

"Metodología para ajuste y validación de DEMs InSAR en áreas urbanas con datos GNSS"

Por **Jorge Guillermo O'Connor**

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES DE INFORMACIÓN ESPACIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Junio, 2020

©IG-CONAE 2020
©FaMAF-UNC 2020

DIRECTOR

Doctor Elvio Ángel Pilotta

FAMAF-CIEM, Córdoba, Argentina

CO-DIRECTOR

Doctora Francesca Cigna

Agenzia Spaziale Italiana, Roma, Italia

ASESOR METODOLÓGICO:

Doctor Deodato Tapete

Agenzia Spaziale Italiana, Roma, Italia



Metodología para ajuste y validación de DEMs InSAR en áreas urbanas con datos GNSS
por Jorge Guillermo O'CONNOR se distribuye bajo una **Creative Commons**
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

A Faustina, Luana, Ursula Renata (te estamos esperando), Emma, Amparito y demás sobrinos. A esas personas que han creído en mí, inclusive mas que yo mismo en algunas ocasiones. Aprovecho para dejarles un consejo a mis sobrinos actuales y los que vendrán. Respétense, respeten al prójimo, sean sinceros, constantes, vuelen alto y aprendan de nuestros errores.

Jor

Agradecimientos

A mis papás (Lucia y Ricardo), mis hermanos (Julia, Laura, Juan y Javier), tíos y primos. Son el mejor regalo que me dio el universo y me han apoyado en mi camino personal, académico y profesional. A mi familia italiana (Mario, Silvana, Cecilia, Christian, Páolo, Lorena y su familia, Miryam y su familia y Sarita) cuya ayuda y afecto hicieron de Italia un hogar mas para mí. A mis hermanos y hermanas del corazón (Esteban, Adrian, Vir, Chano, Fede y sus familias) por siempre creer y motivar para seguir adelante. A Sofía, Julio y Cristina por incentivar me a hacer la maestría. Solo soy el ejecutor de un trabajo conjunto con Francesca y Deodato de la Agencia Espacial Italiana (ASI), Laura y Diego del Área de Sensores Remotos (ASR), Nestor y Guillermo del Departamento de Cartografía Digital de la Municipalidad de Rosario (DCD-MR), Gustavo Noguera de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), Gabriel y Mario de la Maestría en Aplicación de Información Espacial (MAIE) y mi director de tesis Elvio, con un rol académico fundamental, pero también un valioso pilar anímico. Al sistema de educación pública Argentina por mis estudios primarios, secundarios y universitarios gratuitos y de excelencia. A todos los docentes de ese recorrido porque de una u otra manera me dejaron enseñanzas, sabiduría, pasión y convicción para seguir aprendiendo. Agradezco a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) donde hice un notable perfeccionamiento profesional con mis directores Eduardo y Manuel y tantos otros amigos de la casa. Los convenios binacionales en el marco del proyecto Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (SIASGE) que me posibilitaron cursar la MAIE en el Centro Espacial Teófilo Tabanera (CETT) y hacer mi pasantía en la ASI donde fui tratado como en casa. En esa misma línea, agradezco a las autoridades y personal del Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich (IG), Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y ASI por las excelentes condiciones que me permitieron enfocarme exclusivamente en los aspectos académicos. A la familia de ASI (Antonella, Daniele, Silvia, Marco, Massimo, Mirella, Riccardo, Mario, Pier, Alessandra, Leonardo, Alessio Rosa, Caterina, Jared, Vincenzo y tantísimos más) y los amigos del CETT que son cientos. A la Federación Argentina de Agrimensores (FADA) por apostar a la investigación y desarrollo. A mis compañeros de la MAIE de los que me llevo afecto, gratitud por el aliento en el momento de duda y aprendizajes desde sus disciplinas y subjetividades. A Maurito, por la amistad, la confianza y la ayuda. A Yenni, por la ayuda, los recorridos y los aprendizajes. Las palabras indicadas y en el momento justo de mi amigo Martín. A Ivette (una luz del universo) y Marielita por brindarme un hogar, contención, afecto y me hicieron parte de su familia. Gracias a todos por confiar y hacerme sentir en casa en Córdoba, Rosario, Trelew y Roma.

Reconocimiento Institucional

Este trabajo se realizó en el marco de la MAIE que desarrolló el Ingeniero Agrimensor Jorge Guillermo O'Connor incluyendo la pasantía del mismo en la ASI en el período del 01/04/2019 al 30/09/2019, bajo la supervisión de la Dra. Ing. F. Cigna y del Dr. D. Tapete de ASI. El Ing. Agrim. J. G. O'Connor es becario de la MAIE, de la CONAE, el IG y la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Imágenes Constelación de pequeños satélites para la observación de la cuenca del Mediterráneo (COSMO-SkyMed) HIMAGE de Nivel 1C, © ASI (2010-2019), provistas por ASI a la CONAE para el proyecto "Ajuste y validación de DEMs InSAR en áreas urbanas mediante datos GNSS" en el marco del SIASGE. Todos los derechos reservados.

Resumen

El presente trabajo propone una metodología para obtener Modelo Digital de Elevaciones (DEM) mediante Interferometría con radar de apertura sintética (InSAR) ajustados y validados utilizando datos del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) medidos en campo. Para la generación de los DEM InSAR se utilizaron imágenes Radar de apertura sintética (SAR) de la misión COSMO-SkyMed de la ASI y el Plataforma de aplicaciones para el Sentinel (SNAP ESA) de la Agencia Espacial Europea (ESA) mientras que, para obtener los 58 puntos de ajuste y los 39 puntos de validación se utilizaron receptores Trimble R6 y el software Trimble para procesamiento Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) (TBC). Tanto el ajuste como la validación se programaron utilizando el lenguaje Python mientras que, las herramientas matemáticas de ajuste fueron una superficie spline lineal y una superficie spline cúbica (función de base radial). Como área de estudio se seleccionó la ciudad de Rosario, Argentina. En la validación, se comparó el DEM COSMO-SkyMed ajustado con los 39 puntos GNSS de control y se obtuvo una diferencia media de 0.85 metros.

