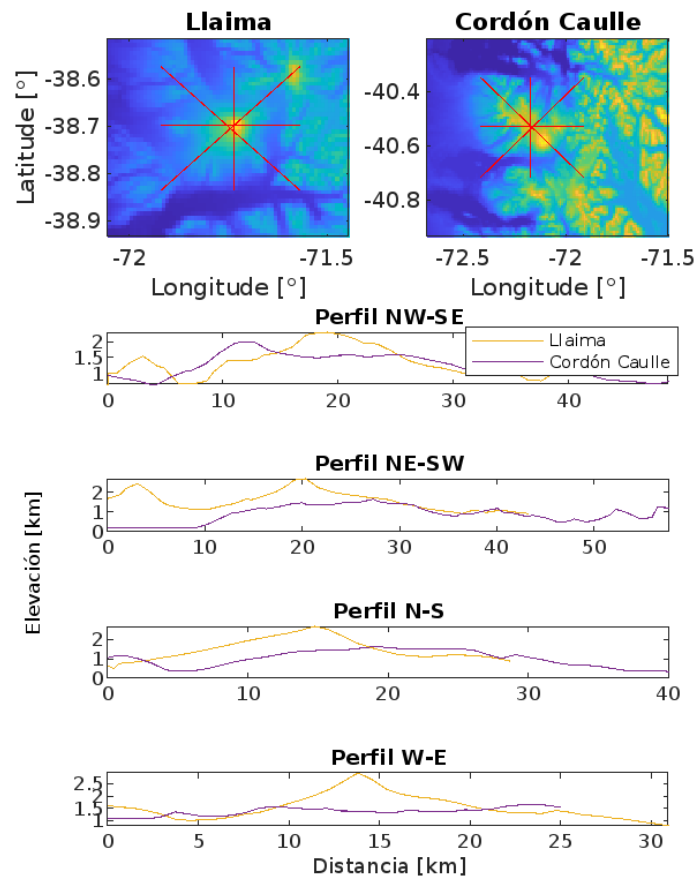


Figure 22: The figures illustrate the topographic differences between Llaima and Cordón Caulle volcanoes. The two upper maps indicate the lines representing the topographic profiles shown in the four lower graphs. Here, the North-South (N-S), West-East (W-E), Northwest-Southeast (NW-SE), and Northeast-Southwest (NE-SW) profiles are displayed.

## Conclusions

We have presented an easily reproducible approach based on well-established classification and statistical techniques like k-means clustering, PCA, and MANOVA. This accessible approach discerns the substantial influence of tropospheric effects on InSAR data, providing reliable classifications for elucidating complex geospatial patterns associated with volcanic activity. The strength of this

methodology lies in its inherent simplicity and clarity, offering the possibility of being incorporated into operational volcanic monitoring, primarily for cases with incipient unrest and/or small-scale deformation. The latter is especially important for accurately interpreting ground displacement in geographically remote areas with complex climatic dynamics, exemplified by Andean volcanoes. Additionally, this method may prove useful not only for volcanic areas but also for other types of surface displacement, such as landslides or earthquakes. It's crucial to emphasize that this method should be considered as complementary to tropospheric correction rather than a replacement.

The applicability of this method was validated against Llaima and Cordón Caulle in the SVZ, enhancing the discernment of critical tropospheric effects within InSAR datasets during eruptive phases.

It should be noted that it is impossible to mix data from different volcanoes due to the complex nature of volcanic topography. This poses challenges, for which the next essential step is to standardize variables centered on topography. This would allow for a more diverse integration of volcanic data into a comprehensive database. Further refinement of our classification methodologies, exploration of non-linear inter-variable relationships through advanced statistical methods, and including a broader spectrum of variables symbolize promising paths for future research. These advancements promise to improve the model's accuracy and deepen our understanding of complex volcanic phenomena, paving the way for a more robust comprehension of volcanic dynamics.

## Capítulo 5. Discusión

Los estudios de deformación volcánica con datos InSAR pueden verse afectados por las condiciones atmosféricas presentes en el lugar de medición generándose así patrones errados. Por lo tanto la interpretación de estos datos queda sujeta a los resultados del procesamiento. Por consiguiente, se requiere un análisis minucioso y riguroso para diferenciar entre señales volcánicas reales y artefactos troposféricos, con el fin de asegurar interpretaciones precisas.

Por estas razones, es importante comprender las variaciones del retardo troposférico, evaluar distintos métodos aplicables para generar correcciones troposféricas y explorar metodologías para discriminar entre el efecto troposférico y las deformaciones.

### Retardo troposférico y Clima

Este trabajo inicia con un estudio del retardo troposférico diario alrededor de 10 volcanes de los Andes del sur, distribuidos en tres zonas volcánicas con climas predominantes distintos: tropical, desértico y templado. De esta manera, se simplifica la observación del retardo troposférico y sus componentes, ya que en estos 3 tipos de climas, las variables de temperatura, presión y humedad relativa de la atmósfera tienen un comportamiento evidentemente diferente.

El desafío del efecto troposférico reside en el tipo de clima predominante en la zona, donde las fluctuaciones estacionales en el contenido de humedad atmosférica juegan un papel crucial en este fenómeno [Fattahi & Amelung, 2015]. En áreas con un clima tropical, donde la humedad es elevada, como ocurre en la Zona Volcánica Norte, los valores diarios del retardo troposférico son significativamente mayores que en la Zona Volcánica Central, caracterizada por un clima desértico con baja humedad (ver Figura 7). Pero cabe mencionar que esta medición de la componente húmeda se ve afectada por la compleja y heterogénea distribución vertical del vapor de agua, debido a la proximidad al mar y las significativas fluctuaciones climáticas diarias [Doin et al., 2009].

Entonces, ¿cuál es la complejidad más relevante asociada con las variaciones en el retardo



troposférico? Investigaciones previas han identificado que la contribución seca-húmeda es del 90%-10% [Misra & Enge, 2006]. A primera vista, podríamos pensar que la contribución seca es más significativa; sin embargo, en este estudio hemos observado que esta proporción cambia hasta el 99%-1% en áreas con baja humedad, como ocurre en climas desérticos, principalmente debido a la disminución de la componente húmeda. Si bien la componente seca contribuye en mayor medida al retardo troposférico diario, es la componente húmeda la que genera la mayor variabilidad total (ver Figura 7 y Tabla 3).

En relación con la componente seca, investigaciones previas han indicado que esta es importante cuando la temperatura superficial varía más de 10 °C durante el año [Doin et al., 2009]. Sin embargo, en este estudio hemos observado una estrecha relación entre la contribución seca y la presión atmosférica debido a sus magnitudes y estabilidad temporal. Las variaciones de magnitud de la presión atmosférica entre volcanes cambian de manera similar a la componente seca del retardo troposférico, ya que las mayores magnitudes se encuentran en la zona con clima templado, seguido por el clima tropical y, por último, el clima desértico (ver Figuras 23 y 7). Por otro lado, la presión superficial y el retardo troposférico no experimentan variaciones temporales significativas en comparación con la temperatura atmosférica (Figura 23), probablemente debido a que la presión atmosférica depende en gran medida de la altitud.

La magnitud del retardo troposférico depende de la amplitud de las variaciones estacionales [Fattahi & Amelung, 2015]. Estos cambios estacionales pueden estar influenciados por los períodos de lluvia, los cuales hemos observado que pueden generar un incremento en el componente húmedo del retardo troposférico diario, como ocurre en el Invierno Altiplánico en CVZ [Torres-Batló & Martí-Cardona, 2020] o durante las estaciones húmedas en NVZ [Urrea et al., 2019]. En este sentido, la ubicación y el relieve del volcán son factores importantes, ya que la topografía y la dirección del viento influyen en la generación de precipitaciones [Basist et al., 1994; Falvey & Garreaud, 2007; Sarricolea et al., 2019]. Es relevante mencionar que, en otros casos, esta relación entre precipitación y retardo troposférico ha sido útil para implementar métodos que intentan

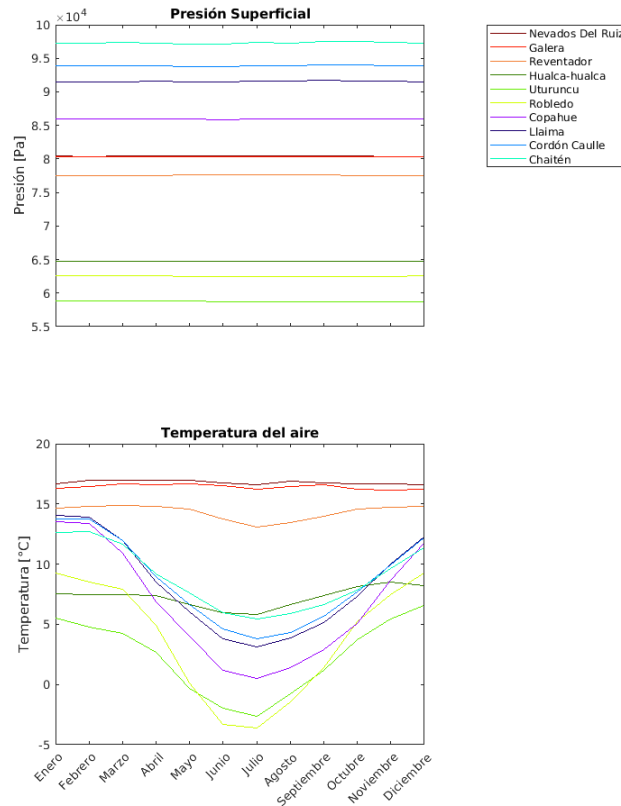


Figura 23: Climatologías de 40 años (1980-2019) de variables atmosféricas en torno a 10 volcanes de la zona volcánica norte, centro y sur de la Cordillera de Los Andes: Nevados Del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle y Chaitén. (a) Presión superficial [Pa] y (b) Temperatura del aire [°C] de era5 [Muñoz Sabater et al., 2019] descargados por medio de Google Earth Engine.

pronosticar precipitaciones basadas en el retardo troposférico [Zhao et al., 2018].

De esta manera, se da cumplimiento al primer objetivo de esta tesis: “Analizar estadísticamente el comportamiento del retardo troposférico, incluyendo sus variaciones y dependencias”. De ello se desprende que el relieve topográfico y las variaciones espaciales y temporales del clima juegan un papel fundamental en las variaciones del retardo troposférico y sus componentes. Estos factores pueden contribuir a generar patrones y comportamientos distintos en el retardo troposférico diario en distintas regiones, lo que perjudica en gran medida el estudio y análisis de deformaciones volcánicas en imágenes InSAR.

## Corrección troposférica

Dado el impacto del retardo troposférico en los datos InSAR para la estimación de deformaciones volcánicas, surge la necesidad de generar la corrección troposférica más precisa posible. A pesar de la amplia gama de métodos utilizados para generar correcciones, el rendimiento de cada uno puede variar dependiendo del lugar de estudio [Stephens et al., 2020; Gündüz et al., 2023]. Esto puede deberse a diferentes fuentes de datos empleadas en cada método o a variaciones en el procesamiento de los datos, combinadas con las características específicas de cada ubicación. Hemos observado previamente que tanto la topografía como las condiciones atmosféricas generan diferencias significativas en el retardo troposférico entre distintos lugares. Por lo tanto, es esencial implementar distintas herramientas que mejoren la estimación del efecto troposférico en el análisis de datos InSAR.

En este sentido, hemos propuesto un método de corrección troposférica que se basa principalmente en el uso de Redes Neuronales Recurrentes. En base a los resultados observados respecto a las variaciones espacio-temporales del retardo troposférico dadas por el clima y el relieve topográfico, hemos considerado las variables de tiempo, ubicación en el espacio y el retardo troposférico diario promedio (base de datos ADTC-InSAR generada en el capítulo 2).

El método implementado puede ser interpretado como un algoritmo que realiza ajustes al retardo troposférico diario promedio basándose en variables espacio-temporales. Las variables temporales suministran información acerca de las variaciones en las condiciones atmosféricas en distintas escalas de tiempo, mientras que las variables espaciales ofrecen información sobre cómo dichas condiciones varían según la ubicación geográfica (estas variaciones pueden ser observadas por ejemplo mediante mapas climáticos [Kottke et al., 2006; Peel et al., 2007; Beck et al. 2018]). Al aplicar Redes Neuronales Recurrentes y utilizar estas variables espacio-temporales, el método tiene la capacidad de modelar y ajustar de manera más efectiva las variaciones en el retardo troposférico, lo que resulta en una corrección más precisa y confiable para los datos InSAR.

Patrón	Fechas		Interf. original	Interferograma corregido con					
	Primaria image	Secondary image		GACOS	Lineal	era5	ADTC-InSAR	ML1	ML2
C	20030204	20050104	1.78	3.91	2.10	2.96	2.21	-7.12	2.12
	20031125	20070403	4.27	5.92	5.09	5.66	4.58	16.42	4.41
	20031125	20070508	4.33	6.36	6.70	5.71	4.17	34.85	4.45
	20040309	20070403	4.15	5.02	4.30	5.24	4.07	8.22	4.20
	20040309	20070508	4.28	5.52	7.73	5.34	3.75	24.79	4.62
	20061205	20080304	-2.62	-3.25	-3.32	-4.67	-1.27	4.39	-3.32
	20061205	20080408	-1.95	-3.51	-3.92	-2.72	-1.47	3.15	-2.85
	20070306	20080122	1.47	3.16	2.81	2.77	0.93	11.23	2.66
	20070306	20090311	-3.72	-4.54	-4.57	-4.65	-3.98	2.91	-4.73
	20070403	20081118	-4.33	-5.21	-5.25	-5.47	-4.32	-37.50	-6.77
	20070404	20090222	-5.53	-10.08	-8.79	-6.34	-4.41	1.68	-4.80
	20070424	20080304	-3.19	-3.17	-4.12	-5.01	-2.04	-10.46	-3.38
	20070508	20080108	-4.81	-7.75	-7.26	-7.13	-4.03	-25.59	-6.19
20071016	20080304	-0.61	0.39	-1.11	-2.52	0.61	-1.87	-0.64	
E	20030204	20050104	0.15	0.81	0.23	0.09	0.04	-4.45	0.37
	20031125	20070403	0.71	1.51	0.91	0.72	0.76	21.35	0.80
	20031125	20070508	2.11	2.70	2.72	2.33	2.17	24.02	1.77
	20040309	20070403	1.05	1.47	1.08	1.53	1.02	0.23	1.04
	20040309	20070508	2.33	2.53	3.19	3.02	2.31	2.90	2.33
	20061205	20080304	2.17	1.91	2.00	1.24	2.21	21.23	1.26
	20061205	20080408	0.39	-0.25	-0.09	0.34	0.41	20.87	-1.47
	20070306	20080122	5.48	5.86	5.82	5.70	5.45	5.50	5.38
	20070306	20090311	4.76	4.68	4.57	4.61	4.66	5.53	4.75
	20070403	20081118	2.23	1.70	2.02	2.22	2.17	-16.99	0.90
	20070404	20090222	0.11	-1.41	-0.70	0.19	-0.05	-1.60	-0.77
	20070424	20080304	1.53	1.60	1.30	0.45	1.63	0.14	1.49
	20070508	20080108	-1.25	-2.04	-1.87	-1.68	-1.31	-2.89	-1.40
20071016	20080304	3.29	3.87	3.18	2.28	3.39	19.05	3.65	

Tabla 12: Datos de imágenes ALOS PALSAR y Envisat utilizadas para generar interferogramas SAR.

El método propuesto ha mostrado buenos resultados, obteniendo correcciones troposféricas comparables a otras técnicas, particularmente GACOS (ver Tabla 12). Sin embargo, se han identificado ciertas limitaciones que es importante mencionar. Por ejemplo, el método puede no reconocer fenómenos que generan cambios atmosféricos a escalas anuales e interanuales, como la Oscilación Antártica, ENSO y el Modo Anular del Sur (SAM) [Díaz et al., 2001; Montecinos & Aceituno, 2003; Sarricolea & Martín-Vide, 2012; 2014; González-Reyes et al., 2021].

Otra limitación es que el método tiene un alcance geográfico limitado, siendo útil solamente en la Cordillera de Los Andes, específicamente en el rango de latitudes entre  $-37.85$  y  $-39.63$  °S, ya que fue entrenado específicamente en esta área y no se ha comprobado su eficacia en otros lugares. La complejidad topográfica en esta zona genera cambios significativos en la intensidad de las precipitaciones [Sarricolea et al., 2019], y este factor ha demostrado ser importante en el efecto troposférico.

Por lo tanto, sería beneficioso ampliar el área de recopilación de datos para el entrenamiento de

la red neuronal, de modo que pueda ser mejor entrenada y aplicable en más lugares de la Cordillera de Los Andes. De esta manera, se podría abordar la variabilidad geográfica y temporal de las condiciones atmosféricas, y mejorar la capacidad del método para capturar fenómenos de mayor escala temporal.

A pesar de las posibilidades de mejora, con la configuración y análisis de los resultados obtenidos al generar la corrección troposférica mediante redes neuronales recurrentes, se logra cumplir el objetivo “Desarrollar un método de corrección troposférica para datos InSAR, diseñado para la fácil implementación por parte del usuario y compatible con nuevas tecnologías, como el aprendizaje automático”.

## **Efecto troposférico y deformaciones volcánicas**

Dado que la ubicación y el relieve del volcán son determinantes en el tipo de clima predominante en determinado lugar y en su interacción con la atmósfera [Basist et al., 1994; Díaz et al., 2010; Sarricolea & Martín-Vide, 2012; 2014], las mediciones InSAR en parte de la Cordillera de Los Andes, particularmente en Chile, presentan complicaciones debido a su complejo relieve y su proximidad al océano Pacífico. La combinación de relieve y condiciones atmosféricas puede generar retardos troposféricos que se traducen en patrones en los interferogramas, los cuales pueden confundirse con deformaciones volcánicas [Giorgi et al., 2003; Sarricolea et al., 2019], lo que provoca incertidumbre en la interpretación de los interferogramas. Por ende, implementar técnicas que permitan discriminar entre retardo troposférico o deformación es crucial para el estudio de deformaciones volcánicas mediante InSAR. Esto motiva al cumplimiento del objetivo “desarrollar un método complementario para la identificación del retardo troposférico en datos InSAR, aplicado a la reinterpretación de procesos de deformación y actividad volcánica en los volcanes chilenos”.

Para esto, hemos propuesto un método que utiliza el algoritmo de k-means para agrupar distintos casos correspondientes al mismo volcán, según variables que relacionan el interferograma, la topografía y las correcciones troposféricas. El objetivo es ordenar los datos para una posterior

evaluación por parte del investigador, quien con la interpretación propuesta determinará qué casos presentan un efecto troposférico significativo. Las variables consideradas son: la correlación espacial entre la topografía y las correcciones troposféricas, la correlación entre topografía e interferograma, y el cambio de pendiente de secciones transversales al aplicar correcciones troposféricas a interferogramas.

En este método, la interpretación por parte del investigador implica que una alta correlación entre el interferograma y la topografía puede indicar la presencia de un efecto troposférico importante [Wendt et al., 2017]. Asimismo, una correlación significativa entre las correcciones troposféricas y la topografía también puede señalar la existencia de un efecto troposférico significativo. Además, en este caso, hemos incorporado una tercera variable que indica la diferencia de pendiente de los perfiles entre interferogramas corregidos y no corregidos con la corrección troposférica. Estos perfiles cruzan el patrón en cuestión y se dividen en dos secciones (sección 1 y 2). Si en las secciones 1 y 2 se presentan cambios de pendiente positivos y negativos, respectivamente, puede observarse un patrón en el interferograma que indica deflación. Los cambios de pendiente negativa y positiva, respectivamente, se asemejan a una inflación.

Basándonos en lo propuesto anteriormente, y utilizando el volcán Llaima con interferogramas relacionados con el ciclo eruptivo 2007-2009 como ejemplo, se generó tres grupos estadísticamente distintos. Por un lado, dos clusters están relacionados con un efecto troposférico importante, asociados a la visualización de inflación y deflación en un patrón cercano al centro del volcán. Por lo tanto, este patrón se asocia con un efecto troposférico significativo, como se ha observado en estudios previos [Fournier et al., 2010; Remy et al., 2015; Delgado et al., 2017], descartando así un efecto troposférico insignificante [Bathke et al., 2011], lo que, a su vez, dificulta la identificación de deformaciones co-eruptivas. Por otro lado, el tercer cluster muestra variables que no pueden asociarse con un efecto troposférico importante. Este cluster está relacionado con un patrón en el flanco Este del volcán, lo que permite confirmar la deformación volcánica en este sector. Por lo tanto, concluimos que esta deformación fue efectiva, y está asociada a la inestabilidad del terreno

debido a la erupción volcánica, como se ha señalado en estudios previos [Fournier et al., 2010; Delgado et al., 2017].