Palabras clave: DEM ,InSAR, ajuste, validación, errores.

Abstract

This work proposes a methodology to obtain DEM from InSAR, adjusted and validated using GNSS data acquired in the field. To generate the InSAR DEM, SAR images from the ASI COSMO-SkyMed mission were used and processed with the SNAP ESA software from the ESA. On the other hand, to obtain the 58 adjustment points and 39 validation points the Trimble R6 receiver and TBC software were used. Adjustment and validation were programmed in Python, using a linear spline and cubic spline (radial basis function) to develop the surfaces as mathematical tools for the adjustment. The selected case study is the city of Rosario, Argentina. In the validation, the adjusted COSMO-SkyMed DEM and the 39 GNSS control points were compared and an average difference of 0.85 meters was obtained.

Keywords: DEM, InSAR, adjustment, validation, errors.

Índice de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo General	1
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.1.3. Disponibilidad de datos	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Error experimental del caso de estudio	4
2.3. Sistema de puntos de control en Tierra	5
2.3.1. Coordenadas en el espacio mediante GNSS	5
2.3.2. Determinación de distancias con GNSS	5
2.3.3. Constitución de un GNSS	7
2.3.4. Sobre los errores	8
2.4. Marco Geodésico Argentino	8
2.4.1. Procesamiento Diferencial GNSS	9
2.4.2. Redes Geodésicas	10
2.4.3. Vinculaciones a Redes Geodésicas	11
2.5. Obtención de un DEM mediante InSAR	12
2.5.1. Fundamentos físicos de la InSAR	12
2.5.2. Sobre las imágenes SAR satelitales	12
2.5.3. Geometría de adquisición y distorsiones geométricas SAR	13

2.5.4.	Observación de fase y altura topográfica	13
2.5.5.	Sobre la precisión de la fase interferométrica	15
2.5.5.1.	Coherencia interferométrica y decorrelación	15
2.5.5.2.	Medidas para obtener mejor coherencia	16
2.5.6.	Errores de órbita	17
2.5.7.	Influencia de atmósfera	17
2.5.8.	Multilooking y filtro de Goldstein	17
2.5.9.	Desenrollado de fase	17
2.5.10.	El proceso InSAR y sus resultados	18
2.6.	La misión COSMO-SkyMed	18
2.6.1.	Georreferenciación de imágenes COSMO-SkyMed	19
2.7.	Remuestreo de datos raster	19
2.8.	Métodos de interpolación	21
2.8.1.	Interpolación lineal por partes o spline de primer grado	21
2.8.2.	Splines cúbicos	23
2.9.	Ajuste de superficies DEM	25
2.10.	Procesamiento digital de imágenes	25
2.10.1.	Filtros en el dominio del espacio	26
2.10.2.	Filtros en el dominio de la frecuencia	26
2.11.	Herramientas estadísticas	26
3.	Área de estudio	27
3.1.	Localización del área de estudio	27
3.2.	Características urbanísticas	27
3.3.	Características ambientales	29
4.	Metodología e implementación	30
4.1.	Input data	30
4.1.1.	GNSS	30
4.1.2.	Imágenes SAR COSMO-SkyMed	32
4.1.3.	Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM) de 1 arc sec	33
4.1.4.	Modelo Digital de Elevaciones Argentina (MDE-Ar) del Instituto Geográfico Nacional (IGN)	33
4.1.5.	Aerofotogramétrico del IGN	34
4.2.	Software	34

4.2.1.	TBC	34
4.2.2.	SNAP ESA	34
4.2.3.	QGIS	35
4.2.4.	Python	35
4.3.	Implementación en el área de estudio	36
4.3.1.	Puntos de control	36
4.3.1.1.	Relevamiento GNSS	37
4.3.1.2.	Procesamiento Diferencial en TBC	37
4.3.1.3.	Vinculación de puntos GNSS	38
4.3.2.	InSAR con imágenes COSMO-SkyMed en SNAP ESA	39
4.3.2.1.	Preprocesamiento	39
4.3.2.2.	Implementando los procesos InSAR en SNAP ESA	39
4.3.3.	Sobre los resultados en relación a las distorsiones geométricas	43
4.3.4.	Ediciones previas del modelo a validez y ajustar	43
4.3.5.	Remuestreo de un DEM	44
4.3.6.	Bandeado vertical en los resultados InSAR	44
4.3.7.	Control de resultados por comparación	44
4.4.	Ajuste y validación	46
4.4.1.	Inicio del programa	46
4.4.2.	Ejecutar el ajuste de datos	49
4.4.3.	Ejecutar la validación de datos	49
4.4.4.	Ventanas gráficas y almacenamiento	49
5.	Resultados	50
5.1.	Python	50
5.1.1.	Cálculos estadísticos	61
5.2.	Histogramas en QGIS	61
6.	Conclusiones	63
6.1.	Análisis de resultados	63
6.1.1.	Input/output - GNSS	63
6.1.2.	Input/output - InSAR	63
6.1.3.	El ajuste y la validación	64
6.2.	Sobre los objetivos	64

7. Formación y Difusión	65
7.1. Summer School 2019 - IEEE GRSS IFT-R3S	65
7.2. XII Congreso Nacional de Agrimensura	65
8. Trabajos Futuros	66

Acrónimos

ADT Red Geodésica Acosta, Dannenberg, Tanabe

ASI Agencia Espacial Italiana

ASR Área de Sensores Remotos

CAAF CONAE ASI ASR FAMAF

CETT Centro Espacial Teófilo Tabanera

CNEA Comisión Nacional de Energía Atómica

CONAE Comisión Nacional de Actividades Espaciales

COSMO-SkyMed Constelación de pequeños satélites para la observación de la cuenca del Mediterráneo

DCD-MR Departamento de Cartografía Digital de la Municipalidad de Rosario

DEM Modelo Digital de Elevaciones

DLR Centro Alemán para el Viaje Aeroespacial

E-GEOS Compañía ASI/Telespazio

EPSG Grupo Europeo de Geómetras del Petróleo

ESA Agencia Espacial Europea

FADA Federación Argentina de Agrimensores

FAMAF Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación

FCEIA Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

GCP Puntos de Control en Tierra

GK Proyección Gauss-Krüger

GLONASS Sistema Global de Navegación por Satélite

GNSS Sistema Global de Navegación por Satélite

NAVSTAR-GPS Sistema de Navegación y Rango - Sistema de Posicionamiento Global

IG Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich

IGN Instituto Geográfico Nacional

InSAR Interferometría con radar de apertura sintética

ITRF 05 Marco Internacional de Referencia Terrestre Epoca 2005

I.Agrim Ingeniería en Agrimensura

LPF Filtro de Pasa Bajo

MAIE Maestría en Aplicación de Información Espacial

MDE-Ar Modelo Digital de Elevaciones Argentina

NaN No un Número

NASA Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

NGA Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial

PAF Punto de Apoyo Fotogramétrico

PDF Función de Densidad de Probabilidad

POSGAR07 Posiciones Geodésicas Argentinas época 2007

RDA Rosario Datos Abiertos

RADAR Detección en Radio y Rango

RAMSAC Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo

RMSE Error Cuadrático Medio

RS Remote Sensing

SAOCOM Satélite Argentino de Observación Con Microondas

SAR Radar de apertura sintética

SIASGE Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias

SLC Complejo de Mirada Única

SNAP ESA Plataforma de aplicaciones para el Sentinel

SRTM Misión Topográfica Shuttle Radar

TBC software Trimble para procesamiento GNSS

UAB Universitat Autònoma de Barcelona

UNC Universidad Nacional de Córdoba

UNR Universidad Nacional de Rosario

UNRO Punto RAMSAC Universidad Nacional de ROsario

WorldDEM Modelo digital de elevaciones mundial

WGS84 Sistema Geodésico Mundial del año 1984

Traducciones

Agencia Espacial Italiana (ASI): Agenzia Spaciale Italiana

Constelación de pequeños satélites para la observación del Mediterráneo (COSMO-SkyMed):
COnstellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation

Modelo Digital de Elevaciones (DEM): Digital Elevation Model

Centro Alemán para el Viaje Aeroespacial (DLR): Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Agencia Espacial Europea (ESA): European Space Agency

Grupo Europeo de Geómetras del Petróleo (EPSG): European Petroleum Survey Group

Puntos de Control en Tierra (GCP): Ground Control Point

Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS): GLObal NAVigation Satellite System

Interferometría con radar de apertura sintética (InSAR): Interferometric Syntetic Aperture Radar

Marco Internacional de Referencia Terrestre Epoca 2005 (ITRF 05): International Terrestrial Reference Frame time 2005

Filtro de Pasa Bajo (LPF): Low Pass Filter

No un Número (NaN): Not a Number

Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial (NGA): National Geospatial-Intelligence Agency

Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA): National Aeronautics and Space Administration

Sistema de Navegación y Rango - Sistema de Posicionamiento Global (NAVSTAR-GPS):
NAVigation System and Ranging - Global Position System

Función de Densidad de Probabilidad (PDF): Probability Density Function

Detección en Radio y Rango (RADAR): RAdio Detection And Ranging

Error Cuadrático Medio (RMSE): Root Mean Square Error

Radar de apertura sintética (SAR): Synthetic-aperture radar

Plataforma de aplicaciones para el Sentinel (SNAP ESA): Sentinel Application Platform

Complejo de Mirada Única (SLC): Single Look Complex

Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM): Shuttle Radar Topography Mission

Software Trimble para procesamiento GNSS (TBC): Trimble Bussines Center

Modelo digital de elevaciones mundial (WorldDEM): World Digital Elevation Model

Sistema Geodésico Mundial del año 1984 (WGS84): World Geodetic System time 1984

Glosario

El presente trabajo se desarrolla en el territorio continental de la República Argentina y por lo tanto adopta los estándares geodésicos definidos por el IGN:

1. Sistema de Referencia: WGS84
2. Marco de Referencia: Posiciones Geodésicas Argentinas época 2007 (POSGAR07)
3. RAMSAC/POSGAR07: Punto RAMSAC Universidad Nacional de Rosario (UNRO)
4. Época: ITRF 05 época 2006.632
5. Sistema de Proyección: Proyección Gauss-Krüger (GK) Argentina - 5 (EPSG:5347)

CAPÍTULO 1

Introducción

Conocer el comportamiento de la superficie topográfica de las áreas urbanas es fundamental para el planeamiento urbano así como para la gestión de las emergencias. Mediante la InSAR es posible generar DEM de grandes extensiones a bajo costo en relación a los levantamientos topográficos, geodésicos o fotogramétricos. No obstante, es un método de Remote Sensing (RS) que no tiene contacto directo con el objeto de estudio. Como toda técnica de medición está sujeta a los errores de medición y la medición radar está sujeta a ruido propio de dicha tecnología. Por todo esto, se hace necesaria una metodología para contrastar los resultados del modelo obtenido mediante datos con origen en otro método de medición que se suponen de mayor precisión y exactitud. En este caso, se seleccionaron datos de GNSS observados en campo como datos de calibración para determinar las diferencias de altura con el DEM InSAR y generar superficies de ajuste para aproximar el modelo al terreno. La metodología consta de tres ejes principales que son: la generación de datos de entrada, la generación de superficies de ajuste y la validación de resultados. Mientras que los procesos se dividen en medición y procesamiento GNSS, procesamiento InSAR y, programación del ajuste y validación. El área de estudio es la ciudad de Rosario, Santa Fé, Argentina. Se dispone de imágenes SAR COSMO-SkyMed de la ASI en modo HIMAGE de 3 metros de resolución espacial, y 96 datos GNSS de una red geodésica y su densificación. Se asume a los puntos de control GNSS sin error en coordenada plana como cota.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Crear una metodología para obtener modelos digitales de elevación en áreas urbanas mediante imágenes SAR satelitales y ajustados a partir de datos GNSS medidos en campo.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Generar un DEM mediante InSAR con datos COSMO-SkyMed en la ciudad de Rosario.
2. Georreferenciar un DEM mediante la comparación en los valores de altura respecto a datos GNSS medidos en campo.
3. Ajustar un DEM a partir de superficies generadas mediante datos GNSS medidos en campo.
4. Validar un DEM a partir de la comparación con datos GNSS medidos en campo.
5. Calcular las diferencias entre un DEM InSAR y datos GNSS medidos en campo.