Un ejemplo adicional de la aplicación de este método se observa durante el ciclo eruptivo 2011-2012 en Cordón Caulle, donde se obtuvieron solo dos grupos (clusters) relacionados con un efecto troposférico marcadamente positivo e insignificante. A partir de estos resultados, se excluye la posibilidad de inflación pre-eruptiva, ya que está fuertemente vinculada a un efecto significativamente positivo. Estos hallazgos respaldan investigaciones previas [Wendt et al., 2017; Euillades et al., 2017].

Los casos propuestos resaltan la importancia de tener en cuenta las condiciones atmosféricas en las mediciones InSAR y la necesidad de incorporarlas en la evaluación de las deformaciones volcánicas. En este contexto, la inclusión de diversas correcciones troposféricas, cuya eficacia depende de las condiciones espacio-temporales [Bekaert et al., 2015b], puede indicar de manera conjunta un efecto troposférico significativo. Esta nueva variable proporciona información adicional en relación con la correlación, como se observa en el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Figura 20). Esto es especialmente relevante cuando el interferograma presenta pérdida de datos durante su procesamiento debido a la descorrelación espacial [Hooper et al., 2004], lo que afecta la estimación de la correlación entre la topografía y el interferograma. Por lo tanto, si ambos tipos de variables en este método indican la misma deformación, ya sea inflación o deflación, se puede afirmar con mayor certeza la presencia del efecto troposférico.

La incorporación del método de clasificación no supervisada k-means ha sido fundamental en este proceso para simplificar la labor y organizar la información de manera efectiva y objetiva. Esto ha posibilitado la formación de grupos estadísticamente distintos, como se ha corroborado a través del análisis de varianza multivariante (MANOVA) (valor- $p < 0.05$ ) y el Análisis de Componentes Principales (ACP) (Figura 20).

Generalmente, se consideran correlaciones entre el interferograma y la topografía, o se aplica un umbral de magnitud para la deformación con el fin de descartar la influencia relevante del efecto

troposférico en los datos [Shirzaei & Burgmann, 2012; Parker et al., 2015; Wendt et al., 2017]. No obstante, este método abre la puerta para evaluar diversas variables en el entorno de un volcán con el propósito de identificar posibles efectos troposféricos significativos que puedan confundirse con deformaciones volcánicas de pequeña magnitud. Dada la relevancia de las precipitaciones en el retardo troposférico durante la adquisición de las imágenes SAR, la inclusión de variables atmosféricas es esencial, especialmente en regiones como la SVZ, donde se producen precipitaciones orográficas [Garreud et al., 2017]. Pues, como se ha observado, las precipitaciones incrementan el retardo troposférico.

Sin embargo, es importante señalar que este método no permite combinar diferentes volcanes en un único análisis, ya que la clasificación mediante k-means no produce una agrupación adecuada debido a la falta de comparabilidad entre las variables. Como se ha observado previamente, las condiciones topográficas y atmosféricas específicas de cada volcán generan distintos comportamientos en el retardo troposférico.

Cabe mencionar que aplicando ambos métodos propuestos, corrección troposférica y detección del efecto troposférico, al volcán Llaima y Cordón Caulle, se aborda el cuarto objetivo “Verificar la validez y aplicabilidad de los métodos de estimación del error atmosférico, así como las interpretaciones InSAR, en el contexto de los volcanes chilenos”.



## Capítulo 6. Conclusiones

En este estudio, hemos investigado minuciosamente el impacto de la corrección troposférica en las mediciones de InSAR en entornos volcánicos, abordando tres aspectos fundamentales que son clave para comprender este proceso. En primer lugar, analizamos detalladamente la variación espacial y temporal del retardo troposférico diario, reconociendo su influencia en las mediciones precisas de deformación volcánica. Luego, nos centramos en la generación de una corrección troposférica precisa y efectiva, utilizando métodos basados en Aprendizaje Automático que aprovecharon datos recopilados a lo largo de varios años. Por último, establecimos una relación sólida entre el efecto troposférico y la deformación volcánica, permitiendo discernir y evaluar la verdadera naturaleza de los patrones observados en los interferogramas. Estas investigaciones nos han proporcionado una comprensión más profunda de cómo la corrección troposférica afecta las mediciones de InSAR en entornos volcánicos, destacando la importancia de considerar cuidadosamente estos aspectos al interpretar los datos obtenidos y brindando una base sólida para futuras investigaciones en este campo.

Un hallazgo de suma importancia es la identificación de variaciones espaciales y temporales en el retardo troposférico, las cuales guardan una estrecha relación con las características climáticas de cada región. Por ejemplo, en zonas volcánicas de clima seco, como la Zona Volcánica Central, se observó una predominancia abrumadora de la componente seca en comparación con la componente húmeda, con proporciones de 99%-1%. Por otro lado, en regiones volcánicas de clima predominantemente tropical, como la zona volcánica Norte, se detectó un cambio en la proporción, con una contribución del 90% de la componente seca y un 10% de la componente húmeda. Además, estas variaciones temporales están vinculadas a períodos de incremento en las precipitaciones, lo que conlleva a un aumento en la componente seca del retardo húmedo. Estos resultados resaltan la estrecha relación entre el retardo troposférico y el clima local, brindando valiosas perspectivas para la comprensión de los procesos atmosféricos que impactan en las mediciones de InSAR en áreas

volcánicas.

Con el objetivo de abordar la relación identificada entre las variaciones en el retardo troposférico y las variables espaciales y temporales, se propuso un enfoque innovador basado en Aprendizaje Automático para la generación de correcciones troposféricas. Este método empleó redes neuronales que utilizaron como entrada un promedio diario del retardo troposférico obtenido a partir de datos recopilados entre 2007 y 2011, junto con variables espaciales y temporales a diversas escalas de tiempo. La aplicabilidad de este enfoque se evaluó en el volcán Llaima, utilizando datos GPS asociados a volcanes ubicados entre el Copahue y el Lanín para su entrenamiento. Los resultados obtenidos revelaron la efectividad destacada de este método, que fue exitosamente comparado con las correcciones generadas mediante el uso de la técnica GACOS. Estos hallazgos enfatizan la relevancia fundamental de las variables espaciales y temporales en la generación precisa de correcciones troposféricas basadas en promedios diarios del retardo troposférico.

Además, se introdujo un enfoque basado en el algoritmo de k-means para establecer relaciones entre variables que abarcan el interferograma, las correcciones troposféricas y la topografía. Estos conjuntos de datos desempeñan un papel crucial en la capacidad de visualizar patrones en los interferogramas, siendo especialmente relevantes las variables asociadas a las correcciones troposféricas. Estas variables proporcionan información de gran importancia para determinar la influencia del efecto troposférico en las mediciones de InSAR en entornos volcánicos. Además, se destaca que la diferente topografía entre volcanes sigue presentando importancia en cómo se manifiesta el efecto troposférico en cada uno de ellos. El análisis detallado de estas variables en relación con la topografía específica de cada volcán permite comprender mejor las características individuales y la influencia del entorno en las mediciones de InSAR. Estos hallazgos subrayan la necesidad de considerar tanto las condiciones atmosféricas como la topografía al interpretar los interferogramas y resaltan la importancia de un enfoque integral para el estudio de los procesos volcánicos.

La aplicación del algoritmo de k-means permitió la formación de grupos que agrupan casos con características similares, lo que brinda la oportunidad de analizar minuciosamente el com-

portamiento de las variables en cada grupo y evaluar la relevancia del efecto troposférico. Este enfoque proporciona una herramienta efectiva para discernir si el patrón observado en los interferogramas se debe a una deformación volcánica o a factores atmosféricos. Como resultado, se lograron obtener conclusiones valiosas en el estudio de estos fenómenos volcánicos, permitiendo una mejor comprensión de su naturaleza y comportamiento.

En última instancia, con base en el método propuesto para discernir entre el efecto troposférico y la deformación volcánica, se descartaron las deformaciones vinculadas a procesos internos durante el ciclo volcánico 2007-2009 en el volcán Llaima. Sin embargo, se pudo confirmar la presencia de deformación en el flanco Este. Esta deformación específica se relaciona directamente con la inestabilidad del suelo generada por las erupciones volcánicas. Además, para el ciclo volcánico 2011-2012 en el Cordón Caulle, se descartó también una inflación precursora de la erupción de junio de 2011, ya que dichos patrones se generaron debido a un efecto troposférico importante. Estos hallazgos son fundamentales para comprender y caracterizar los efectos de las actividades volcánicas en el entorno. Y el método es aplicable a datos InSAR en otros volcanes que puedan ser cuestionables debido a las condiciones atmosféricas y topográficas presentes.

En resumen, esta investigación destaca la importancia crucial del efecto troposférico en la interpretación de mediciones realizadas en contextos volcánicos mediante InSAR. Las características topográficas propias de los volcanes y las variaciones atmosféricas inherentes a las regiones en las que se encuentran pueden inducir patrones en los interferogramas que no están directamente relacionados con deformaciones volcánicas. Estas interferencias, si no se manejan adecuadamente, podrían llevar a interpretaciones incorrectas de los datos, comprometiendo la validez de las conclusiones científicas.

En el núcleo de nuestra investigación está la adopción de algoritmos de Aprendizaje Automático, específicamente k-means (como sistema básico) y el uso de las metodologías más avanzadas en Redes Neuronales en la actualidad. Estas herramientas no solo han demostrado su potencial en la corrección de estas perturbaciones troposféricas, sino también en la capacidad de discernir, con

un alto grado de precisión, entre deformaciones genuinas relacionadas con la actividad volcánica y aquellas inducidas por variaciones atmosféricas. El análisis minucioso de los patrones en los interferogramas, potenciado por estos algoritmos, ha sido fundamental para la identificación precisa de las deformaciones volcánicas y la eliminación de posibles factores de confusión atmosféricos.

La aplicación rigurosa de estas técnicas avanzadas, complementada con un profundo entendimiento de la geología y meteorología de las regiones estudiadas, ha permitido mejorar sustancialmente nuestra comprensión sobre los procesos volcánicos y su manifestación en mediciones de InSAR. Los hallazgos presentados en esta tesis no solo tienen implicaciones para el estudio detallado de los volcanes abordados, sino que sientan un precedente y brindan una base metodológica robusta para futuras investigaciones y esfuerzos de monitoreo en otros volcanes alrededor del mundo.

En conclusión, la importancia observada de las variaciones de los retardos troposféricos diarios en relación con el espacio y el tiempo resalta la necesidad de un método preciso para determinar estos retardos. Se sostiene que "la interpretación de deformaciones de pequeña magnitud en áreas volcánicas de los Andes del Sur está condicionada significativamente por el retardo atmosférico de la señal SAR. Esto genera interpretaciones contrastantes que pueden ser resueltas con un método de corrección mejorado". Es fundamental destacar que, para una interpretación completa de los resultados InSAR, se requiere un método que permita la discriminación entre el efecto troposférico y la deformación volcánica, como se propone en el capítulo 4, ya que pequeñas deformaciones pueden ocultarse bajo el efecto troposférico debido a las condiciones atmosféricas en interacción con la topografía.

## Referencias

- [1] Abdi, H., Williams, L.J. (2010), Principal component analysis. *WIREs Comp Stat*, 2: 433-459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- [2] Acocella, V. (2021a). Volcano Monitoring. In: *Volcano-Tectonic Processes. Advances in Volcanology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65968-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65968-4_8)
- [3] Acocella, V. (2021b). Volcanoes Along Convergent Plate Boundaries. 10.1007/978-3-030-65968-4\_12.
- [4] Alam, A., Bhat, M.S., Maheen, M. Using Landsat satellite data for assessing the land use and land cover change in Kashmir valley. *GeoJournal* 85, 1529–1543 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10037-x>
- [5] Albino, F., Biggs, J., Yu, C., Li, Z. (2020). Automated methods for detecting volcanic deformation using Sentinel-1 InSAR time series illustrated by the 2017–2018 unrest at Agung, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125, e2019JB017908. <https://doi.org/10.1029/2019JB017908>
- [6] Alcantara, C., Kuemmerle, T., Prishchepov, A.V., Radeloff, V.C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data, *Remote Sensing of Environment*, Volume 124, 2012, Pages 334-347, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.019>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002222>
- [7] Alfano, F., Bonadonna, C., Gurioli, L. (2012). Insights into eruption dynamics from textural analysis: The case of the May, 2008, Chaitén eruption. *Bulletin of Volcanology*. 74. 10.1007/s00445-012-0648-3.
- [8] Amigo, A. (2021) “Volcano monitoring and hazard assessments in Chile”, *Volcanica*, 4(S1), pp. 1–20. doi: 10.30909/vol.04.S1.0120.

- [9] Amjad, M., Yilmaz, M.T., Yucel, I., Yilmaz, K.K. Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography, *Journal of Hydrology*, Volume 584, 2020, 124707, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>.
- [10] Anantrasirichai, N., Biggs, J., Albino, F., Hill, P., Bull, D. R. (2018). Application of machine learning to classification of volcanic deformation in routinely generated InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 6592–6606. <https://doi.org/10.1029/2018JB015911>
- [11] Ansari, H., Rußwurm, M., Ali, M., Montazeri, S., Parizzi A., Zhu, X.X. InSAR Displacement Time Series Mining: A Machine Learning Approach. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021, pp. 3301-3304, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553465.
- [12] Ana Astort, Gregorio Boixart, Andrés Folguera, Maurizio Battaglia. Volcanic unrest at Nevados de Chillán (Southern Andean Volcanic Zone) from January 2019 to November 2020, imaged by DInSAR. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 427, 2022, 107568, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107568>.
- [13] Barclay, J., Few, R., Armijos, M. T., Phillips, J. C., Pyle, D. M., Hicks, A., Brown S.K., Robertson, R. E. (2019). Livelihoods, wellbeing and the risk to life during volcanic eruptions. *Frontiers in Earth Science*, 7, 205.
- [14] Basist, A., Bell, G. D., Meentemeyer, V. (1994). Statistical Relationships between Topography and Precipitation Patterns, *Journal of Climate*, 7(9), 1305-1315. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<1305:SRBTAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<1305:SRBTAP>2.0.CO;2)

- [15] Basualto, D., Rivas, F., Cayupi, J., Medrano, J. (2011). Simulacro de evacuación ante una erupción del volcán Llaima: Geoparque Kutralcura en Alerta. In En actas del I Simposio de Geoparques y Geoturismo en Chile (pp. 18-22).
- [16] Bathke, H., Shirzaei, M., and Walter, T. R. (2011), Inflation and deflation at the steep-sided Llaima stratovolcano (Chile) detected by using InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10304, doi:10.1029/2011GL047168.
- [17] Peter J. Baxter, Austin Gresham. Deaths and injuries in the eruption of Galeras Volcano, Colombia, 14 January 1993. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 77, Issues 1–4, 1997, Pages 325-338, ISSN 0377-0273, [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00103-5).<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027396001035>.
- [18] Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. et al. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* 5, 180214 (2018). <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- [19] Bekaert, D. P. S., Hooper, A. and Wright, T. J. (2015a), A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120: 1345–1356. doi: 10.1002/2014JB011558.
- [20] Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A.J., Parker, D.J. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, Volume 170, 2015b, Pages 40-47, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715301231>.
- [21] Bertin, D., Amigo, A., Bertin, L. (2015, October). Erupción del volcán Villarrica 2015: Productos emitidos y volumen involucrado. In *Proceedings of the XIV Congreso Geológico Chileno*, La Serena, Chile (pp. 4-8).

- [22] Biggs, J., Lu, Z., Fournier, T., and Freymueller, J. T. (2010), Magma flux at Okmok Volcano, Alaska, from a joint inversion of continuous GPS, campaign GPS, and interferometric synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, 115, B12401, doi:10.1029/2010JB007577.
- [23] Biggs, J., Pritchard, M.E. Global Volcano Monitoring: What Does It Mean When Volcanoes Deform?. *Elements* 2017;; 13 (1): 17–22. doi: <https://doi.org/10.2113/gselements.13.1.17>
- [24] Brengman, C. M. J., Barnhart, W. D. (2021). Identification of surface deformation in InSAR using machine learning. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2020GC009204. <https://doi.org/10.1029/2020GC009204>
- [25] Brunori, C.A., Bignami, C., Stramondo, S., Bustos, E. 20 years of active deformation on volcano caldera: Joint analysis of InSAR and AInSAR techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 23, 2013, Pages 279-287, ISSN 1569-8432, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243412002036>.
- [26] Cao, Y., Jónsson, S., Li, Z. (2021a). Advanced InSAR tropospheric corrections from global atmospheric models that incorporate spatial stochastic properties of the troposphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020952. <https://doi.org/10.1029/2020JB020952>
- [27] Cao, Y., Jónsson, S., Li. 2021b. Robust InSAR Tropospheric Delay Correction Using Global Atmospheric Models. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. doi:10.5194/egusphere-egu21-11636
- [28] Caselli, A., Agosto, M., Velez, M.L., Forte, P., Bengoa, C., Daga, R., Albite, J.M., Capaccioni, B. The 2012 Eruption, Tassi, F., Vaselli, O., Caselli, A.T. (2016). The 2012 Eruption. In: Tassi, F., Vaselli, O., Caselli, A. (eds) *Copahue Volcano. Active Volcanoes of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2_4)



- [29] Cayol, V., Cornet, F. H. (1998). Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes—Application to Etna. *Geophysical Research Letters*, 25(11), 1979-1982.
- [30] Cevallos Culqui, A., Rodríguez Bárcenas, G., Cantuña Flores, K., Rubio Peñaherrera, J. (2018). Plataforma con Información Geográfica, de Apoyo al Plan de Evacuación Latacunga, en caso de erupción del Volcán Cotopaxi. *Ciencia*, 19(2). <https://doi.org/10.24133/ciencia.v19i2.285>
- [31] Cerón, W. L., Kayano, M.T., Andreoli, R. V., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., Alfonso-Morales W. (2021). Rainfall Variability in Southwestern Colombia: Changes in ENSO-Related Features . *Pure and Applied Geophysics*, (), -. doi:10.1007/s00024-021-02673-7
- [32] Chang, W.-L., Smith, R. B., Farrell, J., and Puskas, C. M. (2010), An extraordinary episode of Yellowstone caldera uplift, 2004–2010, from GPS and InSAR observations, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L23302, doi:10.1029/2010GL045451.
- [33] Charrad, M., Ghazzali, . N., Boiteau, V., Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
- [34] Chen, C.; Dai, K.; Tang, X.; Cheng, J.; Pirasteh, S.; Wu, M.; Shi, X.; Zhou, H.; Li, Z. Removing InSAR Topography-Dependent Atmospheric Effect Based on Deep Learning. *Remote Sens.* 2022, 14, 4171. <https://doi.org/10.3390/rs14174171>
- [35] Donna Cortez, Sebastián Herrera, Daniela Araya-Osses, Carolina Caroca, Rodrigo Padilla, Juan Manuel Uribe Manuel Paneque (2021) Topoclimatic zoning of continental Chile, *Journal of Maps*, 17:2, 114-124, DOI: 10.1080/17445647.2021.1886188
- [36] Dai, K., Deng, J., Xu, Q., Li, Z., Shi, X., Hancock, C., Wen, N., Zhang L., Zhuo G. (2022) Interpretation and sensitivity analysis of the InSAR line of sight displace-

- ments in landslide measurements, *GIScience Remote Sensing*, 59:1, 1226-1242, DOI: 10.1080/15481603.2022.2100054
- [37] Dalmiya, S., Dasgupta, A., Datta, S. K. (2012). Application of wavelet based k-means algorithm in mammogram segmentation. *International Journal of Computer Applications*, 52(15).
- [38] Delgado, F., Pritchard, M. E., Basualto, D., Lazo, J., Córdova, L., and Lara, L. E. (2016), Rapid reinflation following the 2011–2012 rhyodacite eruption at Cordón Caulle volcano (Southern Andes) imaged by InSAR: Evidence for magma reservoir refill, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 9552– 9562, doi:10.1002/2016GL070066.
- [39] Delgado, F., Pritchard, M.E., Ebmeier, S., González, P., Lara, L. Recent unrest (2002–2015) imaged by space geodesy at the highest risk Chilean volcanoes: Villarrica, Llaima, and Calbuco (Southern Andes), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 344, 2017, Pages 270-288, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.020>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027317303086>.
- [40] Delgado, F., Pritchard, M., Samsonov, S., Córdova, L. (2018). Renewed post-eruptive uplift following the 2011–2012 rhyolitic eruption of Cordón Caulle (Southern Andes, Chile): Evidence for transient episodes of magma reservoir recharge during 2012–2018. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 9407– 9429. <https://doi.org/10.1029/2018JB016240>
- [41] Delgado, F., Contreras-Arratia, R., Samsonov, S. Magma buoyancy drives rhyolitic eruptions: A tale from the VEI 5 2008-2009 Chaitén eruption (Chile) from seismological and geodetic data. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 590, 2022, 117564, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117564>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X2200200X>.
- [42] Di Castri, F., Hajek, E. R. (1976). *Bioclimatología de Chile* (Vol. 128). Universidad Católica de Chile, Vicerrectoría Académica.