1.1.3. Disponibilidad de datos

El Satélite Argentino de Observación Con Microondas (SAOCOM)-1A fue lanzado en octubre de 2018 y el maestrando comenzó la tesis en abril de 2019 cuando aún no había disponibilidad de imágenes de dicha misión satelital. Por este motivo, esta tesis se elaboró utilizando datos disponibles de catálogo de la misión satelital COSMO-SkyMed de la ASI de posible uso a partir de los convenios en el marco del proyecto SIASGE.

2.1. Antecedentes

El desarrollo de modelos que representen el comportamiento de la superficie terrestre ha revestido un particular interés para el humano debido a la necesidad de interacción con el medio ambiente. Los primeros relevamientos consistían en interpretaciones visuales plasmados en mapas con los objetos característicos como arroyos, montañas o praderas. El advenimiento de la geometría, la trigonometría, óptica y la astronomía posibilitaron a los geómetras realizar mediciones topográficas y geodésicas sobre el terreno. La cámara fotográfica y el avión permitieron el surgimiento y desarrollo de la aerofotogrametría durante la primera Guerra Mundial con la cual se obtenían datos de la superficie terrestre mediante medios remotos, es decir, sin contacto directo con el objeto de estudio. El boom tecnológico de la Guerra Fría combinó el RADAR, el SAR y la computación para dar origen a la InSAR que permite generar DEM con sensado remoto en aviones, sin embargo las oscilaciones durante la adquisición generaban inconvenientes en las adquisiciones y aquí es cuando los satélites entraron en escena. La carrera espacial ofreció la posibilidad de montar sensores en plataformas orbitando la Tierra y por lo tanto obtener imágenes de todo el planeta con mayor estabilidad de adquisición. El satélite SAR pionero fue el Seasat de la NASA mientras que, la misión SRTM [1] de la misma agencia espacial en colaboración con la ASI y la DLR obtuvo un DEM empleando dos sensores, uno en banda C (5.6 centímetros, C radar) y otro en banda X (3.1 centímetros, X radar). Sin embargo, el DEM SRTM extendido y cotidianamente difundido es el obtenido con banda C. Uno de los inconvenientes en este modelo es que su cobertura va desde 56°S a 60°N y la resolución espacial es 1 segundo de arco en Estados Unidos y 3 segundo de arco de segundo en el resto. Otros DEM como el WorldDEM de la DLR tienen resolución espacial de 13 *metros*, cobertura global con precisión vertical relativa de 2 *metros* y absoluta de 10 *metros* comprobadas mediante puntos de control. La característica más interesante del WorldDEM no es su altísima resolución espacial sino su validación mediante la contrastación con otras metodologías de medición para determinar su precisión y exactitud [2] que es uno de los objetivos en el presente trabajo. Algunos autores proponen corregir los DEM mediante implementaciones computacionales [3] de herramientas matemáticas, lo cual será otro desafío a emprender para la resolución de los objetivos propuestos en el Capítulo 1.

2.2. Error experimental del caso de estudio

La teledetección consiste en la observación remota del objetivo para captar determinadas características del mismo. En el presente trabajo se utilizan observaciones remotas que consisten en imágenes de tipo SAR para aplicar InSAR y obtener un DEM que es considerado el valor medido, mientras que, el dato GNSS relevado en campo se supone el valor real. Ambos valores se relacionan mediante:

$$e_{medicion} = valor_{medido} - valor_{real} \quad (2.1)$$

Es necesario aclarar que, para hacer la suposición del dato GNSS como valor real, debe asumirse con error cero (de ahí que las mediciones en campo deben tener elipses de error debajo de los $\pm 0,05$ metros).

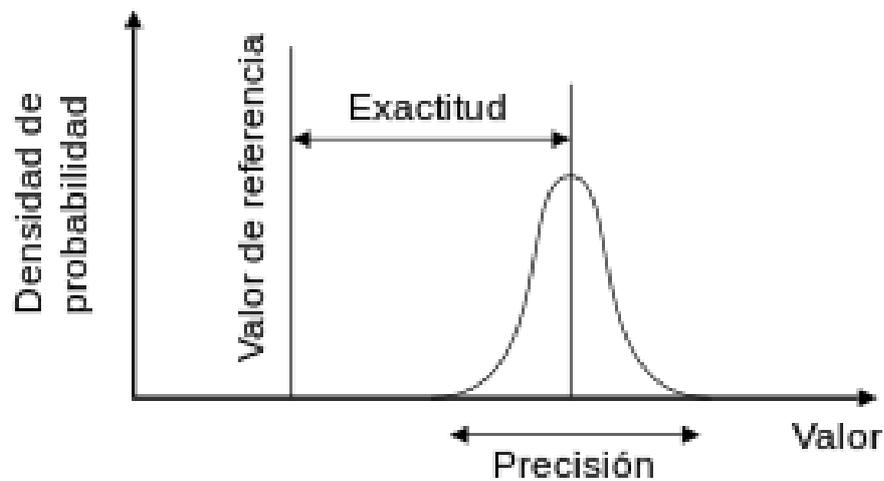


Figura 2.1: Valor de referencia, densidad de probabilidad, exactitud y precisión. Fuente:Wikipedia

De la Figura 2.1 se desprende que, el valor de referencia será el valor real, es decir, el dato GNSS y el valor medio de la función de densidad de probabilidad será el valor medido, es decir, el dato DEM. La exactitud está relacionada con los errores sistemáticos y la precisión a los errores accidentales. Los primeros tienen siempre el mismo sentido y alejan los valores medidos del valor real. Un aumento de la muestra no tiende a cero el valor, sino justamente, al valor de la influencia del error sistemático. Una ventaja de los errores sistemáticos es que, de ser detectados, puede corregirse la fuente (el error en sí mismo) o la influencia, según convenga y sea posible en el caso de estudio. Los errores accidentales por otro lado, tienen comportamiento aleatorio y un aumento de la muestra lleva la media a cero. Se los puede analizar estadísticamente y es posible obtener un estimador para determinar qué tan bueno es el error estándar de la media muestral que es la desviación estándar de la media muestral.