- [43] Diaz, H.F., Hoerling, M.P. and Eischeid, J.K. (2001), ENSO variability, teleconnections and climate change. *Int. J. Climatol.*, 21: 1845-1862. <https://doi.org/10.1002/joc.631>
- [44] Díaz, D., Morales, L., Castellaro, G., Neira, F. (2010). Topoclimatic modeling of thermopluviometric variables for the Bío Bío and La Araucanía Regions, Chile.
- [45] Doin, M.-P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O., Doubre, C. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 69, Issue 1, 2009, Pages 35-50, ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.03.010>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985109000603>.
- [46] Dong, J., Zhang, Lu., Liao, M., Gong, J. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring, *Remote Sensing of Environment*, Volume 233, 2019, 111370, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111370>.
- [47] El Naqa, I., Murphy, M.J. (2015). What Is Machine Learning?. In: El Naqa, I., Li, R., Murphy, M. (eds) *Machine Learning in Radiation Oncology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18305-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18305-3_1)
- [48] Elissondo, M., Baumann, V., Bonadonna, C., Pistolesi, M., Cioni, R., Bertagnini, A., Biass, S., Herrero, J.-C., and Gonzalez, R.: Chronology and impact of the 2011 Cordón Caulle eruption, Chile, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 675–704, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-675-2016>, 2016.
- [49] Elliott, J. R., Biggs, J., Parsons, B., and Wright, T. J. (2008), InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12309, doi:10.1029/2008GL033659.

- [50] Elliott, J., Walters, R., Wright, T. The role of space-based observation in understanding and responding to active tectonics and earthquakes. *Nat Commun* 7, 13844 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms13844>
- [51] Espinoza J. C., Garreaud R., Poveda G., Arias P. A., Molina-Carpio J., Masiokas M., Viale M., Scaff L. Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features, *Frontiers in Earth Science*, 8, 2020, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00064>, 10.3389/feart.2020.00064, 2296-6463
- [52] Euillades, P. A., Velez, M. L., Meljem, M., Cadelli, A., Martinez-Diaz, J. J. (2008). DInSAR SBAS data processing in the southern Andes: The Copahue-Agrico Caldera study case, paper presented at 4th Alexander von Humboldt International Conference. Eur. Geosci. Union, Santiago.
- [53] Euillades, P.A., Euillades, L.D., Blanco, M.H., Velez, M.L., Grosse, P., Sosa, G.J. Co-eruptive subsidence and post-eruptive uplift associated with the 2011–2012 eruption of Puyehue-Cordón Caulle, Chile, revealed by DInSAR, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 344, 2017, Pages 257-269, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.023>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027317303979>).
- [54] Euillades, P., Euillades, L., Pepe, A., Mastro, P., Falabella, F., Imperatore, P., Tang, Y., Rosell, P. Recent advancements in multi-temporal methods applied to new generation SAR systems and applications in South America, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 111, 2021, 103410, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103410>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981121002571>.
- [55] European Space Agency, ASA\_IMS\_1P - Level 1 product for ENVISAT ASAR Image Mode. [https://esar-ds.eo.esa.int/oads/access/collection/ASA\\_IMS\\_1P](https://esar-ds.eo.esa.int/oads/access/collection/ASA_IMS_1P). Access: 10-17 Au-

gust 2020

- [56] Falvey, M., Garreaud, R. (2007). Wintertime Precipitation Episodes in Central Chile: Associated Meteorological Conditions and Orographic Influences, *Journal of Hydrometeorology*, 8(2), 171-193. doi: <https://doi.org/10.1175/JHM562.1>
- [57] Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- [58] Fattahi, H., Amelung, F. (2015), InSAR bias and uncertainty due to the systematic and stochastic tropospheric delay, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 8758– 8773, doi:10.1002/2015JB012419.
- [59] Feulner, G., Rahmstorf, S., Levermann, A., Volkwardt, S. (2013). On the Origin of the Surface Air Temperature Difference between the Hemispheres in Earth’s Present-Day Climate, *Journal of Climate*, 26(18), 7136-7150. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00636.1>
- [60] Filonchyk, M., Yan, H., Shareef, T.M.E., Yang, S. Aerosol contamination survey during dust storm process in Northwestern China using ground, satellite observations and atmospheric modeling data. *Theor Appl Climatol* 135, 119–133 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2362-8>
- [61] Fournier, T. J., Pritchard, M. E., and Riddick, S. N. (2010), Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q01003, doi:10.1029/2009GC002558.
- [62] Franco, L., Palma, J.L., ara, L.E., Gil-Cruz, F., Cardona, C., Basualto, D., San Martín, J. Eruptive sequence and seismic activity of Llaima volcano (Chile) during

the 2007–2009 eruptive period: Inferences of the magmatic feeding system, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 379, 2019, Pages 90-105, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.04.014>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027318305031>.

- [63] Fujiwara, S., Tobita, M., Sato, H.P., Ozawa, S., Une, H., Koarai, M., Nakai, H., Fujiwara, M., Yarai, H., Nishimura, T., Hayashi, F. (2006), Satellite data gives snapshot of the 2005 Pakistan earthquake, *Eos Trans. AGU*, 87( 7), 73– 77, doi:10.1029/2006EO070001.
- [64] Gaete, A., Walter, T. R., Bredemeyer, S., Zimmer, M., Kujawa, C., Franco Marin, L., Bucarey Parra, C. (2020). Processes culminating in the 2015 phreatic explosion at Lascar volcano, Chile, evidenced by multiparametric data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 377-397.
- [65] Garreaud, R. (1999). Multiscale Analysis of the Summertime Precipitation over the Central Andes, *Monthly Weather Review*, 127(5), 901-921. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0901:MAOTSPj2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0901:MAOTSPj2.0.CO;2)
- [66] Garreaud, R., Vuille, M., Clement, A.C. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Volume 194, Issues 1–3, 2003, Pages 5-22, ISSN 0031-0182, [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018203002694>.
- [67] Garreaud, R. D., Aceituno, P. (2007). Atmospheric circulation and climatic variability. *The physical geography of South America*, 45, 59.
- [68] Garreaud, R. D.: The Andes climate and weather, *Adv. Geosci.*, 22, 3–11, <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>, 2009.

- [69] Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M.: The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327, <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>, 2017.
- [70] Giorgi, F., Francisco, R., Pal, J. (2003). Effects of a Subgrid-Scale Topography and Land Use Scheme on the Simulation of Surface Climate and Hydrology. Part I: Effects of Temperature and Water Vapor Disaggregation, *Journal of Hydrometeorology*, 4(2), 317-333. doi: [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)4;317:EOASTA;2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)4;317:EOASTA;2.0.CO;2)
- [71] González-Reyes, Á., Jacques-Coper, M., Muñoz, A. A. (2021). Seasonal precipitation in south-central Chile: Trends in extreme events since 1900. *Atmósfera*, 34(4), 371-384.
- [72] Gong, W.; Zhao, D.; Zhu, C.; Zhang, Y.; Li, C.; Zhang, G.; Shan, X. A New Method for InSAR Stratified Tropospheric Delay Correction Facilitating Refinement of Coseismic Displacement Fields of Small-to-Moderate Earthquakes. *Remote Sens.* 2022, 14, 1425. <https://doi.org/10.3390/rs14061425>
- [73] P. Govender, V. Sivakumar, Application of k-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019), *Atmospheric Pollution Research*, Volume 11, Issue 1, 2020, Pages 40-56, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.009>.
- [74] Gündüz, H.İ., Yilmaztürk, F., Orhan, O. Una investigación de la deformación del suelo volcánico utilizando observaciones InSAR en el volcán Tendürek (Turquía). *aplicación ciencia* 2023 , 13 , 6787. <https://doi.org/10.3390/app13116787>
- [75] Hagan, M. T., Demuth, H. B.”Neural networks for control,” *Proceedings of the 1999 American Control Conference* (Cat. No. 99CH36251), San Diego, CA, USA, 1999, pp. 1642-1656 vol.3, doi: 10.1109/ACC.1999.786109.

- [76] Haji-Aghajany, S., Amerian, Y. Three dimensional ray tracing technique for tropospheric water vapor tomography using GPS measurements, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 164, 2017, Pages 81-88, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682617301554>.
- [77] Haji-Aghajany, S., Voosoghi, B., Yazdian, A. (2017) Estimation of north Tabriz fault parameters using neural networks and 3D tropospherically corrected surface displacement field, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8:2, 918-932, DOI: 10.1080/19475705.2017.1289248
- [78] Haji-Aghajany, S., Voosoghi, B., Amerian, Y. Estimating the slip rate on the north Tabriz fault (Iran) from InSAR measurements with tropospheric correction using 3D ray tracing technique. *Advances in Space Research*, Volume 64, Issue 11, 2019, Pages 2199-2208, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.021>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719306040>.
- [79] Haji-Aghajany, S., Amerian, Y. Atmospheric phase screen estimation for land subsidence evaluation by InSAR time series analysis in Kurdistan, Iran. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 205, 2020, 105314, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105314>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682620301292>.
- [80] Halder, S.k. 2013. Chapter 9 - Statistical and Geostatistical Applications in Geology, Editor(s): S.K. Halder, Mineral Exploration, Elsevier, Pages 157-182, ISBN 9780124160057, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416005-7.00009-X>.
- [81] Hall, M. L., Wood C. A. Volcano-tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology* 1985;; 13 (3): 203–207. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13;203:VSOTNA;2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13;203:VSOTNA;2.0.CO;2)



- [82] Hanssen, R., Feijt, A. (1997). A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry. In *ERS SAR Interferometry* (Vol. 406, p. 277).
- [83] Hanssen, R. F. (2001). Remote sensing and digital image processing. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Earth and Environmental Science, 2, 200-210.
- [84] Hartigan, J. A., Wong, M. A. (1979). A k-means clustering algorithm. *Applied statistics*, 28(1), 100-108.
- [85] Henderson, S. T., and Pritchard, M. E. (2013), Decadal volcanic deformation in the Central Andes Volcanic Zone revealed by InSAR time series, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 1358–1374, doi:10.1002/ggge.20074.
- [86] Herd, D. G. (1986), The 1985 Ruiz Volcano disaster, *Eos Trans. AGU*, 67( 19), 457– 460, doi:10.1029/EO067i019p00457-03.
- [87] Hernández Serrato, A., Noboa Tobar, J. (2021). Monitoreo de la deformación del Volcán Nevado del Ruiz mediante el procesamiento de datos GNSS a través del Sistema de Referencia Espacial Canadiense.
- [88] Hofmeister, A. (2016). Determination of path delays in the atmosphere for geodetic VLBI by means of ray-tracing [Dissertation, Technische Universität Wien]. [repositUM. https://doi.org/10.34726/hss.2016.21899](https://doi.org/10.34726/hss.2016.21899)
- [89] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. (2004), A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- [90] Horwell, C.J., Baxter, P.J. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bull Volcanol* 69, 1–24 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>

- [91] Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>
- [92] Hurtado, A. F. (2009). Estimacion de los Campos Mensuales Historicos de Precipitacio ´n en el Territorio Colombiano. Tesis de Grado (Maestría).
- [93] Iliev, A., Kyurkchiev, N., Markov, S. On the approximation of the step function by some sigmoid functions. *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 133, 2017, Pages 223-234, ISSN 0378-4754, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.11.005>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378475415002554>.
- [94] Dataset: © JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 2007. Accessed through ASF DAAC 10-17 August 2020
- [95] Jaillard, E., Hérail, G., Monfret, T., Díaz-Martínez, E., Baby, P., Lavenu, A., Dumont, J.F. (2000). Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northern Chile. *Tectonic evolution of South America*, edited by: Cordani, UG, Milani, EJ, Thomaz Filho, A., and Campos, DA, Rio de Janeiro, Brazil, 481-559.
- [96] Jay, J., Costa, F., Pritchard, M., Lara, L., Singer, B., Herrin, J. Locating magma reservoirs using InSAR and petrology before and during the 2011–2012 Cordón Caulle silicic eruption, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 395, 2014, Pages 254-266, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.046>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X14001988>.
- [97] Johnson, J. B., and Palma, J. L. (2015), Lahar infrasound associated with Volcán Villarrica’s 3 March 2015 eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL065024.
- [98] Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M.-P., and Peltzer, G. (2011), Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17311, doi:10.1029/2011GL048757.

- [99] Jolivet, R., Agram, P. S., Lin, N. Y., Simons, M., Doin, M.-P., Peltzer, G., and Li, Z. (2014), Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 2324– 2341, doi:10.1002/2013JB010588.
- [100] Kaufmann, J., Schering, A. (2007). Analysis of Variance ANOVA. In *Wiley Encyclopedia of Clinical Trials* (eds R.B. D’Agostino, L. Sullivan and J. Massaro). <https://doi.org/10.1002/9780471462422.eoct017>
- [101] Khanzode, K. C. A., Sarode, R. D. (2020). Advantages and disadvantages of artificial intelligence and machine learning: A literature review. *International Journal of Library & Information Science (IJLIS)*, 9(1), 3.
- [102] Klemas, V. Fisheries applications of remote sensing: An overview, *Fisheries Research*, Volume 148, 2013, Pages 124-136, ISSN 0165-7836, <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.02.027>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165783612001075>
- [103] Kingma, D. P., Ba, J. (2014). Adam: A method for stochastic optimization. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
- [104] Kotttek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.
- [105] Kroese, D.P., Brereton, T., Taimre, T. and Botev, Z.I. (2014), Why the Monte Carlo method is so important today. *WIREs Comput Stat*, 6: 386-392. <https://doi.org/10.1002/wics.1314>
- [106] Kurita, T. (2020). Principal Component Analysis (PCA). In: *Computer Vision*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2\\_649-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_649-1)
- [107] Lara, L.E., Flores, F., Calderón, R., Cardona, C. Chapter 17 - Volcano hazards and risks in Chile. Editor(s): Paolo Papale, In *Hazards and Disasters Series, Forecasting and Planning for Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*, Elsevier, Volume 2, 2021, Pages

617-633, ISBN 9780128180822, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818082-2.00017-2>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128180822000172>.

- [108] Le Mével, H., Gregg, P. M., and Feigl, K. L. (2016), Magma injection into a long-lived reservoir to explain geodetically measured uplift: Application to the 2007–2014 unrest episode at Laguna del Maule volcanic field, Chile, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6092–6108, doi:10.1002/2016JB013066.
- [109] Le Mével, H., Córdova, L., Cardona, C., Feigl, K.L. Unrest at the Laguna del Maule volcanic field 2005–2020: renewed acceleration of deformation. *Bull Volcanol* 83, 39 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01457-0>
- [110] Lechner, H.N., Rouleau, M.D. Should we stay or should we go now? Factors affecting evacuation decisions at Pacaya volcano, Guatemala, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 40, 2019, 101160, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101160>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420918310458>
- [111] Lee, S., Oh, O., Kim, Y., Kim, D., Hussey, D. S., Wang, G., Lee, S. W. (2020). Deep learning for high-resolution and high-sensitivity interferometric phase contrast imaging. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12.
- [112] Lenters, J. D., Cook, K. H. (1999). Summertime Precipitation Variability over South America: Role of the Large-Scale Circulation, *Monthly Weather Review*, 127(3), 409-431. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2)
- [113] Li, Z., Duan, M., Cao, Y., Mu, M., He, X., Wei, J. Mitigation of time-series InSAR turbulent atmospheric phase noise: A review. *Geodesy and Geodynamics*, Volume 13, Issue 2, 2022, Pages 93-103, ISSN 1674-9847, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.12.002>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674984721000987>.

- [114] Li, Y., Jiang, W., Li, Y., Shen, W., He, Z., Li, B., Li, Q., Jiao, Q., Tian, Y. Coseismic Rupture Model and Tectonic Implications of the January 7 2022, Menyuan Mw 6.6 Earthquake Constraints from InSAR Observations and Field Investigation. *Remote Sens.* 2022, 14, 2111. <https://doi.org/10.3390/rs14092111>
- [115] Liu, F., Elliott, J. R., Craig, T. J., Hooper, A., Wright, T. J. (2021). Improving the resolving power of InSAR for earthquakes using time series: A case study in Iran. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093043. <https://doi.org/10.1029/2021GL093043>
- [116] Liu, Z., Qiu, H., Zhu, Y., Liu, Y., Yang, D., Ma, S., Zhang, J., Wang, Y., Wang, L., Tang, B. Efficient Identification and Monitoring of Landslides by Time-Series InSAR Combining Single- and Multi-Look Phases. *Remote Sens.* 2022, 14, 1026. <https://doi.org/10.3390/rs14041026>
- [117] Lloyd, S. "Least squares quantization in PCM," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129-137, March 1982, doi: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- [118] Londoño, J.M. Evidence of recent deep magmatic activity at Cerro Bravo-Cerro Machín volcanic complex, central Colombia. Implications for future volcanic activity at Nevado del Ruiz, Cerro Machín and other volcanoes, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 324, 2016, Pages 156-168, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027316301299>.
- [119] Londoño, J.M., Kumagai, H. 4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000–2016, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 358, 2018, Pages 105-123, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.015>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027317305693>.
- [120] Lopez-Escobar, L.; Cembrano, J.; Moreno, H. 1995, Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46°S). *Revista Geológica de Chile* 22 (2) : 219-234. .

- [121] Lopez-Pozo, F., Abarca-del-Rio, R. Lara, L.E. ADTC-InSAR: a tropospheric correction database for Andean volcanoes. *Sci Data* 9, 526 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01630-w>
- [122] Lu, Z., Kwoun, O., Rykhus, R. (2007). Interferometric synthetic aperture radar (InSAR): its past, present and future. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 73(3), 217.
- [123] Lundgren, P., Kiryukhin, A., Milillo, P., Samsonov, S., Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 307, 2015, Pages 79-88, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027315001432>.
- [124] Lundgren, P., Samsonov, S. V., López Velez, C. M., and Ordoñez, M. (2015), Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4816– 4823. doi: 10.1002/2015GL063858.
- [125] Lundgren, P., Nikkhoo, M., Samsonov, S. V., Milillo, P., Gil-Cruz, F., and Lazo, J. (2017), Source model for the Copahue volcano magma plumbing system constrained by InSAR surface deformation observations, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 5729– 5747, doi:10.1002/2017JB014368.
- [126] Major, J. J., Lara, L. E. (2013). Overview of Chaitén Volcano, Chile, and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*, 40(2), 196-215.
- [127] Mahesh, B. (2020). Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9, 381-386.
- [128] Martínez, S., Ramil, P., Chuvieco, E. Monitoring loss of biodiversity in cultural landscapes. New methodology based on satellite data, *Landscape and Urban Planning*, Volume 94, Issue

- 2, 2010, Pages 127-140, ISSN 0169-2046, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.08.006>.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204609001728>
- [129] Massonnet, D., Briole, P. Arnaud, A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature* 375, 567–570 (1995). <https://doi.org/10.1038/375567a0>
- [130] Matgen, P., Schumann, G., Henry, J. B., Hoffmann, L., Pfister, L. (2007). Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(3), 247-263. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.003>
- [131] MATLAB. 2019. R2019a (The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2019)
- [132] Medsker, L. R., Jain, L. C. (2001). Recurrent neural networks. *Design and Applications*, 5, 64-67.
- [133] Misra, P., Enge, P. (2006). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance—Revised Second Edition* (2011). *Int. J. Wirel. Inf. Netw*, 206, 43.
- [134] Montecinos, A., Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies, *Journal of Climate*, 16(2), 281-296. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016;0281:SOTERR;2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016;0281:SOTERR;2.0.CO;2)
- [135] Moreno, H., Naranjo, J.A., Peña, P., Muñoz, J., Basualto, D., Delgado, C., Gallegos, C., Dungan, M., Maisonneuve, C. (2009). El ciclo eruptivo 2007-2009 del volcán Llaima, Andes del sur. *Santiago*, 22, S7 018.
- [136] Moretto, S.; Bozzano, F.; Mazzanti, P. The Role of Satellite InSAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings. *Remote Sens.* 2021, 13, 3735. <https://doi.org/10.3390/rs13183735>

- [137] Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., Hooper, A. LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sens.* 2020, 12, 424. <https://doi.org/10.3390/rs12030424>
- [138] Moussallam, Y., Bani, P., Schipper, C. I., Cardona, C., Franco, L., Barnie, T., Amigo, Á, Curtis, A., Peters, N., Aiuppa, A. (2018). Unrest at the Nevados de Chillán volcanic complex: a failed or yet to unfold magmatic eruption?. *Volcanica*, 1(1), 19-32.
- [139] Muñoz Sabater, J., et al. Era5-land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Accessed on 23-12-2020 and 01-03-2021)) <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- [140] Muñoz Sabater, J., et al. Era5-land hourly data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 23-12-2020 and 01-03-2021)) <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- [141] Murugan, D., Garg A., Singh, D. "Desarrollo de un enfoque adaptativo para el monitoreo de agricultura de precisión con datos de drones y satélites", en *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* , vol. 10, núm. 12, págs. 5322-5328, diciembre de 2017, doi: 10.1109/JSTARS.2017.2746185.
- [142] Naghibi, S.A., Khodaei, B., Hashemi, H. An integrated InSAR-machine learning approach for ground deformation rate modeling in arid areas. *Journal of Hydrology*, Volume 608, 2022, 127627, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127627>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169422002025>
- [143] Nair, V., Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. In *Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10)* (pp. 807-814).