2.3. Sistema de puntos de control en Tierra

2.3.1. Coordenadas en el espacio mediante GNSS

Un GNSS hace posible la determinación de las 4 coordenadas (X, Y, Z, tiempo) de cualquier punto sobre la superficie terrestre y objetos móviles como barcos, aviones y satélites. Estos sistemas consisten en emitir y recibir señales a determinada frecuencia a través de un medio de propagación y con estas mediciones obtener las distancias. La medición de más de un vector satélite-receptor aporta los datos necesarios para aplicar la trilateración con la cual es posible calcular la ubicación del receptor en el espacio, donde:

- Un satélite define una esfera con centro en el satélite.
- Dos satélites definen una circunferencia.
- Con Tres satélites se obtienen dos puntos en el espacio (uno en el planeta Tierra y el otro en el espacio como la Figura 2.2).
- Cuatro satélites permiten corregir los errores en los relojes.
- Cinco satélites permiten calcular el error de las coordenadas.
- Seis o mas satélites mejoran todos los parámetros.

Por lo tanto, es necesaria la medición mínima de cinco satélites y sugerida de seis o más.

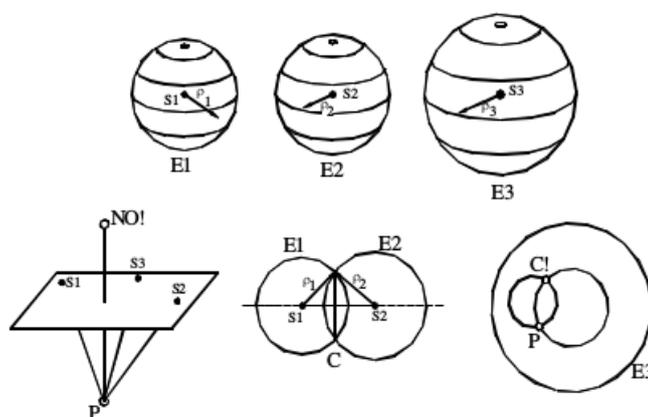


Figura 2.2: Las letras S indican la posición de los satélites, las ρ las distancias entre satélite-receptor, y la letra P la del punto cuyas coordenadas se quiere conocer, es decir la ubicación del receptor GPS. Fuente:[4]

2.3.2. Determinación de distancias con GNSS

Como se enunció en la Sección 2.3.1, los sistemas GNSS miden distancias con las que se generan esferas y la intersección de las mismas determinan las coordenadas del punto donde se ubica el receptor. Estas distancias pueden ser de dos tipos:

- Pseudo-distancia
- Diferencia de fase

La pseudo-distancia se obtiene mediante el cálculo en el retardo en la señal emitida y recibida entre el sistema satélite-receptor. Un retardo en la señal implica que hay una distancia entre el emisor y el receptor y de allí, conociendo la velocidad de propagación de la onda, se calcula la pseudo-distancia. El nombre pseudo-distancia se debe a que la magnitud de medición es el tiempo y la distancia es un producto derivado. La incertidumbre en la determinación de distancias mediante este procedimiento es de orden métrico con elipses de error que, en general, no son menores a ± 3 metros, es decir, en ambos sentidos.

Por otro lado, la medición por diferencia de fases consiste en la determinación en la cantidad de ciclos iniciales de la fase que es llamada ambigüedad y se identifica con la letra N , más el delta de fase obtenida por el receptor en cada época (por épocas se entiende a instantes de tiempo de medición cuyos intervalos en general son un segundo, dos segundos, cinco segundos u otros). La Ecuación 2.2 calcula la cantidad de ciclos de fase para el tiempo t_0 .

$$ciclo_{(0)} = N + \phi_{(0)} \tag{2.2}$$

con,

- $ciclo_{(0)}$ es la cantidad de ciclos de fase de la época 0
- N se denomina ambigüedad y es la cantidad de ciclos completos (valores enteros) de fase para la época 0
- $\phi_{(0)}$ diferencia de fase para una época 0

La ϕ_0 tiene una componente entera de fase y una componente decimal de fase (cuando no completó los 360°). En el t_0 los ciclos enteros pertenecen a la ambigüedad N y por lo tanto para esta tiempo sera particular del mismo, solo la componente decimal, es decir:

$$\phi_0 \tag{2.3}$$

mientras que, para los los instantes t_1, t_2, \dots, t_n la cantidad de ciclos sera la ambigüedad N del tiempo t_0 más las contribuciones enteras y decimales de las fases para ese instante (Figura 2.3) y será:

$$ciclo(n) = N + n_{(n)} + \phi_{(n)} \tag{2.4}$$

con,

- n_n nuevos ciclos de fase enteros para la época n
- ϕ_n el valor decimal de fase para la época n

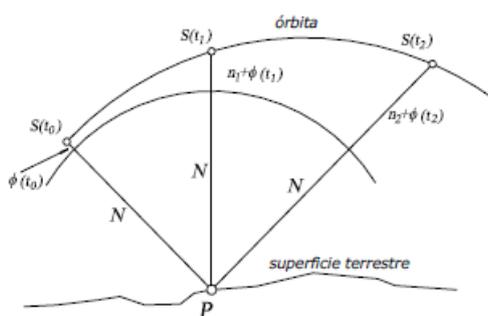


Figura 2.3: Ciclos enteros y decimales de fase en cada instante t_n con P el punto donde se ubica el receptor.
Fuente:[4]

Relacionando la cantidad de ciclos con su longitud de onda es que se puede obtener la distancia por diferencia de fase (ecuación 2.5) y que resulta en valores de precisión centimétrica.

$$\rho_n = (N + n_n + \phi_n)\lambda \quad (2.5)$$

donde:

- λ es la longitud de onda

El inconveniente de la medición con diferencia de fase radica en la determinación de la ambigüedad inicial N . Esta última se calcula mediante filtros de Kalman utilizando los datos de muchas épocas consecutivas. Este proceso se llama inicialización y el intervalo de tiempo de medición de épocas se llama tiempo de inicialización.