- [144] Naranjo, J.L., Sigurdsson, H., Carey, S.N., Fritz, W. Eruption of the Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, On 13 November 1985: Tephra Fall and Lahars. *Science* 233, 961-963 (1986). DOI:10.1126/science.233.4767.961
- [145] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Volume 10, Issue 3, 1970, Pages 282-290, ISSN 0022-1694, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- [146] NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)(2013). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. Distributed by OpenTopography.. <https://www.fdsn.org/networks/detail/GH/>, DOI:org/10.5069/G9445JDF
- [147] Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Volume 10, Issue 3, 1970, Pages 282-290, ISSN 0022-1694, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>
- [148] Nikkhoo, M., Walter, T.R., Lundgren, P.R., Prats-Iraola, P. Compound dislocation models (CDMs) for volcano deformation analyses, *Geophysical Journal International*, Volume 208, Issue 2, February 2017, Pages 877–894, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw427>
- [149] Novoa, C. Gerbault, M., Remy, D., Cembrano, J., Lara, L.E., Ruz-Ginouves, J., Tassara, A., Baez, J.C., Hassani, R., Bonvalot, S., Contreras-Arratia, R. The 2011 Cordón Caulle eruption triggered by slip on the Liquiñe-Ofqui fault system, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 583, 2022, 117386, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117386>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X2200022X>
- [150] Oh, O., Kim, Y., Kim, D. Hussey, D.S., Lee, S.W. Phase retrieval based on deep learning in grating interferometer. *Sci Rep* 12, 6739 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10551-y>

- [151] Okamoto, K., Takahashi, N., Iwanami, K., Shige S., Kubota, T. "High precision and high resolution global precipitation map from satellite data," 2008 Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Florence, Italy, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/MICRAD.2008.4579485.
- [152] Onn, F., Zebker, H. A. (2006), Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network, *J. Geophys. Res.*, 111, B09102, doi:10.1029/2005JB004012.
- [153] Ordoñez, M., López, C., Alpala, J., Narváez, L., Arcos, D., Battaglia, M. (2015). Keeping watch over Colombia's slumbering volcanoes. *Eos*. 96, 12-17. 2015. <https://doi.org/10.1029/2015E0025079>
- [154] Orellana, F., Hormazábal, J., Montalva, G., Moreno, M. Measuring Coastal Subsidence after Recent Earthquakes in Chile Central Using SAR Interferometry and GNSS Data. *Remote Sens.* 2022, 14, 1611. <https://doi.org/10.3390/rs14071611>
- [155] Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S. Cabral-Cano, E. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 115, 2016, Pages 90-102, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271615002269>
- [156] Oyelade, O. J., Oladipupo, O. O., Obagbuwa, I. C. (2010). Application of k Means Clustering algorithm for prediction of Students Academic Performance. arXiv preprint arXiv:1002.2425.
- [157] Parker, A.J., Biggs, J., Walters, R.J., Ebmeier, S.K., Wright, T.J., Teanby, N.A., Lu. Z. Systematic assessment of atmospheric uncertainties for InSAR data at volcanic arcs using large-scale atmospheric models: Application to the Cascade volcanoes, United States. *Remote Sensing of Environment*, Volume 170, 2015, Pages 102-114,

ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.003>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425715301267>

- [158] Pearson, K.F.R.S. (1901) LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2:11, 559-572, DOI: 10.1080/14786440109462720
- [159] Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A.: Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>, 2007.
- [160] Peña, J.M., Lozano, J.A., Larrañaga, P. An empirical comparison of four initialization methods for the K-Means algorithm. *Pattern Recognition Letters*, Volume 20, Issue 10, 1999, Pages 1027-1040, ISSN 0167-8655, [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(99\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(99)00069-0). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167865599000690>
- [161] Petrinovic, I.A., Villarosa, G., Guzmán, S.P., Páez, G.N., Outes, V., Manzoni, C., Delmónico, A., Balbis, C., Carniel, R., Hernando, I.R. La erupción del 22 de diciembre de 2012 del volcán Copahue, Neuquén, Argentina: caracterización del ciclo eruptivo y sus productos. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, Buenos Aires , v. 71, n. 2, p. 161-173, jun. 2014 . [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-48222014000200002&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222014000200002&lng=es&nrm=iso).
- [162] Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.-C., Borrero, C.A. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 41, Issues 1–4, 1990, Pages 17-66, ISSN 0377-0273, [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90082-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90082-Q). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037702739090082Q>

- [163] Poland, M.P., Lisowski, M., Dzurisin, D., Kramer, R., McLay, M., Pauk, B. Volcano geodesy in the Cascade arc, USA. *Bull Volcanol* 79, 59 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1140-x>
- [164] Poland, M.P., Zebker, H.A. Volcano geodesy using InSAR in 2020: the past and next decades. *Bull Volcanol* 84, 27 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01531-1>
- [165] Poveda, G., Álvarez, D.M., Rueda, Ó.A. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Clim Dyn* 36, 2233–2249 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- [166] Pritchard, M. E., and Simons, M. (2004), An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 5, Q02002, doi:10.1029/2003GC000610.
- [167] Pritchard, M. E., and Simons, M. (2004), An InSAR-based survey of volcanic deformation in the southern Andes, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L15610, doi:10.1029/2004GL020545.
- [168] Puertas-Orozco, O.L., Carvajal-Escobar, Y. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. *Dyna*, 78(169), 112-120.
- [169] R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- [170] Radočaj, D.; Jurišić, M.; Gašparović, M. The Role of Remote Sensing Data and Methods in a Modern Approach to Fertilization in Precision Agriculture. *Remote Sens.* 2022, 14, 778. <https://doi.org/10.3390/rs14030778>
- [171] Ramos, V. A. (2009). Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. *Backbone of the Americas: Shallow subduction, plateau uplift, and ridge and terrane collision*, 204, 31-65.

- [172] Reath, K., Pritchard, M., Biggs, J., Andrews, B., Ebmeier, S. K., Bagnardi, M., Girona, T., Lundgren, P., Lopez, T., Poland, M. (2020). Using conceptual models to relate multi-parameter satellite data to subsurface volcanic processes in Latin America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21, e2019GC008494. <https://doi.org/10.1029/2019GC008494>
- [173] Remy, D., Chen, Y., Froger, J. L., Bonvalot, S., Cordoba, L., and Fustos, J. (2015), Revised interpretation of recent InSAR signals observed at Llaima volcano (Chile). *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3870– 3879. doi: 10.1002/2015GL063872.
- [174] Riedel, B., Walther, A. InSAR processing for the recognition of landslides, *Adv. Geosci.*, 14, 189–194, <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-189-2008>, 2008.
- [175] Romero Moyano, J., Keller Ulrich, W., Marfull, V. (2014). Short chronological analysis of the 2007-2009 eruptive cycle and its nested cones formation at Llaima volcano. *Journal of Technological Possibilism*, 2(3), 1-9.
- [176] Romero, J. E., Vera, F., Polacci, M., Morgavi, D., Arzilli, F., Alam, M. A., Bustillos, J.E., Guevara, A., Johnson, J.B., Palma, J.L., Burton, M., Cuenca, E., Keller, W. (2018). Tephra from the 3 March 2015 sustained column related to explosive lava fountain activity at Volcán Villarrica (Chile). *Frontiers in Earth Science*, 6, 98.
- [177] Romero Moyano, J., Keller Ulrich, W., Marfull, V. (2014). Short chronological analysis of the 2007-2009 eruptive cycle and its nested cones formation at Llaima volcano. *Journal of Technological Possibilism*, 2(3), 1-9.
- [178] Roncancio, D.J., Lecha, L. Nardocci, A. Classification of daily weather types in Colombia: a tool to evaluate human health risks due to temperature variability. *Int J Biometeorol* 64, 1795–1806 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01963-4>

- [179] Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H., Fielding, E. J. (1996), Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 101( E10), 23109– 23125, doi:10.1029/96JE01459.
- [180] Rosen, P.A. and Hensley, S. and Joughin, I.R. and Li, F.K. and Madsen, S.N. and Rodriguez, E. and Goldstein, R.M. "Synthetic aperture radar interferometry," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 3, pp. 333-382, March 2000, doi: 10.1109/5.838084.
- [181] Roukounakis, N., Elias, P., Briole, P., Katsanos, D., Kioutsoukis, I., Argiriou, A.A., Retalis, A. Tropospheric Correction of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Interferograms Using a High-Resolution Weather Model Validated by GNSS Measurements. *Remote Sens.* 2021, 13, 2258. <https://doi.org/10.3390/rs13122258>
- [182] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., Wessel, P. (2011), Open Radar Interferometry Software for Mapping Surface Deformation, *Eos Trans. AGU*, 92( 28), 234. <https://doi.org/10.1029/2011E0280002> <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2011E0280002>
- [183] Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., Wessel, P. (2011). GMTSAR: An InSAR processing system based on generic mapping tools. [http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR\\_2ND\\_TEX.pdf](http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR_2ND_TEX.pdf)
- [184] Santibáñez-Quezada, F. Atlas Agroclimático de Chile. Estado Actual Y Tendencias del Clima. Tomo IV: Regiones del Biobío Y de La Araucanía. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas: FIA, (2017). <https://hdl.handle.net/20.500.14001/62379>
- [185] Santibáñez-Quezada, F. Atlas agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima. Tomo V: Regiones de Los Ríos y Los Lagos. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas: FIA, (2017). <https://hdl.handle.net/20.500.14001/62384>

- [186] Sapoval, N., Aghazadeh, A., Nute, M.G. Antunes, D.A., Balaji, A., Baraniuk, R., Barberan, C., Dannenfelser, R., Dun, C., Edrisi, M. Current progress and open challenges for applying deep learning across the biosciences. *Nat Commun* 13, 1728 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29268-7>
- [187] Sarricolea, P., Martín-Vide, J. (2012). Distribución espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm, entre 1965-2005. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8.
- [188] Sarricolea Espinoza, P. A., Martín-Vide, J. (2014). Spatial analysis of rainfall daily trends and concentration in Chile. *Investigaciones Geográficas*, (47), Pág. 53–66. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2014.32995>
- [189] Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., Meseguer-Ruiz O.,(2017) Climatic regionalisation of continental Chile, *Journal of Maps*, 13:2, 66-73, DOI: 10.1080/17445647.2016.1259592
- [190] Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., Serrano-Notivoli, R., Soto, M.V., Martín-Vide, J. Trends of daily precipitation concentration in Central-Southern Chile. *Atmospheric Research*, Volume 215, 2019, Pages 85-98, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.005>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809518308512>
- [191] Schumacher, V, Justino, F, Fernández, A, et al. Comparison between observations and gridded data sets over complex terrain in the Chilean Andes: Precipitation and temperature. *Int J Climatol*. 2020; 40: 5266– 5288. <https://doi.org/10.1002/joc.6518>
- [192] Shamshiri, R., Motagh, M., Nahavandchi, H., Haghshenas Haghghi, M., Hoseini, M. Improving tropospheric corrections on large-scale Sentinel-1 interferograms using a machine learning approach for integration with GNSS-derived zenith total delay (ZTD). *Remote Sensing of Environment*, Volume 239, 2020, 111608, ISSN

0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111608>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719306285>.

- [193] Sharma, S., Sharma, S., Athaiya, A. (2017). Activation functions in neural networks. *Towards Data Sci*, 6(12), 310-316.
- [194] Shinde, P.P., Shah, S. "A Review of Machine Learning and Deep Learning Applications," 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), Pune, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCUBEA.2018.8697857.
- [195] Shirzaei, M., and Bürgmann, R. (2012), Topography correlated atmospheric delay correction in radar interferometry using wavelet transforms, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01305, doi:10.1029/2011GL049971.
- [196] Silva Parejas, C., Lara, L. E., Bertin, D., Amigo, A., and Orozco, G., "The 2011-2012 eruption of Cordón Caulle volcano (Southern Andes): Evolution, crisis management and current hazards" , p. 9382, 2012.
- [197] Simons, M., Fialko, Y., Rivera, L. Coseismic Deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GPS Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2002;; 92 (4): 1390–1402. doi: <https://doi.org/10.1785/0120000933>
- [198] Smith, E.K., Weintraub, S. "The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies," in *Proceedings of the IRE*, vol. 41, no. 8, pp. 1035-1037, Aug. 1953, doi: 10.1109/JRPROC.1953.274297.
- [199] Scott, C., and Lohman R. (2016), Sensitivity of earthquake source inversions to atmospheric noise and corrections of InSAR data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 4031–4044, doi:10.1002/2016JB012969.
- [200] Sutanto, S. J., Hoffmann, G., Worden, J., Scheepmaker, R. A., Aben, I., Röckmann, T. (2015), Atmospheric processes governing the changes in water isotopologues during ENSO



- events from model and satellite measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 6712– 6729.  
doi: 10.1002/2015JD023228.
- [201] Stephens, K.J., Wauthier, C., Bussard, R.C., Higgins, M., LaFemina, P.C. Assessment of Mitigation Strategies for Tropospheric Phase Contributions to InSAR Time-Series Datasets over Two Nicaraguan Volcanoes. *Remote Sens.* 2020, 12, 782. <https://doi.org/10.3390/rs12050782>
- [202] Stern, C.R. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Rev. geol. Chile, Santiago* , v. 31, n. 2, p. 161-206, dic. 2004 . Disponible en [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0716-02082004000200001&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02082004000200001&lng=es&nrm=iso)
- [203] Stern, C.R., Moreno, H., López-Escobar L.(coordinators), Clavero, J.E., Lara, L.E., Naranjo, J.A., Parada, M.A., Skewes, M.A. 2007. Chilean volcanoes, *The Geology of Chile*, Teresa Moreno, Wes Gibbons
- [204] Stix, J., Torres, R.C. Narváez M, L., Cortés J, G.P., Raigosa, J.A., Gómez M, D., Castonguay, R. A model of vulcanian eruptions at Galeras volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 77, Issues 1–4, 1997, Pages 285-303, ISSN 0377-0273, [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00100-X). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037702739600100X>
- [205] Sun H., Demanet, L. "Beyond Correlations: Deep Learning for Seismic Interferometry," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, doi: 10.1109/TNNLS.2022.3172385.
- [206] Tachikawa, T., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D. B., Oimoen, M. J., Zhang, Z., Danielson, J. J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M., Carabajal, C. (2011). *ASTER Global Digital Elevation Model version 2—Summary of validation results*. Sioux Falls: NASA.

- [207] The MathWorks Inc. MATLAB Version: 9.6.0.1472908 (R2019a). <https://www.mathworks.com>
- [208] Tilling, R. I.: Volcanism and associated hazards: the Andean perspective, *Adv. Geosci.*, 22, 125–137, <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-125-2009>, 2009.
- [209] Tizzani, P, Battaglia, M, Castaldo, R, Pepe, A, Zeni, G, and Lanari, R (2015), Magma and fluid migration at Yellowstone Caldera in the last three decades inferred from InSAR, leveling, and gravity measurements. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 2627– 2647. doi: 10.1002/2014JB011502.
- [210] Tobin, G. A., Whiteford, L. M. (2002). Community resilience and volcano hazard: the eruption of Tungurahua and evacuation of the faldas in Ecuador. *Disasters*, 26(1), 28-48.
- [211] Torres-Batlló, J., Martí-Cardona, B. Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology*, Volume 590, 2020, 125485, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125485>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420309458>.
- [212] Tucker C.J., Townshend J.R.G. (2000) Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, 21:6-7, 1461-1471, DOI: 10.1080/014311600210263
- [213] Urrea, V., Ochoa, A., Mesa, O. (2019). Seasonality of rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55, 4149– 4162. <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- [214] Valdés-Pineda, R., Valdés, J.B., Diaz, H.F., Pizarro-Tapia, R. (2016), Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *Int. J. Climatol.*, 36: 2979-3001. <https://doi.org/10.1002/joc.4532>

- [215] Valdivielso, S., Vázquez-Suñé, E., Herrera, C., Custodio, E. Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama, *Science of The Total Environment*, Volume 806, Part 1, 2022, 150271, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150271>.
- [216] Van Rossum, G. and Drake, F. L. 2009. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
- [217] Van Westen, C. J. (2000). Remote sensing for natural disaster management. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 33(B7/4; PART 7), 1609-1617.
- [218] Velez, M.L., Euillades, P., Caselli, A., Mauro Blanco, M., Martínez Díaz, J. Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 202, Issues 1–2, 2011, Pages 117-126, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.01.012>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027311000394>
- [219] Velez, M.L., Euillades, P., Blanco, M., Euillades, L. (2016). Ground Deformation Between 2002 and 2013 from InSAR Observations. In: Tassi, F., Vaselli, O., Caselli, A. (eds) *Copahue Volcano. Active Volcanoes of the World*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2_8)
- [220] Viale M., Bianchi E., Cara L., Ruiz L. E., Villalba R., Pitte P., Masiokas M., Rivera J., Zalazar L. Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile, *Frontiers in Environmental Science*, 7, 2019, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2019.00069>, 10.3389/fenvs.2019.00069, 2296-665X
- [221] Voight, B. The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 44, Issues 3–4, 1990,

Pages 349-386, ISSN 0377-0273, [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90027-D](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90027-D). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037702739090027D>

- [222] Warne, R. T. (2014). A primer on multivariate analysis of variance (MANOVA) for behavioral scientists. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 19.
- [223] Wendt, A., Tassara, A., Báez, J.C., Basualto, D., Lara, L.E., García, F. Possible structural control on the 2011 eruption of Puyehue-Cordón Caulle Volcanic Complex (southern Chile) determined by InSAR, GPS and seismicity, *Geophysical Journal International*, Volume 208, Issue 1, January 2017, Pages 134–147, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw355>
- [224] Willmott, C.J. (1981) ON THE VALIDATION OF MODELS, *Physical Geography*, 2:2, 184–194, DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213
- [225] Yin, Y., Zheng, W., Liu, Y., Zhang, J., Li, X. Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiaju landslide in Sichuan, China. *Landslides* 7, 359–365 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0225-9>
- [226] Yu, C., Penna, N. T., Li, Z. (2017), Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 2008– 2025, doi:10.1002/2016JD025753.
- [227] Yu, C., Zhenhong Li, Z., Penna, N.T. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, Volume 204, 2018, Pages 109-121, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.038>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717305011>.
- [228] Yu, C., Li, Z., Penna, N. T., Crippa, P. (2018). Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 9202– 9222. <https://doi.org/10.1029/2017JB015305>

- [229] Yu, C.; Li, Z.; Chen, J.; Hu, J.-C. Small Magnitude Co-Seismic Deformation of the 2017 Mw 6.4 Nyingchi Earthquake Revealed by InSAR Measurements with Atmospheric Correction. *Remote Sens.* 2018, 10, 684. <https://doi.org/10.3390/rs10050684>
- [230] Yu, C., Li, Z., Penna, N.T. Triggered afterslip on the southern Hikurangi subduction interface following the 2016 Kaikōura earthquake from InSAR time series with atmospheric corrections, *Remote Sensing of Environment*, Volume 251, 2020, 112097, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112097>.
- [231] Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., Lagos, O. Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric Research*, Volume 186, 2017, Pages 26-42, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.006>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809516305865>.
- [232] Zebker, H. A., Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 30(5), 950-959.
- [233] Zebker, H. A., Rosen, P. A., and Hensley, S. (1997), Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *J. Geophys. Res.*, 102(B4), 7547– 7563, doi:10.1029/96JB03804.
- [234] Zhang, L., Lu, Z. Advances in InSAR Imaging and Data Processing. *Remote Sens.* 2022, 14, 4307. <https://doi.org/10.3390/rs14174307>
- [235] Zhao, Q., Yao, Y., Yao, W., Li, Z. Real-time precise point positioning-based zenith tropospheric delay for precipitation forecasting. *Sci Rep* 8, 7939 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26299-3>
- [236] Zhao, Z., Wu, Z., Zheng, Y., Ma, P. Recurrent neural networks for atmospheric noise removal from InSAR time series with missing values. *ISPRS Journal of Pho-*

togrammetry and Remote Sensing, Volume 180, 2021, Pages 227-237, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.009>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271621002094>

[237] Zhao, Q., Yu, L., Du, Z., Peng, D., Hao, P., Zhang, Y., Gong, P. An Overview of the Applications of Earth Observation Satellite Data: Impacts and Future Trends. *Remote Sens.* 2022, 14, 1863. <https://doi.org/10.3390/rs14081863>

[238] Zhou, H., Dai, K., Pirasteh, S., Li, R., Xiang J., Li, Z. "InSAR Spatial-Heterogeneity Tropospheric Delay Correction in Steep Mountainous Areas Based on Deep Learning for Landslides Monitoring," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1-14, 2023, Art no. 5215014, doi: 10.1109/TGRS.2023.3307477.

[239] Zuo, C., Qian, J., Feng, S., Yin, W., Li, Y., Fan, P., Han, J., Qian, K., Chen, Q. Deep learning in optical metrology: a review. *Light Sci Appl* 11, 39 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00714-x>

## Anexo 1. Primera publicación



OPEN

# ADTC-InSAR: a tropospheric correction database for Andean volcanoes

DATA DESCRIPTOR

Fernanda Lopez-Pozo<sup>1</sup>✉, Rodrigo Abarca-del-Rio<sup>2</sup> & Luis E. Lara<sup>3,4</sup>

Monitoring geophysical hazards requires a near real-time response and precise interpretation of InSAR data, typically recording minute surface deformations. Accurate tropospheric adjustment is an essential aspect of InSAR processing. This study provides a free database of ready-to-use Tropospheric Correction for InSAR for the three volcanic zones from north to south of the Andes. Average Daily Tropospheric Correction for InSAR (ADTC-InSAR) is a collection of average daily tropospheric delay matrices created using ECMWF re-analysis of the global atmosphere and surface conditions (ERA5) as atmospheric data and TRAIN software. The construction method and annual variation according to the climatic zones are provided, and its effectiveness is evaluated. ADTC-InSAR facilitates the generation of tropospheric corrections in InSAR with easy access, fast application, and accuracy comparable to TRAIN. Its purpose is to serve as a starting point for tropospheric correction in the event of emergency response to extreme occurrences and as a reference for other research and academic objectives.

## Background & Summary

Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR), a technique based on a phase difference between two images, allows the study of Earth's ground deformation induced by earthquakes<sup>1</sup>, mass wasting in landslides<sup>2,3</sup>, volcanic unrest, and deflation after magma withdrawal<sup>4-6</sup>, among the others. Over the past decade, the introduction of new constellations of satellites with higher capacity and more advanced sensors resulted in an unprecedented ability to track the temporal evolution of changes across the entire Earth's surface. This implies an increasing number of scenes in accessible databases and the need for automated analysis, which is an effort that the scientific community is releasing<sup>7,8</sup>.

A source of error of InSAR is the atmospheric delay caused by the refraction of the signal as it crosses the troposphere, resulting in a change in trajectory. The tropospheric delay has a dry component (or dry contribution) determined by atmospheric pressure and temperature. The order of magnitude is in meters and is affected by topography. The wet component (or wet contribution) is a function of the partial pressure of water vapor. As a result, it is influenced by the turbulent region of the atmosphere and is not affected by topography; it has a centimeter order of magnitude.

The importance of the tropospheric delay lies in the magnitude of the changes generated, considering that volcanic areas usually show ground deformations in the order of a few centimeters. Zebker *et al.*<sup>9</sup> indicates that a change of 20% in relative humidity can generate a difference between 10 and 14 [cm] of delay, which can be more significant than the detected deformation even considering that the wet component only represents 10% of the total<sup>10</sup>. A more precise measurement of the tropospheric delay throughout the year is required for the most accurate interpretation. We can see this at Llaima volcano (Southern Andes, Chile: [−71.730°, −38.697°]) where different interpretations have been generated from InSAR. According to Fournier *et al.*<sup>11</sup>, between 2007–2008, there was subsidence on the volcano's eastern flank, which is presumed to be related to the January 2008 eruption and collapse. Bathke *et al.*<sup>12</sup> specify that a deflation of: 10 [cm] occurred between 2003 and 2007, followed by: 8 [cm] of inflation that lasted until the end of 2008. Delgado *et al.*<sup>13</sup> interpreted the interferogram signal one month before the April 2009 eruption as: 6–15 [cm] inflation of the west side of the volcanic edifice. Remy *et al.*<sup>14</sup>

<sup>1</sup>Doctorado en Ciencias Geológicas, Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. <sup>2</sup>Departamento de Geofísica (DGEO), Universidad de Concepción (UDEG), 160-C, Concepción, Chile. <sup>3</sup>Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Avda. Santa María, 0104, Santiago, Chile. <sup>4</sup>Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile. ✉e-mail: [fernandalopez@udec.cl](mailto:fernandalopez@udec.cl)



stated that no deformation was evidenced between 2003–2011 and that the patterns observed in the interferograms are the product of tropospheric error but pointed out the collapse of the eastern flank in 2008.

The Andes is a natural laboratory for InSAR studies due to the variety of active processes and latitudinal and topographic variation. This offers diverse climatic conditions in which the humid input would exert significant and different control on the tropospheric delay in each zone.

Methods for determining this delay range from using correlation with topography to more sophisticated models. Regardless of quality, heterogeneity in the treatment of this aspect hinders remote sensing studies from being compatible and comparable.

We aimed to investigate this topic through approaches based on globally available and recognized atmospheric data. As a result of this study, Average Daily Tropospheric Correction for InSAR (ADTC-InSAR) database has been developed using ERA-5 atmospheric reanalysis to produce a homogeneous and high-quality correction that offers information on tropospheric delay behavior at the continental scale. It is provided for three significant volcanic segments in the Andes that exhibit a range of Koppen-Geiger climates<sup>15</sup>. These are the Northern Volcanic Zone (NVZ), the Central Volcanic Zone (CVZ), and the Southern Volcanic Zone (SVZ). These zones have tropical, desert, and temperate climates, respectively (see Fig. 1).

We propose an ADTC-InSAR database that may assist in the research and understanding of tropospheric delay magnitudes and to understand better how the wet and dry components of the delay fluctuate in response to the prevailing climate. With this database, we were able to generate tropospheric corrections with good precision and fast application for InSAR data in the volcanic areas used as a case study.

## Methods

Historically, the tropospheric delay needed for interferogram correction has been measured with a number of methods. These methods must consider complementary data in order to generate a tropospheric correction<sup>16</sup>. Some methods generate corrections considering the correlation with topography<sup>4,17,18</sup>, time and/or spatial filters<sup>19–25</sup>, InSAR or GPS time series<sup>26–30</sup>, using methods that involve the reconstruction of the path of the ray and estimation of the distance traveled<sup>31–34</sup>, and obtaining the tropospheric delay of the signal utilizing the integral of the refractivity through the atmosphere by using atmospheric variables such as the total tropospheric pressure, the temperature, and the partial pressure of water vapor<sup>14,21,35–43</sup>. This is beneficial when the connection between delay and elevation is not linear<sup>44</sup>. As will be detailed later, we will utilize a program that implements the latter strategy, which requires atmospheric data.

The study area consist of the 10 volcanoes of the Andean volcanic arc: Nevados Del Ruiz, Galeras, and Reventador in NVZ; Hualca hualca, Uturuncu and Robledo in CVZ; Copahue, Llaima, Cordon Caulle and Chaitén in SVZ. A distinct prevailing climate surrounds each volcanic zone. We identify mainly tropical, desert, and temperate climates in the NVZ, CVZ, and SVZ zones, respectively<sup>15</sup> (see Fig. 1).

**Generation of interferograms.** For the generation of interferograms, we use Generic Mapping Tools Synthetic Aperture Radar (GMTSAR) software<sup>45,46</sup> (<https://topex.ucsd.edu/gmtsar/>) with Land Observation System Phased-Array Synthetic-Aperture Radar (ALOS-PALSAR) and Shuttle Radar Topography Mission 3 arc-Second Global Digital Elevation Model (DEM-SRTM<sup>47</sup>; <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) data. GMTSAR utilizes the p2p\_ALOS.csh code to generate the interferograms with ALOS-PALSAR data. This function does data preprocessing, focuses and aligns Single Look Complex (SLC) images, filters the interferogram, unwraps phase, and geocodes the data.

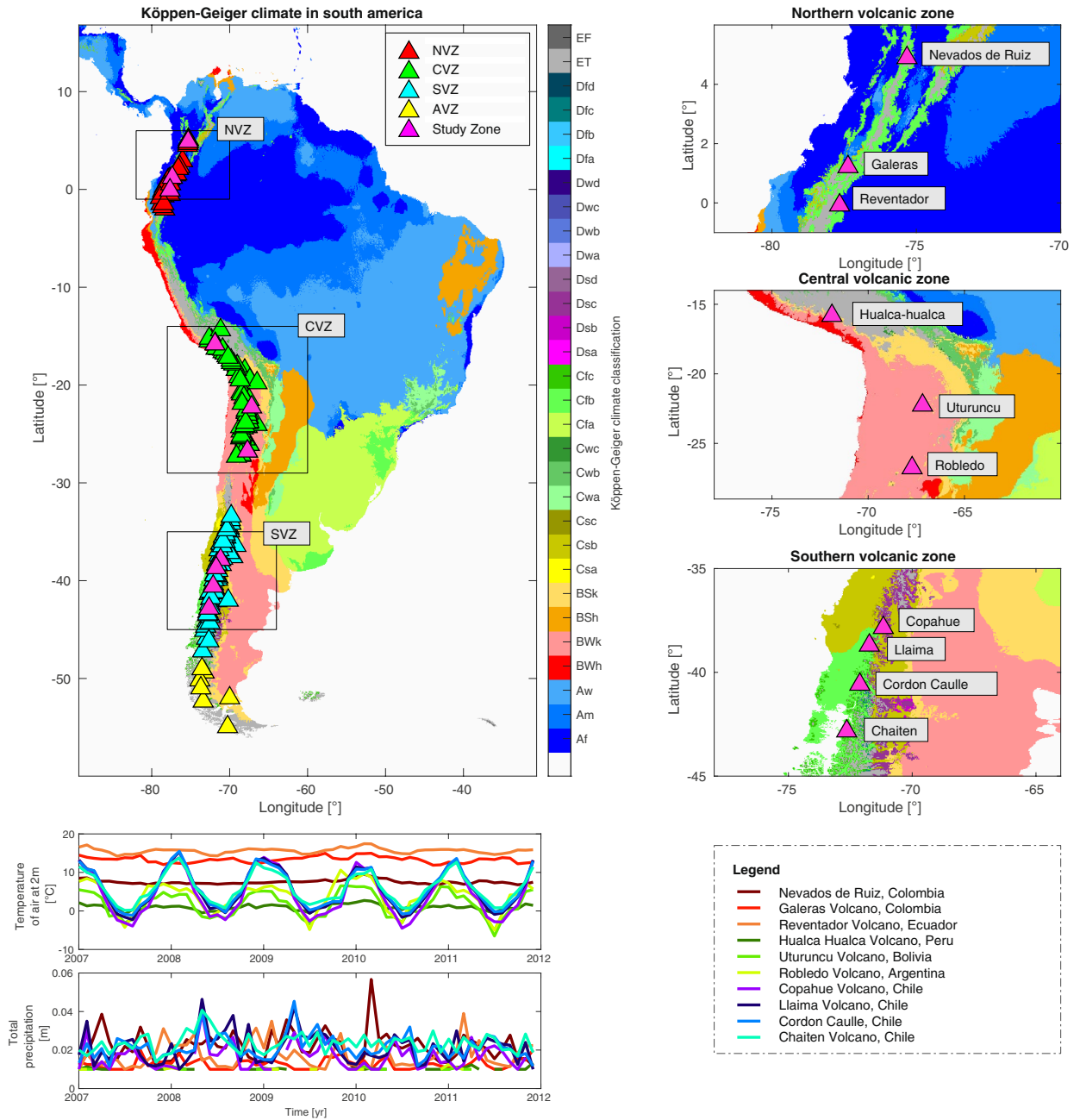
For running GMTSAR, the configuration file config.ALOS.txt is required. In this file, these options have been selected: *topo\_phase*=1, for topographic correction; *switch\_master*=0, to utilize the master image as a reference; *filter\_wavelength*=300, for the interferogram filter; *correct\_iono*=0, to avoid generating ionospheric corrections; and *threshold\_snaphu*=0.1, for phase unwinding with snaphu.

Advanced ALOS PALSAR (<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>) data from the Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA, <https://global.jaxa.jp/>) between 2007 and 2011 were utilized to generate interferograms (see Table 1). The advantage is due to its L wavelength (1.27 GHz), which permits higher penetration into the vegetation cover and lesser correlation loss. The utilized data contain Fine Beam Single (FBS) and Fine Beam Double (FBD) HH + HV polarization (where H: horizontal and V: vertical), with 20 and 10 m spatial resolution and an incidence angle of 34.3°; they were downloaded from <https://search.asf.alaska.edu/#/>. In addition, topographic information is required for topographic and tropospheric corrections. DEM-SRTM<sup>47</sup>, measured vertically in meters and with a 90 m spatial resolution (downloaded from <https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>) has been utilized.

**Generation of ADTC-InSAR.** The average tropospheric correction was constructed using TRAIN (Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise<sup>42,43</sup>; <https://github.com/dbekaert/TRAIN>) with ERA-5 atmospheric<sup>48,49</sup> and DEM SRTM<sup>47</sup> data.

The tropospheric correction is based on the ERA-5 atmospheric reanalysis that superseded ERA-Interim. Thus, whereas ERA-Interim had an 80 km horizontal spatial resolution and 60 vertical levels to 0.1 hPa, ERA-5 now has a 30 km horizontal spatial resolution and 137 vertical levels from the surface to above 80 km altitude <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>). Additionally, the temporal resolution also increased from 6 hours to 1 hour. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts provides the ERA-5 data (ECMWF; <https://www.ecmwf.int/>) via its ECMWF API library <https://pypi.org/project/ecmwf-api-client/>).

For each day between 2007 and 2011, the dry, wet, and total daily tropospheric delay were calculated using TRAIN to build the daily average database. Then, the daily tropospheric delays for each day between 2007 and 2011 are then used to build a daily average grid for a whole year. For example, the matrices produced on January



**Fig. 1** On the upper left of the figure are the Köppen-Geiger Climates<sup>15</sup>, and the color bar on the right represents each Köppen-Geiger climate. The Andes Mountains volcanoes are divided into three zones: North Volcanic Zone (NVZ), the Central Volcanic Zone (CVZ), and Southern Volcanic Zone (SVZ). We extracted from this maps, the study areas shown on the right, which comprise the following volcanoes (magenta triangles): Nevados del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordon Caulle, and Chaitén. The two graphs on the bottom left offer time series of precipitation and air temperature at 2 meters for each volcano, with the legend on the right. Note that each volcanic zone is distinguished by a distinct color range: the Northern Volcanic Zone is red, the Central Volcanic Zone is green, and the Southern Volcanic Zone is blue. Note that Austral Volcanic Zone (AVZ) in yellow are not analyzed.

1, 2007, 2008, 2009, 2010, and 2011 are averaged to obtain a single mesh. This term refers to the average daily tropospheric correction for dry, wet, and total conditions.

**Tropospheric correction.** To compute the tropospheric correction using the daily average database, it is necessary to recollect the dates when the SAR images for the interferograms were acquired: date\_MASTER and date\_SLAVE. We require the ADTC-InSAR of the total daily tropospheric delay corresponding to the previously indicated dates. If date\_MASTER is August 6, 2009, we search for August 6 in the ADTC-InSAR. This results in two meshes representing the ADTC-InSAR of the daily total tropospheric delay for the dates date\_MASTER and

Volcano	Abbr.	Path	Master			Slave			Baseline	
			21.5 cm Date (yyyymmdd)	21.2 cm Absolute Orbit	20.9 cm Beam Mode	21.5 cm Date (yyyymmdd)	21.2 cm Absolute Orbit	20.9 cm Beam Mode	21.3 cm Temporal [Days]	21.2 cm Spatial [m]
Nevados Del Ruiz	NDR	447	20080306	11269	FBS	20100312	22005	FBS	736	187.73
Galeras	Gal	152	20070303	5880	FBS	20080905	13932	FBD	552	-319.262
Reventador	Rev	108	20080107	10401	FBS	20090224	16440	FBS	418	148.619
Hualca-hualca	HHu	103	20100119	21239	FBS	20110122	26607	FBS	368	-1236.799
Uturuncu	Utu	98	20090320	16644	FBS	20100313	22012	FBS	358	-1219.686
Robledo	Rob	101	20100318	22085	FBS	20101219	26111	FBS	276	-227.810
Copahue	Cop	115	20101227	26228	FBS	20110211	26899	FBS	46	228.07
Llaima	Lla	116	20071120	9701	FBS	20071005	9030	FBD	46	-201.040
Cordón Caulle	CCa	118	20100213	21604	FBS	20100331	22275	FBS	46	-734.158
Chaitén	Cha	121	20100218	21677	FBS	20070928	8928	FBD	874	6.487

**Table 1.** Table showing the SAR images used to generate interferograms in each of the volcanoes (column 1) with their respective abbreviations (column 2) in the study area (section 2) including the path (column 3) corresponding to ALOS-PALSAR images, the date (column 4 and 7) on which the image was captured (MASTER and SLAVE), its absolute orbit (column 5 and 8) and acquisition mode (FBS: Fine Beam Single Polarisation; FBD: Fine Beam Dual Polarisation; column 6 and 9) are showed. The temporal baseline (column 10) and spatial baseline (column 11) are also displayed.

date\_SLAVE: mesh\_MASTER and Mesh\_SLAVE. The meshes are interpolated so that their points match those in the unwrapped interferogram. The data is converted from centimeters to radians, and the difference between their points is computed: mesh\_SLAVE-mesh\_MASTER. Thus, ADTC-InSAR, has made the tropospheric correction for the interferogram under consideration available.

**Analysis of average daily tropospheric delay.** Two lines of analysis have been developed for evaluating the information of the daily average tropospheric delay: (1) to investigate the temporal behavior at the seasonal and annual time scales using various statistics such as median, mean, and standard deviation; and (2) to investigate the relationship between the total daily tropospheric delay, dry and wet contribution with Koppen-Geiger climates. As will be detailed further, the northern, central, and southern volcanic zones are characterized by their tropical, desert, and temperate climates, respectively.

**Analysis of tropospheric correction with ADTC-InSAR.** This work aims to examine the efficiency of using ADTC-InSAR as a tropospheric correction. This consists of knowing if ADTC-InSAR is appropriate for use as a generic correction prior to, as a first guess, or even in place of data from specific dates, which is the common practice. For doing this, we compare a correction generated by ADTC-InSAR to one generated with specific dates. It is worth noting that specific dates cover days found throughout the 5 years window (2007–2011), while ADTC-InSAR only queries the day and month considered.