2.3.3. Constitución de un GNSS

Los sistemas GNSS como por ejemplo el NAVSTAR-GPS, constan de 3 segmentos bien definidos (Figura 2.4):

- Segmento de Control: estaciones de emisión y recepción con el segmento espacial.
- Segmento Espacial: satélites de órbita media terrestre con antenas en banda L.
- Segmento Usuario: receptores de las señales emitidas por los satélites.

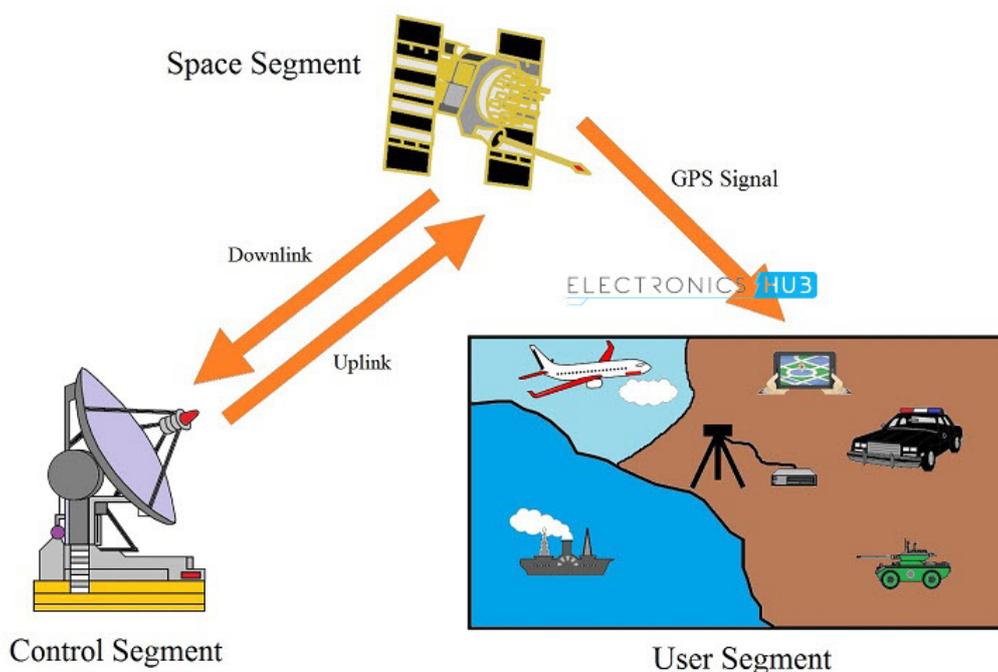


Figura 2.4: Segmentos de un sistema GNSS, en este caso el NAVSTAR-GPS. Fuente: Electronic Hubs

Es posible adquirir receptores con más de una constelación (NAVSTAR-GPS, Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS), GALILEO o BeiDou) que son llamados GNSS

de doble constelación. Por otro lado, según la constelación, se cuenta con más de una frecuencia de emisión. Para explicar esto último se va a tomar el sistema NAVSTAR-GPS como ejemplo. El sistema NAVSTAR-GPS es un desarrollo de los EE.UU. con fines militares en su origen, que posteriormente estuvo disponible para el uso civil y cuenta con tres frecuencias:

- L1 de 1575,42 MHz
- L2 de 1227,60 MHz
- L5 de 1176,45 MHz

Las mediciones más frecuencias implican más datos para calcular la distancia satélite-receptor y mayor cantidad de datos para corregir errores tales como los errores atmosféricos.

2.3.4. Sobre los errores

Los sistemas GNSS están sujetos a varios tipos de errores que generan una degradación en el resultado final y son:

- Medio de propagación (ionósfera y tropósfera)
- Relojes (relojes no precisos del receptor)
- Multicamino (rebotes de la señal)
- Número de adquisiciones: cantidad de satélites observables
- Geometría de adquisición: ubicación en la bóveda celeste de los satélites observables
- Efemérides: precisión de las coordenadas del satélite observado
- Errores numéricos: cifras significativas en los datos

Un error que no es tal sino que es una degradación intencional en el dato es la disponibilidad selectiva que tenía el sistema NAVSTAR-GPS hasta el año 2000, pero eliminada, al menos momentáneamente, y por lo tanto no se incluye en los errores listados. Los errores generan que la precisión y exactitud en la determinación de las coordenadas se vea afectada y arroje valores por encima del metro de incertidumbre. La solución a una baja precisión y exactitud en la medición absoluta de una coordenada es la medición diferencial o relativa que se describe en el próximo apartado.

2.4. Marco Geodésico Argentino

El organismo responsable de la Geodesia y la Cartografía en la República Argentina es el IGN que definió el marco de referencia POSGAR07 [5] basado en el ITRF 05 con proyección GK Argentina. El sistema POSGAR07 cuenta con puntos distribuidos en toda la Plataforma Continental Argentina, Isla Grande de Tierra del Fuego y Antártida Argentina de tipo pasivo y activo. Los puntos pasivos consisten en monolitos para roscar instrumentales geodésicos y puntos activos con receptores GNSS que observan datos continuamente y el usuario puede descargar online.