Thus, for each volcano, we generated two databases of tropospheric corrections for 500 random date pairings (described further below) to be compared, which we refer to as corrections with “ADTC-InSAR” and “TRAIN specific-dates”.

ADTC-InSAR correction implies locating the matching daily dates in the ADTC-InSAR database generated for the volcano to acquire the corresponding tropospheric correction. In contrast, “TRAIN specific-dates” tropospheric correction entails producing the tropospheric corrections for InSAR conventionally, i.e., using TRAIN, for each previously selected random date. We intend to determine the degree of similarity and difference by comparing the magnitudes of the results produced by each method in each volcano.

It is worth mentioning that a Monte-Carlo process is applied to choose these 500 pairings of random dates. That is a well-recognized approach for tackling estimation and optimization problems<sup>50</sup> in a wide variety of domains, including statistics, mathematics, and the physical sciences. However, the statistics barely vary significantly more than 100 dates after the volcano testing, and at 300, they level off. Consequently, 500 corrections were made with “TRAIN specific-dates” data (from 2007 to 2011) and 500 with ADTC-InSAR. The difference between identical pairs of day corrections was then calculated.

In this section, different statistics are applied depending on the instance. In the first place, the mean ( $\mu$ , Eq. 1), median, standard deviation ( $\sigma$ , Eq. 2), quartiles 1 and 3, kurtosis ( $k$ , Eq. 3), and skewness ( $s$ , Eq. 4) are used to appreciate the data distribution of the corrections for 500 pairs of random dates in each volcano and the difference between the corrections. For example, the mean, median, standard deviation, and quartiles allow us to understand where the data are concentrated. At the same time, kurtosis and skewness provide information on how they are distributed.

The statistics used are defined in the following equations:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Volcanic zone	Volcano	Dry [%]	Wet [%]
NVZ	Nevados Del Ruiz	90.3	9.7
	Galeras	91.0	9.0
	Reventador	89.6	10.4
CVZ	Hualca-hualca	96.0	4.0
	Uturuncu	98.8	1.2
	Robledo	98.4	1.6
SVZ	Copahue	97.3	2.7
	Llaima	96.7	3.3
	Cordón Caulle	96.4	3.6
	Chaitén	96.0	4.0

**Table 2.** Table displaying the percentage contribution of the dry (third column) and wet (fourth column) daily delays to the total daily lag of each volcano (second column) in the volcanic zones (first column) studied.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |x_i - \mu|^2} \quad (2)$$

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (3)$$

$$s = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (4)$$

Where,  $x_i$  is the  $i$ th observations,  $\mu$  is the mean,  $\sigma$  is the standard deviation,  $n$  is the number of the observations, and  $E(x)$  represents the expected value of the quantity  $x$ . Moreover, quartiles 1, 2 and 3 ( $Q_1$ ,  $Q_2$  and  $Q_3$ ) correspond to measures of data distribution, which has scalar values.  $Q_1$ ,  $Q_2$  and  $Q_3$  correspond to the 25th, 50th and 75th percentiles of the data distribution. In particular,  $Q_2$  is equivalent to the median.

In second place, when comparing the corrected interferograms with “TRAIN specific-dates” and those with ADTC-InSAR, the squared correlation coefficient (“R squared”,  $R^2$ , Eq. 5), Nash-Sutcliffe coefficient<sup>51</sup> ( $nse$ , Eq. 6), and the modified Willmott coefficient<sup>52</sup> ( $d$ , Eq. 7) are utilized (in Table 4). These statistics allow two data sets to be compared to estimate their similarity. The “R squared”, or the coefficient of determination provides information on how well the “ADTC-InSAR” approximates the “TRAIN specific-dates”, when  $R^2 = 1$ , these data sets fit perfectly. The Nash-Sutcliffe coefficient varies between inf and 1; when  $nse = 1$ , the data sets match perfectly. Furthermore, finally, the Willmott coefficient varies between 0 and 1; when  $d = 1$ , the data have a perfect agreement, and if  $d = 0$ , there is no agreement.

The statistics used are defined in the following equations:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

$$nse = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)} \quad (7)$$

Where,  $X_i$  and  $Y_i$  are the  $i$ th observations of datasets  $X$  and  $Y$ ,  $\bar{X}$  and  $\bar{Y}$  are the means of datasets  $X$  and  $Y$ , and  $n$  is the number of the observations.

We wanted as minimal change as possible in the interferogram data in order to be able to compare it to the effect that may be produced by one approach or another. This is done to assess if the correction increases final result uncertainty. Therefore, we selected interferograms dates which do not exhibit deformation.

### Data Records

ADTC-InSAR<sup>53</sup> are data sets containing the average daily tropospheric delays corresponding to the day of each year for 10 volcanoes in the Andes: Nevados del Ruiz, Galeras, Reventador, Hualca-hualca, Uturuncu, Robledo, Copahue, Llaima, Cordón Caulle and Chaitén. The database provides the average daily tropospheric delay for the total as well as its wet and dry components. For each of them, and for every month, one file is provided per volcano (36 files for each volcano). These files each include columns containing the average daily tropospheric

	Nevados Del Ruiz	Galeras	Reventador	Hualca-hualca	Uturuncu	Robledo	Copahue	Llaima	Cordón Caulle	Chaitén
Median [cm]	0.07	0.01	0.17	-0.70	-0.28	-0.03	0.20	0.31	-0.02	-0.42
Mean [cm]	-0.17	-0.12	0.05	-0.62	-0.35	-0.20	0.09	0.24	0.01	-0.05
Standard deviation [cm]	3.97	3.74	4.16	4.96	3.61	4.03	4.23	4.70	4.67	5.06
Q <sub>1</sub> [cm]	-2.27	-2.30	-2.09	-3.54	-2.11	-2.07	-2.53	-2.61	-2.98	-3.14
Q <sub>3</sub> [cm]	2.34	2.22	2.66	2.21	1.55	1.59	2.71	3.45	2.85	2.89
Kurtosis	3.74	4.06	4.30	3.46	4.29	4.81	3.39	3.09	3.63	3.54
Skewness	-0.36	-0.32	-0.35	0.12	0.05	0.26	-0.14	-0.10	0.16	0.14

**Table 3.** The table presents different statistical indicators for each data set of the difference between applying tropospheric corrections with “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR in 500 pairs of different dates in each volcano (Fig. 3). The statistics used are: the mean and median central tendency measurements, the standard deviation, the first and third quartiles (Q<sub>1</sub> and Q<sub>3</sub>: accumulation of 25% and 75% of the data, respectively), kurtosis and skewness.

delays for each day of the relevant month. In addition, the longitude and latitude files of the points for each volcano where the average daily tropospheric delays were measured are supplied.

Also, for the user to employ ADTC-InSAR as a tropospheric correction, the `Corr_ADTC_InSAR.m` and `Corr_ADTC_InSAR.py` scripts, executable in MATLAB and PYTHON, respectively, are also provided.

Finally, a README file providing this detailed information is also included.

### Technical Validation

This section presents two approaches for assessing the usefulness of ADTC-InSAR as a database for tropospheric corrections in InSAR data: (1) climate-related behavior of tropospheric delay and its components, and (2) ADTC-InSAR application to interferograms.

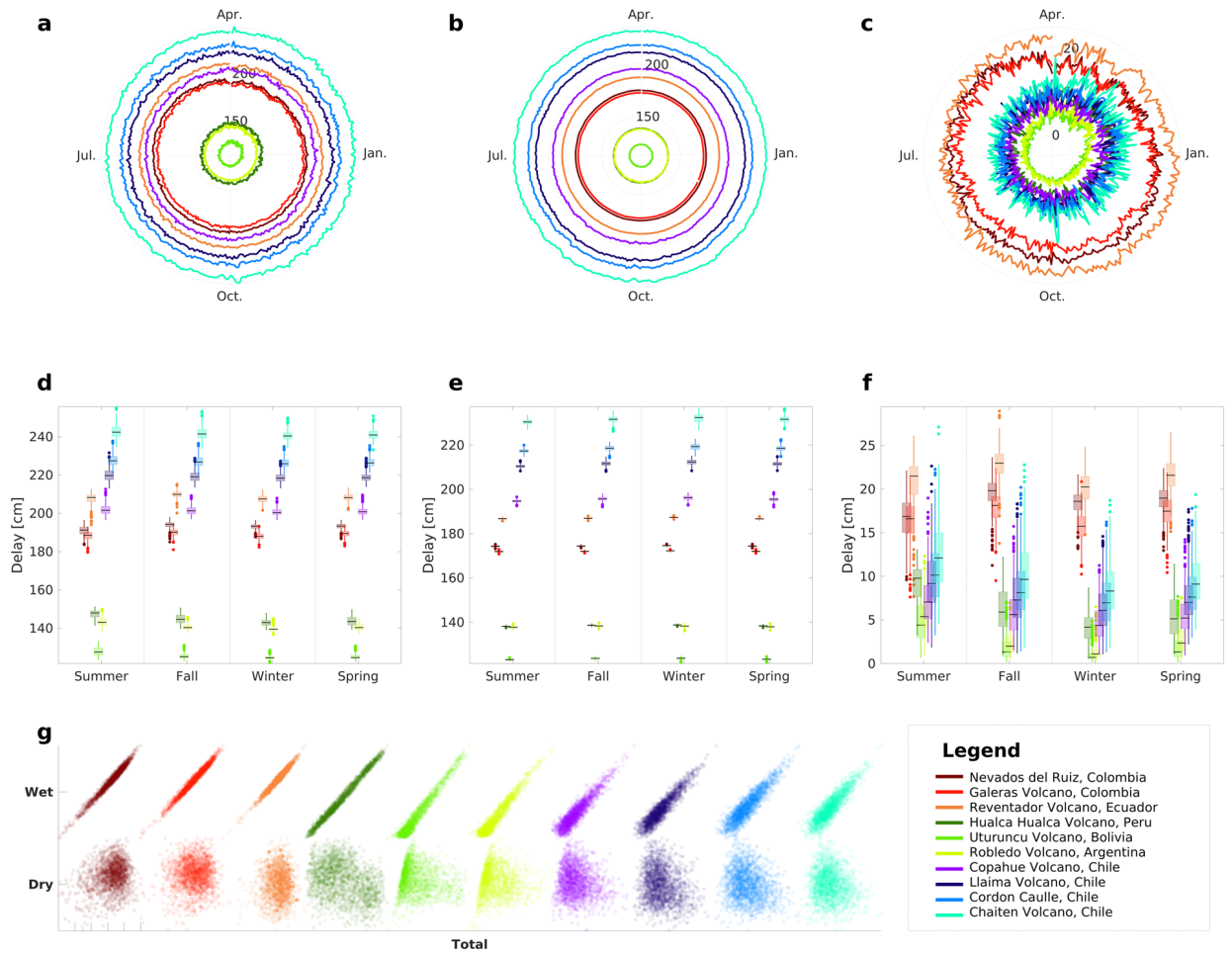
**Climate-related behavior of daily tropospheric delay and its components.** Examining the temporal dynamics of a daily tropospheric delay requires first identifying whether its components rise, decrease, or remain constant over the year. We also attempt to understand better why these changes occur and the connection between volcanic zones. Due to the cyclical nature of the process, the average daily tropospheric delay is shown on polar graphs (Fig. 2a–c). Boxplots and histograms illustrate the seasonal variation of extreme values (Fig. 2d–f). Second, the link between wet, dry, and total tropospheric delay is then shown using scatter plots (Fig. 2g). In addition, the percentage contribution of the wet and dry component to the total are estimated (Table 2). This enables us to deduce which component of the daily tropospheric delay substantially impacts the total amount and whether differences are detected between volcanic zones.

According to what is observed in the Koppen-Geiger climate data (see Fig. 1, and also Table 2 in Beck *et al.*<sup>15</sup>), NVZ has a substantial tropical climate presence in all the variables (Af, Am, and Aw). It is characterized by high temperatures ( $T^{\circ} > 18^{\circ}\text{C}$ ) in the coldest months) and copious precipitation ( $\geq 60$  [mm/month] in the driest months). All these characteristics indicate a high humidity level. Type Cfb, which lacks dry seasons but has hot summers ( $> 10^{\circ}\text{C}$ ), is the second most-prevalent type of temperate climate type. In the warmer months, Polar-tundra (ET) type temperatures range between  $0$ – $10^{\circ}\text{C}$ . As shown in Fig. 1, precipitations vary significantly throughout the year. Compared to other volcanic zones (CVZ and SVZ), the temperature at the height of 2 meters is relatively high and stable. Roncancio *et al.*<sup>54</sup> describe these zones as having a temperate, cool-to-cold, or extremely cold climate, with lowest and maximum daily temperatures, respectively, below  $15^{\circ}\text{C}$  and  $25^{\circ}\text{C}$ . The temperature behavior is significantly influenced by the orogenic characteristics of the Andes, humidity, and winds from the low plains, all of which influence the bimodal rainy regime<sup>54</sup>.

CVZ climates correlate to arid zones characterized by desert and steppe climates (BWk and BSk), with monthly temperatures below  $18^{\circ}\text{C}$ . The polar tundra climate (ET) is caused by the high elevation temperature of the Andes<sup>55</sup>, with temperatures ranging between  $-5$  and  $10^{\circ}\text{C}$  (Fig. 1). In this geographical area, the so-called Altiplano winter depicted in Fig. 1 is present, which is accompanied by summer rains. These are the result of local fluctuations in solar insolation and are closely linked to changes in large-scale circulation, such as variations in the supply of moisture east of the central Andes<sup>56</sup>.

According to Fig. 1, the prevailing climate in the SVZ corresponds to a temperate climate, mostly due to the decrease in elevation of the Andes, the impact of the westerly winds, the high precipitation, and the oceanic conditions<sup>55</sup>. It depicts a hot summer with a dry season or without a dry season at all (Csb or Cfb, respectively). Consequently, the average temperature throughout the warmest months is regularly over  $10^{\circ}\text{C}$ . In contrast, the average temperature during the coldest months ranges from  $0$  (or even lower) to  $18^{\circ}\text{C}$ . Figure 1 illustrates that precipitations vary significantly throughout the year, whereas seasonal temperatures range between  $-5^{\circ}$  to  $15^{\circ}\text{C}$ . Having described and recognized that the predominant climates in NVZ, CVZ, and SVZ are tropical, desert, and temperate, respectively, it is conceivable to evaluate the ADTC-InSAR database obtained in the volcanoes of this study (see Fig. 1).

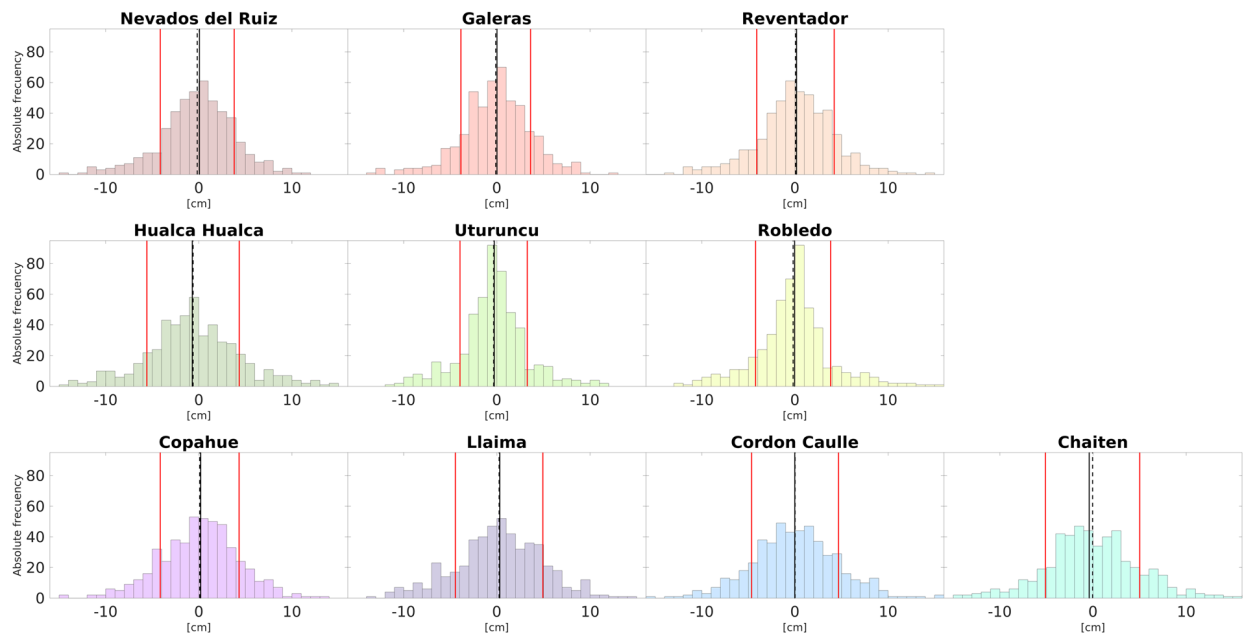
When considering volcanic climatic zones, the behavior of daily tropospheric delay is better understood. Following are some distinguishing features of NVZ, CVZ, and SVZ. NVZ, for instance, has a tropical rainforest climate (Fig. 1), which means a high humidity percentage. Consequently, it is easy to see why the NVZ region has greater wet daily tropospheric delays than CVZ and SVZ regions (see Fig. 2c). Due to the NVZ’s location on the



**Fig. 2** Comparison between total, dry and wet average daily tropospheric delay: (a–c) Polar plots illustrating the mean of average daily tropospheric delay of the (a) total, (b) dry, and (c) wet daily delay for each volcano, with the months progressing clockwise and the delays’ magnitudes labeled on the radial axis. (d–f) The graphs depict boxplots of the (d) total, (e) dry, and (f) wet daily tropospheric delay for all volcanoes during each season of the year (summer, fall, winter, spring) corresponding to the southern hemisphere. (g) The figure depicts scatter plots between the daily total tropospheric delays and their wet (top) and dry (bottom) components for each volcano. Each volcanic zone is distinguished by a spectrum of different colors: Northern Volcanic Zone is a range of red colors (Brown: Nevados del Ruiz, red: Galeras, orange: Reventador), Central Volcanic Zone is a range of green colors (dark green: Hualca hualca, light green: Uturuncu, lemon green: Robledo), and Southern Volcanic Zone is a range of blue colors (lilac: Copahue, purple: Llaima, blue: Cordón Caulle, cyan: Chaitén).

		Nevados Del Ruiz	Robledo	Copahue
<b>Difference between correction with “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR</b>	Median [rad]	0.50	0.54	0.94
	Mean [rad]	0.50	0.53	1.00
	Standard deviation [rad]	0.15	0.16	0.22
	Kurtosis	3.34	2.82	2.39
	Skewness	0.39	−0.47	0.43
<b>Comparison between correction with “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR</b>	R <sup>2</sup>	0.9946	0.9862	0.9771
	nse	0.92	0.78	0.40
	d	0.83	0.73	0.57

**Table 4.** Statistical pertaining to corrections with “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR. The median, mean, standard deviation, kurtosis and skewness statistics are applied to the difference between applying the “TRAIN specific-dates” correction and ADTC-InSAR to real interferograms (fourth column of Fig. 4), and at 500 cases of differences in corrections (Fig. 3). R<sup>2</sup>, nse and d are utilized to compare “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR corrections to real interferograms (second and third column of Fig. 4).



**Fig. 3** Histogram plots illustrate differences in tropospheric corrections between the “TRAIN specific-dates” and the ADTC-InSAR for the ten volcanoes in this study using 500 pairs of random dates. The histograms depicts three statistical parameters: the mean (solid black line), the median (segmented black line), and the standard deviation range (solid red line).

equator, this region exhibits distinct climatic behaviors: bimodality (two dry and two wet seasons) and unimodality (one dry and one wet season)<sup>57</sup>. Indeed, the region’s central-south wet seasons begin in February–March (summer) and September–October (spring). The dry periods occur in June (winter) and December (summer). These dates coincide with periods (between spring and autumn) with increased tropospheric wet delay in the NVZ volcanoes (Fig. 2f). Thus, it increases from a mean value of  $18.07 \pm 1.64$ , and  $17.94 \pm 3.46$  [cm] in winter and summer (mainly dry periods) to  $19.21 \pm 1.79$  [cm], and  $20.15 \pm 1.74$  [cm] on average in spring and autumn (mainly wet seasons), respectively. On the other hand, the large dry tropospheric delay magnitudes (Fig. 2b,e) had mean values of  $177 \pm 0.21$  [cm], which might be a result of high temperatures since the dry component is a function of atmospheric temperature and pressure<sup>42,43</sup>.