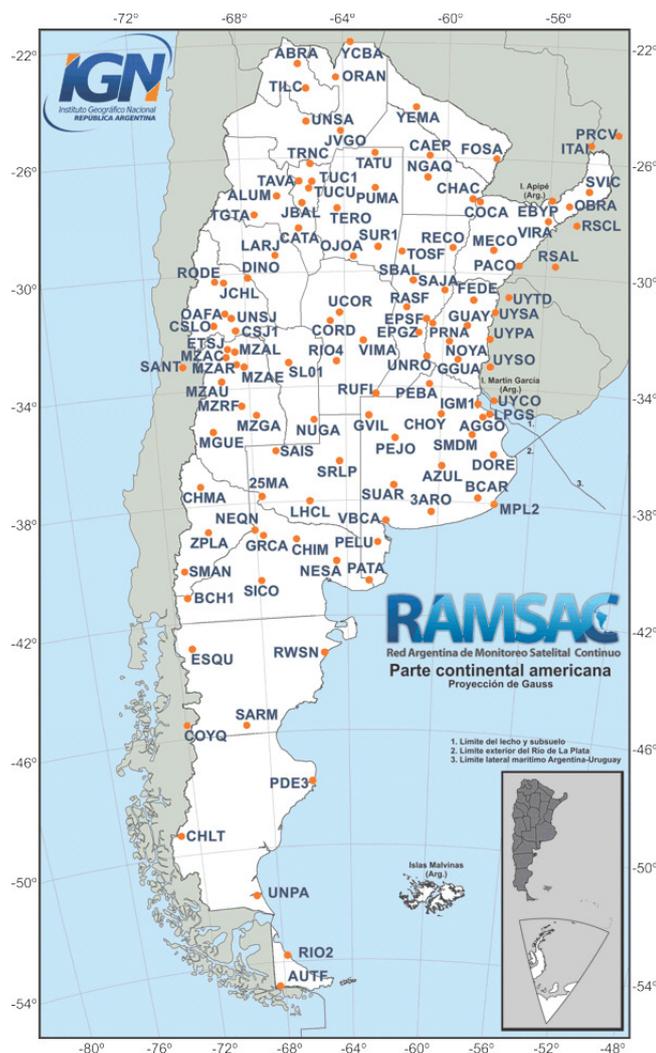


Figura 2.5: Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo (RAMSAC) en POSGAR07. Fuente: IGN

2.4.1. Procesamiento Diferencial GNSS

El procesamiento diferencial consiste en determinar las coordenadas de un receptor llamado rover en relación a otro receptor llamado base, que observan los mismos satélites en las mismas épocas y cuyas señales atraviesan el mismo medio atmosférico. Estas condiciones permiten eliminar varios de los errores antes enunciados y por lo tanto mejorar tanto la precisión y exactitud. Por otro lado, un receptor de doble constelación (NAVSTAR-GPS y GLONASS por ejemplo) cuenta con más satélites observables y por lo tanto mejora la geometría y número de adquisiciones. Además, si el receptor es de doble frecuencia (L1/L2) permite obtener datos para parametrizar el medio de propagación (ionósfera y tropósfera) y reducir sus errores. La medición diferencial o relativa determina los vectores de corrección y por lo tanto coordenadas relativas con elipses de error de $\pm 0,03$ metros. Si uno de los dos instrumentos está ubicado en algún momento, en un punto de coordenadas conocidas, entonces se pueden corregir las diferencias entre las coordenadas relativa y absoluta del punto mencionado desplazando todo el relevamiento. Este proceso se llama vinculación y permite obtener una nube de puntos con elipse de error centimétrica.

2.4.2. Redes Geodésicas

Una Red Geodésica es un conjunto de puntos cuyas coordenadas fueron medidas, calculadas y compensadas siguiendo estándares geodésicos, es decir, considerando las fuentes de errores en las mediciones geodésicas y compensando mediante los métodos propios de dicha disciplina. El surgimiento de los GNSS junto al cálculo computacional redujo los costos para diseñar, medir, calcular y compensar una red geodésica, ya que cambió las mediciones astronómicas por mediciones satelitales. La Figura 2.6 es un ejemplo de una Red Geodésica para la Ciudad de Rosario que fue laborada en la Escuela de Agrimensura de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA). Las mediciones para generar redes

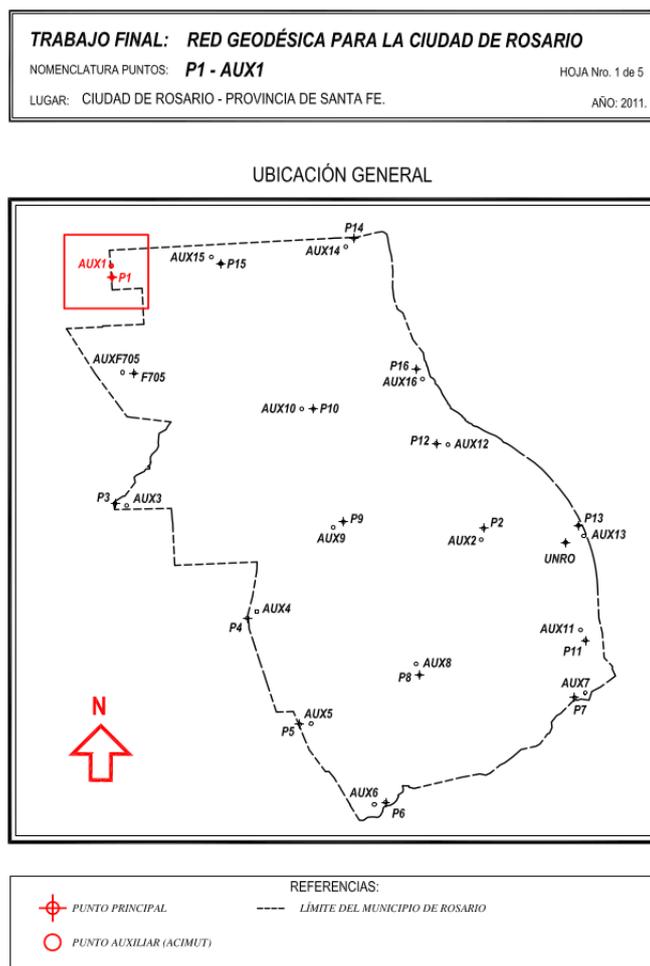


Figura 2.6: Monografía de un punto de la Red Geodésica Rosario. Fuente [6]

geodésicas en la actualidad se realizan considerando los siguientes ítems:

- Receptores tipo GNSS
- Método diferencial
- Puntos en zonas con buena recepción de observables
- Geometría uniforme de los triángulos de la red

Los datos son procesados con softwares específicos de procesamiento GNSS que pueden ir desde los comerciales como el TBC a los científicos como el GAMIT-GLOBK. Todos los

datos deben tener solución fija y posteriormente la red será compensada por algún método de ajuste como cuadrados mínimos.