The CVZ volcanoes, Uturuncu and Robledo, have an arid-cold-desert climate (Fig. 1). Figure 1 depicts the polar-tundra climate of the Hualca-hualca volcano (also in CVZ), which implies low temperatures and low humidity. These climatic conditions may explain the lower magnitudes of the daily wet and dry tropospheric delays compared to other zones (see Fig. 2b,c,e,f). Notably, the wet daily tropospheric delay rises in the CVZ volcanoes from December to April (summer-autumn, see Fig. 2c). In the spring-summer seasons, there is also an increase in the seasonal data distribution (Fig. 2f). The latter may have something to do with the so-called Altiplano winter. Changes in the intensity and duration of the Altiplano humid airflow’s intensity and duration<sup>58</sup> enhance precipitation during summer, between December and February<sup>59</sup>.

The high dry daily tropospheric delay values in the SVZ are consistent with a temperate climate with warm summers. However, because temperatures in this zone are lower than in tropical zones such as NVZ, these delays are not as large. Likewise, precipitation is greater in NVZ, resulting in shorter wet daily tropospheric delays in SVZ.

Misra and Engle<sup>10</sup> reported that the wet component accounts for just 10% of the total delay. The total contribution of the wet component in the NVZ is ten percent, as seen in Table 2. In contrast, this proportion falls to less than 5% in all other locations (CVZ and SVZ). The drop in the humid contribution results from the lower humidity and temperature variations in this area since the temperature at which a change in humidity is triggered can considerably impact the resulting delay<sup>60</sup>. Thus, outstanding contributions to the total daily tropospheric delay are restricted to tropical climate zones. Regardless, the dry contribution is much more significant than the wet contribution. It controls the total daily delay magnitude.

As demonstrated in Fig. 2g, correlations between the wet-to-total daily tropospheric delay, are more than 90% in all regions. Moreover, based on the positions of the extreme values (Fig. 2a–c), the distributions of wet and total daily tropospheric delays are equivalent. It demonstrates that the total daily tropospheric delay variations may be conditioned by its humid contribution.

In conclusion, we determined that it is essential to establish the tropospheric correction depending on the position of a volcano in a specific climate condition. We also noted that despite the substantial difference between dry and wet contributions, the wet contribution dominates the correction with “specific-dates”: the dry contribution varies less with time, whereas the wet part varies considerably. The variability in relative humidity has a considerable impact on the wet component of the daily tropospheric delay. As a result, the wet contribution would be associated with the rainy seasons of these zones, such as the Altiplano winter in CVZ and the wet

seasons in NVZ. Consequently, a more thorough assessment of relative humidity derived from satellite missions or *in-situ* meteorological data may improve the local tropospheric correction for the InSAR data.

**Application of ADTC-InSAR to interferograms.** We assess the pertinence of ADTC-InSAR by statistically comparing its findings to “TRAIN specific-dates”. It was accomplished in two ways: first, by generating corrections for 500 randomly chosen date pairs at each volcano, and second, by applying the method to real interferograms.

The difference between “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR corrections for 500 random date pairings is calculated and illustrated using histograms (see Fig. 3), while the statistics for these data distributions are included in Table 3.

According to the statistics, the mean and median had comparable values ranging from  $-0.62$  to  $0.24$ , and  $-0.70$  to  $0.31$  [cm], respectively, indicating that over the 500 cases, the extremes do not appear to have a significant impact in the mean, which are mainly centered about 0 [cm]. The leptokurtic kurtosis ( $K > 3$ ) implies a larger accumulation of data near the mean and a rapid fall towards the extremes, whereas a skewness close to 0 suggests a symmetrical distribution. In addition, based on the values of quartiles (which contain 50% of the data), which vary from  $-2.41$  to  $2.50$ , and the standard deviation (red lines in Fig. 3), most of the discrepancies between the two databases lie between relatively small values. Based on that, we can infer that ADTC-InSAR database is, therefore a viable choice for generating InSAR data corrections.

However, the ADTC-InSAR database as being an average over several years may tend to minimize extremes in atmospheric effects. Consequently, there may be greater or lesser differences between the two correction databases depending on the degree of day-to-day variation at a particular location for a particular day. For instance, in the case of the Altiplano winter in the ZVC, this correlates to pairings of dates that contain days that are in periods with greater precipitation.

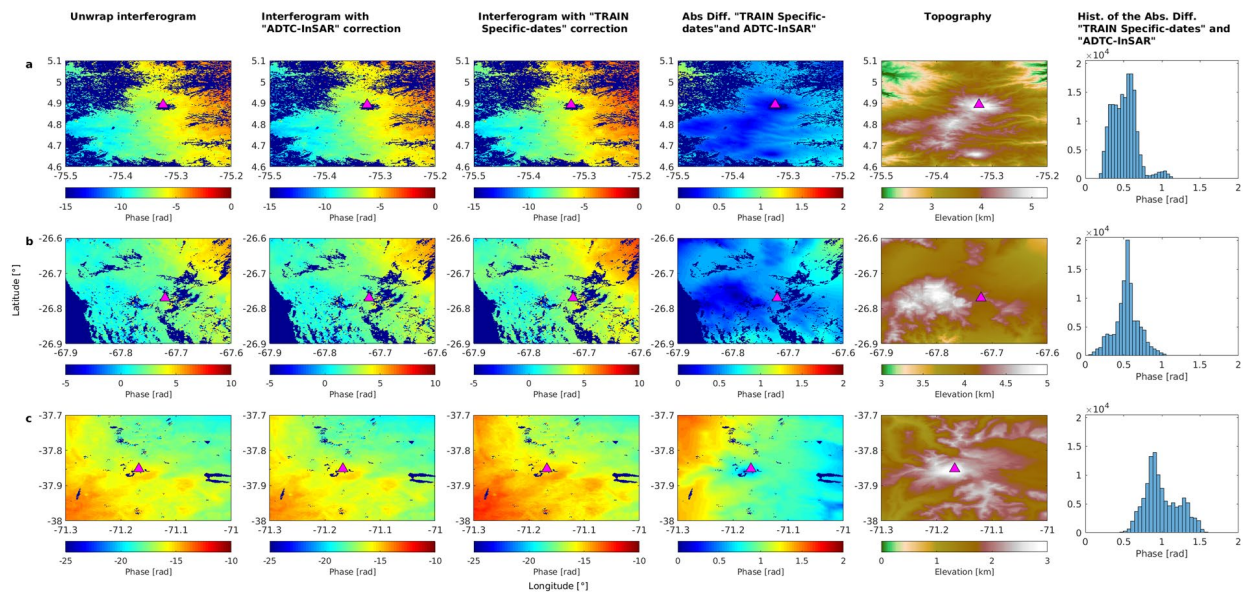
As stated previously, a comparison of corrections applied to interferograms of representative volcanoes from the three climatic zones was performed. Figure 4 shows ALOS-PALSAR data of Nevados del Ruiz (NVZ), Robledo (CVZ) and Copahue (SVZ) volcanoes. These unwrapped interferograms show no deformations, consistent with previous research. In detail, no studies indicate deformation in Nevados del Ruiz between the interferogram dates (March 06, 2008, to March 12, 2010). InSAR and GPS stations have detected deformations at this volcano<sup>61,62</sup>, an increase in seismic activity<sup>63,64</sup>, and the extrusion of a dome since 2015<sup>65</sup>. Even Reath *et al.*<sup>66</sup> indicate that the volcano has behaved like an open system between approximately 2005 and 2012, with no magma injection or ejection from the reservoir. Since 1992, small deformations have been reported at the Robledo volcano<sup>67–69</sup>. Even between 2005 and 2010, deformations of  $0.87$  [cm/yr] were reported<sup>69</sup>, which are not visible in the interferograms of Fig. 4, because they do not cover the same period of time (March 18, 2010 and December 19, 2010) and their low magnitude. Lastly, deflations were detected in the Copahue volcano between 2002 to 2007<sup>11,19,70</sup> and inflation has been observed since 2011<sup>20,22</sup>. However, the interferogram does not span the time period between these two events as it only considers from December 27, 2010, to February 11, 2011.

The second purpose is also to examine the spatial disparities these two correction databases can cause on the interferograms. As a result, “TRAIN specific-dates” and ADTC-InSAR tropospheric corrections were applied to all interferograms (Table 1). The estimation of the difference between the two approaches can be observed in Fig. 4, which displays the results for Nevados del Ruiz, Robledo and Copahue volcanoes. Observed in the first column are unwrapped interferograms. ADTC-InSAR and “TRAIN specific-dates” corrected interferograms are shown in the second and third columns. The fourth column shows the difference between both corrections (in absolute values). In column 5 is the topography of the area. In the sixth column is the difference’s histogram (column 4).

Table 4 presents the statistics pertaining to the comparison of both corrections applied to the interferograms (second and third columns in Fig. 4), followed by its difference (column 4 in Fig. 4) and the statistics of the histogram of column 6 (in Fig. 4). First, note that the spatial variability of the corrected interferograms (second and third column of Fig. 4) are spatially very similar. This is evidenced by the spatial standard deviations of the fields that do not differ significantly. Thus, the standard variations of the second column (corrected with ADTC-InSAR) are  $1.71$ ,  $9.03$  and  $1.21$  [rad], and for the third column (corrected with “TRAIN specific-dates”) are  $1.79$ ,  $8.82$  and  $1.32$  [rad], for Nevados del Ruiz, Robledo, and Copahue, respectively. In the fourth column is the absolute spatial difference. In the case of Nevados del Ruiz and Robledo the difference between both corrections is centered at 0 [rad] (blue tones), while Copahue has mostly values closest to 1 [rad] (from yellow to cyan). It can also be noted that specifically over the summits (Nevados del Ruiz:  $[-75.32^\circ, 4.89^\circ]$ ; Robledo:  $[-67.72^\circ, -26.77^\circ]$ ; Copahue:  $[-71.17^\circ, -37.85^\circ]$ ) is where the differences are the smallest. The latter is confirmed by the values of the histogram, which range from  $0.19$ -to- $1.18$ ,  $0.05$ -to- $0.90$ , and  $0.41$ -to- $1.60$  [rad] for Nevados del Ruiz, Robledo and Copahue, respectively, therein confirming the visual impression. Moreover, means and medians are comparable, with kurtosis varying between  $2.39$  and  $3.34$ , confirming that extremes do not play a meaningful role. Instead, although skewness is low ( $<|0.5|$ ), the difference of corrections established over 500 cases (Fig. 3) shows that, in general, the corrections are symmetrical. Therefore, the asymmetry for these dates is only a particular case.

Lastly, spatial efficiency statistics between the two corrected fields (second and third columns of Fig. 4) are computed (see Table 4). First, spatial correlation is very high ( $R^2 > 0.95$ ) for all the volcanoes. Two efficiency metrics, the *nse* and the modified *d*, were also determined. These vary depending on the analyzed volcanoes and indicate that the ADTC-InSAR correction is very convenient to use in the Nevados del Ruiz (*nse* =  $0.92$  and *d* =  $0.83$ ) and Robledo (*nse* =  $0.78$  and *d* =  $0.73$ ) for these dates. Instead, the efficacy for the Copahue volcano, for these dates, is lower, with *nse* =  $0.40$  and *d* =  $0.57$ . Despite the latter represents low efficiency values, they however imply that the corrections performed to the interferograms are in good agreement.





**Fig. 4** Application of tropospheric correction to a real interferogram at the (a) Nevados del Ruiz, (b) Robledo and (c) Copahue volcanoes: (first column) unwrapped interferograms, in Nevados Del Ruiz between 2008/03/06 and 2010/03/12 (path 447 - frame 3520), in Robledo between 2010/03/18 and 2010/12/19 (path 101 - frame 6640), in Copahue between 2010/12/27 and 2011/02/11 (path 115 - frame 6410; see Table 1); (second column) unwrapped interferogram corrected with ADTC-InSAR; (third column) unwrapped interferogram corrected with “TRAIN specific-dates”; (fourth column) the absolute difference between the correction with ADTC-InSAR and with “TRAIN specific-dates”; (fifth column) the volcanoes topography in kilometers; and (sixth column) a histogram of the absolute difference shown on fourth column. The X-axis of each graphs represent longitude, the Y-axis represents latitude, and the color bars represent phase in radians.

This approach allow concluding that both tropospheric correction procedures behave similarly with small differences on interferograms, most likely due to circumstances on the day the SAR measurements were taken, which are not discernible when using an average mesh, such as ADTC-InSAR.

### Usage Notes

ADTC-InSAR provides information on the total average daily tropospheric delay and its wet and dry components for each days of the year. It can be used to analyze tropospheric delay behavior and correct InSAR data for tropospheric effects. Nevertheless, it must be kept in mind that, depending on the volcano and climatic zone, there are times of the year when the wet component of the average daily tropospheric delay tends to rise (see Fig. 2a,b). Since these grids are average conditions, they may reduce the severity of unusual extreme precipitation circumstances, resulting in discrepancies with a correction based on “TRAIN specific-dates”.

The complete database weighs 49 GB, because ADTC-InSAR is a set of arrays within ASCII-files structures. As a result, the computational capabilities available must be considered. Each file [Abbr.]\_era5\_clim\_[month] contains the average daily tropospheric delays (in cm) for each volcano, where [Abbr.] indicates the volcano according to Table 1, and [month] corresponds to the month. Each of these ASCII files contains a matrix of  $N \times M$ , where each column contains the average daily tropospheric delays for the day of the month ( $M$  is the maximum number of days each month). It should be noted that each value  $n$  ( $< N$ ) of each column has the longitude and latitude position contained in the [Abbr.]\_ll files, respectively (ASCII-files containing 2-column arrays: longitude and latitude; these are found in the LONLAT\_ASCII folder).

Finally, we intend to indicate why this database benefits the scientific community.

Our approach was centered on extreme events requiring effectiveness. Interferogram correction is laborious, time-consuming, and consequently often unattainable in emergency situations. Downloading atmospheric data, processing them with software, and addressing other obstacles requires professional software management, which is not within usual staff capabilities, especially in a crisis. This easily accessible database saves time in generating a preliminary estimate of what is occurring prior to the release of actual datasets, which is crucial for good emergency response.

In addition, a comprehensive description of the mean variability of tropospheric corrections over some specific volcanoes is valuable regardless of the occurrence of an extreme event. Practically, this database may be used to estimate the optimal time of year to gather InSAR data based on the behavior of the tropospheric delay throughout the year. It can already serve as a comparative reference for reanalysis purposes. Thus, in the future, in addition to expanding the temporal range covered by the daily means, so that they may be used as a reference for certain decades, we will expand the database geographically to cover not only additional volcanic zones, but also specific regions of interest for SAR research<sup>71</sup>.

We emphasize that, only a basic installation of Matlab or Python is required. This is convenient since it accommodates the user's preferences and demands without requiring much effort.

Finally, based on all the above, this data set can also be used as a practical resource for undergraduate and postgraduate courses in geoscience institutions.

### Code availability

ADTC-InSAR<sup>33</sup> has been developed in MathWorks MATLAB version R2019a<sup>72</sup> using TRAIN MATLAB software. It is possible to generate tropospheric corrections for the previously mentioned volcanoes using the Corr\_\_ADTC\_InSAR.m and Corr\_\_ADTC\_InSAR.py scripts.

Received: 3 December 2021; Accepted: 26 July 2022;

Published online: 27 August 2022

### References

1. Simons, M., Fialko, Y. & Rivera, L. Coseismic Deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GPS Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America* **92**, 1390–1402, <https://doi.org/10.1785/0120000933> (2002).
2. Riedel, B. & Walther, A. InSAR processing for the recognition of landslides. *Advances in Geosciences* **14**, 189–194, <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-189-2008> (2008).
3. Yin, Y., Zheng, W., Liu, Y., Zhang, J. & Li, X. Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiayu landslide in Sichuan, China. *Landslides* **7**, 359–365, <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0225-9> (2010).
4. Massonnet, D., Briole, P. & Arnaud, A. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature* **375**, 567–570, <https://doi.org/10.1038/375567a0> (1995).
5. Chang, W.-L., Smith, R. B., Farrell, J. & Puskas, C. M. An extraordinary episode of Yellowstone caldera uplift, 2004–2010, from GPS and InSAR observations. *Geophysical Research Letters* **37**, <https://doi.org/10.1029/2010GL045451> (2010).
6. Biggs, J., Lu, Z., Fournier, T. & Freymueller, J. T. Magma flux at Okmok Volcano, Alaska, from a joint inversion of continuous GPS, campaign GPS, and interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **115**, <https://doi.org/10.1029/2010JB007577> (2010).
7. Morishita, Y. *et al.* LiCSBAS: An Open-Source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor. *Remote Sensing* **12**, <https://doi.org/10.3390/rs12030424> (2020).
8. Albino, F., Biggs, J., Yu, C. & Li, Z. Automated Methods for Detecting Volcanic Deformation Using Sentinel-1 InSAR Time Series Illustrated by the 2017–2018 Unrest at Agung, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **125**, e2019JB017908, <https://doi.org/10.1029/2019JB017908> (2020).
9. Zebker, H. A., Rosen, P. A. & Hensley, S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **102**, 7547–7563, <https://doi.org/10.1029/96JB03804> (1997).
10. Misra, P. & Enge, P. *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, revised second ed (2012).
11. Fournier, T. J., Pritchard, M. E. & Riddick, S. N. Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **11**, <https://doi.org/10.1029/2009GC002558> (2010).
12. Bathke, H., Shirzaei, M. & Walter, T. R. Inflation and deflation at the steep-sided Llaima stratovolcano (Chile) detected by using InSAR. *Geophysical Research Letters* **38**, <https://doi.org/10.1029/2011GL047168> (2011).
13. Delgado, F., Pritchard, M. E., Ebmeier, S., González, P. & Lara, L. Recent unrest (2002–2015) imaged by space geodesy at the highest risk Chilean volcanoes: Villarrica, Llaima, and Calbuco (Southern Andes). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **344**, 270–288, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.020> (2017). Volcano Geodesy: Recent developments and future challenges.
14. Remy, D. *et al.* Revised interpretation of recent InSAR signals observed at Llaima volcano (Chile). *Geophysical Research Letters* **42**, 3870–3879, <https://doi.org/10.1002/2015GL063872> (2015).
15. Beck, H. E. *et al.* Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data* **5**, 1–12, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214> (2018).
16. Rosen, P. *et al.* Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE* **88**, 333–382, <https://doi.org/10.1109/5.838084> (2000).
17. Nikkhoo, M., Walter, T. R., Lundgren, P. R. & Prats-Iraola, P. Compound dislocation models (CDMs) for volcano deformation analyses. *Geophysical Journal International* **208**, 877–894, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw427> (2016).
18. Elliott, J. R., Biggs, J., Parsons, B. & Wright, T. J. InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophysical Research Letters* **35**, <https://doi.org/10.1029/2008GL033659> (2008).
19. Velez, M. L., Euillades, P., Caselli, A., Blanco, M. & Díaz, J. M. Deformation of Copahue volcano: Inversion of InSAR data using a genetic algorithm. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **202**, 117–126, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.01.012> (2011).
20. Velez, M., Euillades, P., Blanco, M. & Euillades, L. Ground deformation between 2002 and 2013 from InSAR observations. In *Copahue volcano*, 175–198, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-48005-2_8) (Springer, 2016).
21. Lundgren, P., Kiryukhin, A., Milillo, P. & Samsonov, S. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **307**, 79–88, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011> (2015). SI: 2012–13 Tolbachik eruption.
22. Lundgren, P. *et al.* Source model for the Copahue volcano magma plumbing system constrained by InSAR surface deformation observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **122**, 5729–5747, <https://doi.org/10.1002/2017JB014368> (2017).
23. Tizzani, P. *et al.* Magma and fluid migration at Yellowstone Caldera in the last three decades inferred from InSAR, leveling, and gravity measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **120**, 2627–2647, <https://doi.org/10.1002/2014JB011502> (2015).
24. Le Mével, H., Gregg, P. M. & Feigl, K. L. Magma injection into a long-lived reservoir to explain geodetically measured uplift: Application to the 2007–2014 unrest episode at Laguna del Maule volcanic field, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **121**, 6092–6108, <https://doi.org/10.1002/2016JB013066> (2016).
25. Euillades, P. A. *et al.* Co-eruptive subsidence and post-eruptive uplift associated with the 2011–2012 eruption of Puyehue-Cordón Caulle, Chile, revealed by DInSAR. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **344**, 257–269, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.023> (2017). Volcano Geodesy: Recent developments and future challenges.
26. Wendt, A. *et al.* Possible structural control on the 2011 eruption of Puyehue-Cordón Caulle Volcanic Complex (southern Chile) determined by InSAR, GPS and seismicity. *Geophysical Journal International* **208**, 134–147, <https://doi.org/10.1093/gji/ggw355> (2016).
27. Jay, J. *et al.* Locating magma reservoirs using InSAR and petrology before and during the 2011–2012 Cordón Caulle silicic eruption. *Earth and Planetary Science Letters* **395**, 254–266, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.046> (2014).

28. Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. & Fielding, E. J. Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Planets* **101**, 23109–23125, <https://doi.org/10.1029/96JE01459> (1996).
29. Yu, C., Li, Z. & Penna, N. T. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment* **204**, 109–121, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.038> (2018).
30. Onn, F. & Zebker, H. A. Correction for interferometric synthetic aperture radar atmospheric phase artifacts using time series of zenith wet delay observations from a GPS network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **111**, <https://doi.org/10.1029/2005JB004012> (2006).
31. Hofmeister, A. *Determination of path delays in the atmosphere for geodetic VLBI by means of ray-tracing*. Ph.D. thesis, Wien <https://doi.org/10.34726/hss.2016.21899> (2016).
32. Haji Aghajany, S. & Amerian, Y. Three dimensional ray tracing technique for tropospheric water vapor tomography using GPS measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **164**, 81–88, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.003> (2017).
33. Haji-Aghajany, S., Voosoghi, B. & Amerian, Y. Estimating the slip rate on the north Tabriz fault (Iran) from InSAR measurements with tropospheric correction using 3D ray tracing technique. *Advances in Space Research* **64**, 2199–2208, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.08.021> (2019).
34. Haji-Aghajany, S. & Amerian, Y. Atmospheric phase screen estimation for land subsidence evaluation by InSAR time series analysis in Kurdistan, Iran. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **205**, 105314, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105314> (2020).
35. Poland, M. P. *et al.* Volcano geodesy in the Cascade arc, USA. *Bulletin of Volcanology* **79**, 1–33, <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1140-x> (2017).
36. Cao, Y., Jónsson, S. & Li, Z. Advanced InSAR Tropospheric Corrections From Global Atmospheric Models that Incorporate Spatial Stochastic Properties of the Troposphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **126**, e2020JB020952, <https://doi.org/10.1029/2020JB020952> (2021).
37. Aghajany, S. H., Voosoghi, B. & Yazdian, A. Estimation of north Tabriz fault parameters using neural networks and 3D tropospherically corrected surface displacement field. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* **8**, 918–932, <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1289248> (2017).
38. Roukounakis, N. *et al.* Tropospheric Correction of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Interferograms Using a High-Resolution Weather Model Validated by GNSS Measurements. *Remote Sensing* **13**, <https://doi.org/10.3390/rs13122258> (2021).
39. Jolivet, R., Grandin, R., Lasserre, C., Doin, M.-P. & Peltzer, G. Systematic InSAR tropospheric phase delay corrections from global meteorological reanalysis data. *Geophysical Research Letters* **38**, <https://doi.org/10.1029/2011GL048757> (2011).
40. Jolivet, R. *et al.* Improving InSAR geodesy using Global Atmospheric Models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **119**, 2324–2341, <https://doi.org/10.1002/2013JB010588> (2014).
41. Cao, Y., Jónsson, S. & Li, Z. Robust InSAR Tropospheric Delay Correction Using Global Atmospheric Models. EGU21–11636, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11636> (2021).
42. Bekaert, D., Walters, R., Wright, T., Hooper, A. & Parker, D. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment* **170**, 40–47, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035> (2015).
43. Bekaert, D. P. S., Hooper, A. & Wright, T. J. A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **120**, 1345–1356, <https://doi.org/10.1002/2014JB011558> (2015).
44. Doin, M.-P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O. & Doubre, C. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics* **69**, 35–50, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.03.010> (2009). Advances in SAR Interferometry from the 2007 Fringe Workshop.
45. Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. & Wessel, P. Open radar interferometry software for mapping surface Deformation, <https://doi.org/10.1029/2011EO280002> (2011).
46. Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M. & Wessel, P. GMTSAR: An InSAR processing system based on generic mapping tools. *UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography* (2011).
47. (SRTM), N. S. R. T. M. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. *OpenTopography* <https://doi.org/10.5069/G9445JDF> (2013).
48. Muñoz Sabater, J. Era5-land hourly data from 1981 to present. *ECMWF* <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (2012).
49. Muñoz Sabater, J. Era5-land hourly data from 1950 to 1980. *ECMWF* <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (2012).
50. Kroese, D. P., Breton, T., Taimre, T. & Botev, Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. *WIREs Computational Statistics* **6**, 386–392, <https://doi.org/10.1002/wics.1314> (2014).
51. Nash, J. & Sutcliffe, J. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282–290, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6) (1970).
52. Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography* **2**, 184–194, <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213> (1981).
53. López Pozo, F., Abarca-del-Río, R. & Lara, L. Climatology of tropospheric delay in InSAR data applied as tropospheric correction to volcanoes in Los Andes. *Figshare*, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5715728.v1> (2022).
54. Roncancio, D., Lecha, L. & Nardocci, A. Classification of daily weather types in Colombia: a tool to evaluate human health risks due to temperature variability. *International journal of biometeorology* **64**, 1795–1806, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01963-4> (2020).
55. Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M. & Meseguer-Ruiz, Ó. Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps* **13**, 66–73, <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592> (2017).
56. Lenters, J. & Cook, K. Summertime precipitation variability over South America: Role of the large-scale circulation. *Monthly Weather Review* **127**, 409–431, [10.1175/1520-0493\(1999\)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<0409:SPVOSA>2.0.CO;2) (1999).
57. Urrea, V., Ochoa, A. & Mesa, O. Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research* **55**, 4149–4162, <https://doi.org/10.1029/2018WR023316> (2019).
58. Garreaud, R., Vuille, M. & Clement, A. C. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **194**, 5–22, [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4). Late-quaternary palaeoclimates of the southern tropical Andes and adjacent regions (2003).
59. Torres-Batló, J. & Martí-Cardona, B. Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology* **590**, 125485, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125485> (2020).
60. Hanssen, R. & Feijt, A. A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR interferometry. *ERS SAR Interferometry* **406**, 277 (1997).
61. Lundgren, P., Samsonov, S. V., López Velez, C. M. & Ordoñez, M. Deep source model for Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, constrained by interferometric synthetic aperture radar observations. *Geophysical Research Letters* **42**, 4816–4823, <https://doi.org/10.1002/2015GL063858> (2015).
62. Hernández Serrato, A. & Noboa Tobar, J. A. Monitoreo de la deformación del Volcán Nevado del Ruiz mediante el procesamiento de datos GNSS a través del Sistema de Referencia Espacial Canadiense. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas* (2021).
63. Ordoñez, M. *et al.* Keeping watch over colombia's slumbering volcanoes. *Eos* **96**, 12–17, <https://doi.org/10.1029/2015EO025079> (2015).

64. Londoño, J. M. & Kumagai, H. 4D seismic tomography of Nevado del Ruiz Volcano, Colombia, 2000–2016. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **358**, 105–123, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.015> (2018).
65. Londoño, J. M. Evidence of recent deep magmatic activity at Cerro Bravo-Cerro Machín volcanic complex, central Colombia. Implications for future volcanic activity at Nevado del Ruiz, Cerro Machín and other volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **324**, 156–168, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.06.003> (2016).
66. Reath, K. *et al.* Using Conceptual Models to Relate Multiparameter Satellite Data to Subsurface Volcanic Processes in Latin America. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **21**, e2019GC008494, <https://doi.org/10.1029/2019GC008494> (2020).
67. Pritchard, M. E. & Simons, M. An InSAR-based survey of volcanic deformation in the central Andes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **5**, <https://doi.org/10.1029/2003GC000610> (2004).
68. Henderson, S. T. & Pritchard, M. E. Decadal volcanic deformation in the Central Andes Volcanic Zone revealed by InSAR time series. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **14**, 1358–1374, <https://doi.org/10.1002/ggge.20074> (2013).
69. Brunori, C., Bignami, C., Stramondo, S. & Bustos, E. 20 years of active deformation on volcano caldera: Joint analysis of InSAR and AInSAR techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **23**, 279–287, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.003> (2013).
70. Euillades, P., Velez, M., Meljem, M., Cadelli, A. & Martinez-Diaz, J. DInSAR SBAS data processing in the southern Andes: The Copahue-Agrio Caldera study case, paper presented at 4th Alexander von Humboldt International Conference. *Eur. Geosci. Union, Santiago* (2008).
71. Euillades, P. *et al.* Recent advancements in multi-temporal methods applied to new generation SAR systems and applications in South America. *Journal of South American Earth Sciences* **111**, 103410, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103410> (2021).
72. MATLAB. *R2019a* (The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, 2019).

### Acknowledgements

This is a contribution of the Southern Andes GEO Supersite (<https://geo-gsnl.org>). F.L. acknowledges ANID BECAS/DOCTORADO NACIONAL 21181860. The contributions of L.E.L. were supported by Fondecyt grant #1211792 and CIGIDEN-Fondap grant #151100. We are also grateful to the three reviewers for their dedication to our work, which has been considerably enhanced by their suggestions and criticisms.

### Author contributions

F.L.P.: writing, modeling and data archiving; R.A.D.R.: writing, conceptual design and supervision; L.E.L.: review and supervision.

### Competing interests

The authors declare no competing interests.

### Additional information

**Correspondence** and requests for materials should be addressed to F.L.-P.

**Reprints and permissions information** is available at [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints).

**Publisher's note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022

## Anexo 2. Script Corrección Troposferica

Los script y datos de pruebas se pueden encontrar en [https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/fernandalopez\\_udec\\_cl/EgfneAA4D6d0tkjSVq\\_z5\\_8B3MP6GLAp52hcAvtluZ6l6A?e=U3jDLs](https://udeconce-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/fernandalopez_udec_cl/EgfneAA4D6d0tkjSVq_z5_8B3MP6GLAp52hcAvtluZ6l6A?e=U3jDLs). El script esta redactado en python para datos ASCII y se facilita un interferograma de prueba.

### CorreccionTroposferica\_ASCII.py

```
import tensorflow as tf
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import scipy.io
import math
import os

#%% Funciones

def yyyyymmdd_juliano(yyyy,mm,dd):
    juliano = 0
    for i in range(mm):
        mes = i+1
        if mes == 1 or mes == 3 or mes == 5 or mes == 7 or mes == 8 or mes == 10 or mes == 12 :
            if mes != mm:
                juliano = juliano + 31
        elif mes == 4 or mes == 6 or mes == 9 or mes == 11 :
            if mes != mm:
                juliano = juliano + 30
        elif mes == 2:
            if yyyy % 4 == 0 and (yyyy % 100 != 0 or yyyy % 400 == 0):
                if mes != mm:
                    juliano = juliano + 28
            else:
                if mes != mm:
                    juliano = juliano + 29
    juliano = juliano + dd

    return(juliano)

def name_mes(mm):
    if mm == 1:
        mes = 'January'
    elif mm == 2:
        mes = 'February'
```

```

elif mm == 3:
    mes = 'March'
elif mm == 4:
    mes = 'April'
elif mm == 5:
    mes = 'May'
elif mm == 6:
    mes = 'June'
elif mm == 7:
    mes = 'July'
elif mm == 8:
    mes = 'August'
elif mm == 9:
    mes = 'September'
elif mm == 10:
    mes = 'October'
elif mm == 11:
    mes = 'November'
elif mm == 12:
    mes = 'December'

return(mes)

#%% PARAMETROS A INGRESAR
# Adquisición datos SAR
fechas = np.array([ [2007 ,10 , 16 ,3.5 ], # año, mes, día, hora de imagen Primaria
                   [ 2008 ,3 ,4 ,3.5 ] ] # año, mes , día, hora de imagen Secundaria

# Longitud de onda [cm]
# lambda = 23.40 # ALOS
lambda = 5.62 # ENVISAT

#%% Ejecución Primera Red Neuronal
stat_name = 'Modelos/estadisticas_ReLU_Adam_G17_est02.csv'
modelo = tf.keras.models.load_model('Modelos/ReLU_Adam_G17_est02')

# Cargar datos
Fig_Vn = "Lla_"
Vn_Carpeta = 'Llaima'
ll = np.loadtxt('ADTC-InSAR/LONLAT_ASCII/'+Fig_Vn+'ll',delimiter=',')
hgt = np.loadtxt('ADTC-InSAR/LONLAT_ASCII/'+Fig_Vn+'hgt')

INPUT = np.zeros((len(ll[:,1]),6,len(fechas[:,0])))
input_norm = np.zeros((len(ll[:,1]),6,len(fechas[:,0])))
predict = np.zeros((len(ll[:,1]),2))
for i in range(len(fechas[:,0])):
    # generación matriz de entrada
    INPUT[:,0,i] = hgt[:,i]

```

```

INPUT[:,1,i] = fechas[i][0]
INPUT[:,2,i] = yyyymmdd_juliano(int(fechas[i][0]),int(fechas[i][1]),int(fechas[i][2]))
INPUT[:,3,i] = fechas[i][3]

a = np.loadtxt('ADTC-InSAR/'+Vn_Carpeta+'_ASCII/'+Fig_Vn+'era5_clim_'+name_mes(fechas[i][1]),delimiter=',')
# a = mat['era5_clim'][0,int(j)[1]:,0]
a = a[:,int(fechas[i][2])-1]

b = np.loadtxt('ADTC-InSAR/'+Vn_Carpeta+'_ASCII/'+Fig_Vn+'era5_dry_clim_'+name_mes(fechas[i][1]),delimiter=',')
b = b[:,int(fechas[i][2])-1]

# b = mat['era5_hydro_clim'][0,int(fechas[i][2])-1][1]:,0]

for j in range(len(a)):
    INPUT[j,4,i] = a[j,]
    INPUT[j,5,i] = b[j,]

# normalizar input
stats = pd.read_csv(stat_name)
for j in range(len(stats['mean'])):
    input_norm[:,j,i] = (INPUT[:,j,i] - stats['mean'][j]) / stats['std'][j]

# ejecutar red
p = modelo.predict(input_norm[:,:,i])
for j in range(len(p)):
    predict[j,i] = p[j,0]

### Ejecución Segunda Red Neuronal
modelo = tf.keras.models.load_model('Modelos/Sigmoid_Adam_G06_est25', compile=False)
train_stats = pd.read_csv('Modelos/estadisticas_ML2.csv')

# generación matriz de entrada
INPUT = np.zeros((len(l1[:,1]),8))
INPUT[:,0] = fechas[0][0] # año imagen Primaria
INPUT[:,2] = fechas[0][1] # mes imagen Primaria
INPUT[:,4] = fechas[0][2] # día imagen Primaria
INPUT[:,1] = fechas[1][0] # año imagen Secundaria
INPUT[:,3] = fechas[1][1] # mes imagen Secundaria
INPUT[:,5] = fechas[1][2] # mes imagen Secundaria
INPUT[:,6] = fechas[1][3] # hora
INPUT[:,7] = -4*math.pi/lambd*(predict[:,1]-predict[:,0]) # Corrección desde la Primera red

# normalizar
input_norm = INPUT*0
for j in range(len(train_stats['mean'])):
    input_norm[:,j] = (INPUT[:,j] - train_stats['mean'][j]) / train_stats['std'][j]
name_columnas = ['ano_M', 'ano_S', 'mes M', 'mes_S', 'dia_M', 'dia_S', 'hora', 'corr_ML1']
input_df = pd.DataFrame(input_norm,columns=name_columnas)

# ejecutar red
predict_ML2 = modelo.predict(input_df)

### Interpolación corrección

```

```

# cargar datos de interferograma
data_inf = 'Interferograma_Llaima_ASCII/'
ll_p = np.loadtxt(data_inf+'ll') # logitud y latitud
hgt = np.loadtxt(data_inf+'hgt') # topografia
PHUW = np.loadtxt(data_inf+'phuw') # interferograma

# interpolacion
correccion = scipy.interpolate.griddata(ll, predict_ML2, ll_p, method='cubic')

# 1D a 2D
lon_p = np.zeros((len(np.unique(ll_p[:,1])),len(np.unique(ll_p[:,0]))))
lat_p = np.zeros((len(np.unique(ll_p[:,1])),len(np.unique(ll_p[:,0]))))
phuw = np.zeros((len(np.unique(ll_p[:,1])),len(np.unique(ll_p[:,0]))))
corr = np.zeros((len(np.unique(ll_p[:,1])),len(np.unique(ll_p[:,0]))))
alt = np.zeros((len(np.unique(ll_p[:,1])),len(np.unique(ll_p[:,0]))))
con = 0
for i in range(len(np.unique(ll_p[:,0]))):
    for j in range(len(np.unique(ll_p[:,1]))):
        lon_p[j,i] = ll_p[con,0]
        lat_p[j,i] = ll_p[con,1]
        phuw[j,i] = PHUW[con,]
        corr[j,i] = correccion[con,0]
        alt[j,i] = hgt[con,]
        con = con + 1

## Graficar

plt.figure()
plt.contourf(lon_p,lat_p,alt,cmap='gray')
plt.contourf(lon_p,lat_p,phuw-corr)

## Guardar datos
dir_output = 'Correccion_ASCII/'
if os.path.exists(dir_output) == False:
    os.mkdir(dir_output)
if os.path.exists(dir_output+"correccion") == True:
    os.remove(dir_output+"correccion")
if os.path.exists(dir_output+"phuw") == True:
    os.remove(dir_output+"phuw")
if os.path.exists(dir_output+'lat') == True:
    os.remove(dir_output+'lat')
if os.path.exists(dir_output+'lon') == True:
    os.remove(dir_output+'lon')
if os.path.exists(dir_output+'hgt') == True:
    os.remove(dir_output+'hgt')

np.savetxt(dir_output+"correccion", corr,'%5.10f')
np.savetxt(dir_output+"phuw", phuw,'%5.10f')

```



```
np.savetxt(dir_output+'lat', lat_p, '%5.10f')
np.savetxt(dir_output+'lon', lon_p, '%5.10f')
np.savetxt(dir_output+'hgt', alt, '%5.10f')
```

### Anexo 3. Material suplementario capítulo 3

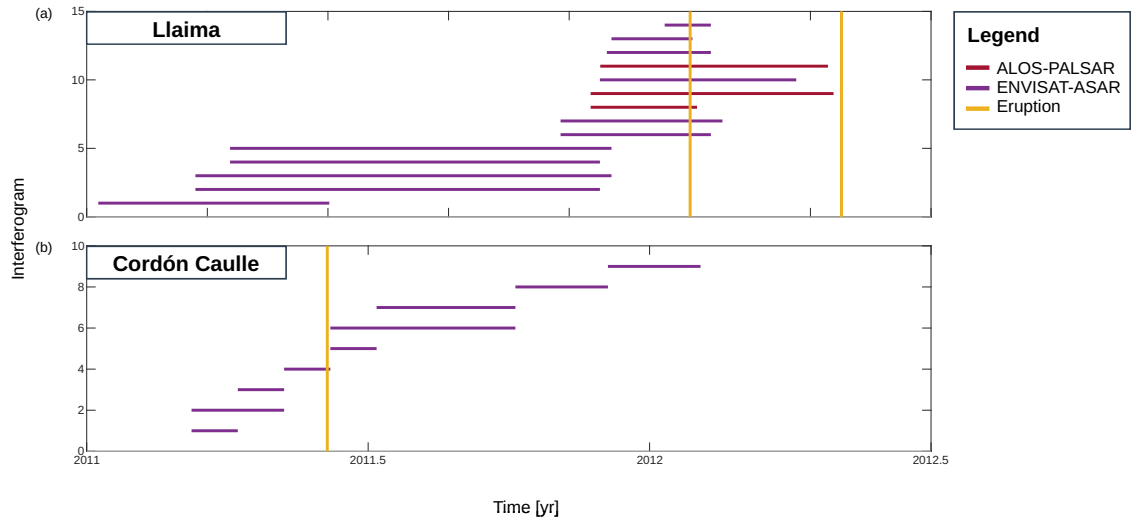


Figura 24: Interferograms with ALOS-PALSAR and ENVISAT-ASAR data generated for (a) Llama volcano and (b) Cordón Caulle.