2.4.3. Vinculaciones a Redes Geodésicas

Una red geodésica representa un Sistema de Apoyo de orden superior en relación a relevamientos diferenciales mediante un equipo base y un equipo rover. No sólo por la rigurosidad en el diseño geométrico de una red, sino también por la cantidad de tiempo de medición y la compensación. Por lo tanto, las redes geodésicas son un sistema de apoyo de orden superior pero costosas desde el punto de vista técnico, logístico, material, temporal y económico. Es habitual determinar las tolerancias necesarias para un determinado trabajo en función de los requerimientos propios del trabajo y a partir de ello definir si es necesario generar una nueva red geodésica, ampliar una red existente o realizar vinculaciones. Una vinculación a una red consistirá en realizar un relevamiento diferencial donde en algún momento del relevamiento se deberá medir un punto de la red a la que se desea vincular. El resultado de esto será una nube de puntos con un error resultante entre el error propio en la medición durante el relevamiento diferencial y el error original del punto de la red (ecuación 2.6).

$$e_{final} = \pm e_{red} \pm e_{medicion} \quad (2.6)$$

2.5. Obtención de un DEM mediante InSAR

La InSAR es una técnica que utiliza pares de imágenes SAR para generar un interferograma [7]. El sensor puede estar montado en alguna plataforma en tierra, un avión o un satélite y cada uno tiene sus particularidades. El presente trabajo se realiza con imágenes COSMO-SkyMed satelitales y por este motivo se detallan algunas especificaciones para imágenes obtenidas en dicha plataforma. Una vez generado el interferograma y relacionándolo a la altura de ambigüedad es posible obtener el DEM.

2.5.1. Fundamentos físicos de la InSAR

La interferometría de imágenes de radar de apertura sintética utiliza imágenes de radar como su nombre lo indica y tiene una determinada longitud de onda en el espectro electromagnético. Notar que, en la Figura 2.7, el espectro electromagnético es continuo pero la atmósfera

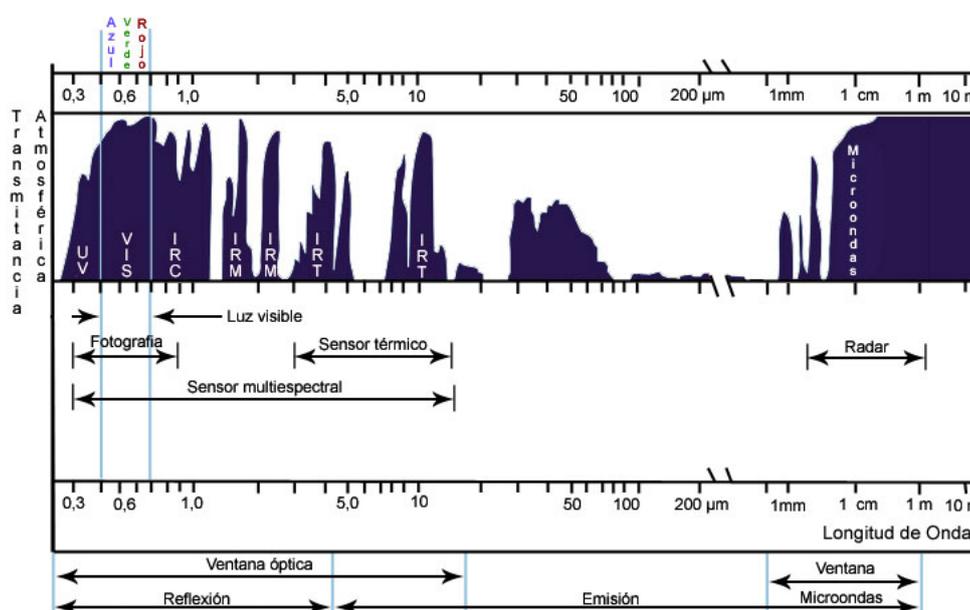


Figura 2.7: Ventanas atmosféricas del espectro electromagnético

tiene zonas en las cuales absorbe la energía electromagnética y, por lo tanto, es imposible realizar observaciones remotas desde sensores montados en plataformas satelitales. El radar ocupa el segmento de $2,7\text{ mm} - 100\text{ mm}$ de longitud de onda λ y tiene algunas zonas donde la transmitancia atmosférica es baja y otras donde es alta, éstas últimas llamadas ventanas atmosféricas. El principio de la interferometría es la observación de las diferencias de fase de dos ondas electromagnéticas. La interferometría con radar de apertura sintética consiste en relacionar dichas diferencias con el cambio en la topografía de la superficie observada.

2.5.2. Sobre las imágenes SAR satelitales

Un sensor de tipo SAR montado en una plataforma satelital y observando hacia la superficie terrestre tiene particularidades intrínsecas y otras de la plataforma y el medio. Los sensores SAR son sensores radar y por lo tanto dispositivos emisores- receptores en longitudes (o frecuencias) determinadas identificadas con letras. Las bandas radar satelitales son:

- Banda X: de 2.4 a 3.8 centímetros. como la misión COSMO-SkyMed
- Banda C: de 3.8 a 7.5 centímetros. como la misión Sentinel-1
- Banda L: de 15 a 30 centímetros. como la misión SAOCOM

El sensor a utilizar es el COSMO-SkyMed cuyas plataformas satelitales cuentan con instrumentales para obtener los parámetros de adquisición, esto es, coordenadas (X, Y, Z, t) y parámetros angulares $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$. Las coordenadas (X, Y, Z, t) se obtienen mediante instrumentales GNSS montados en las plataformas de cada satélite COSMO-SkyMed.

2.5.3. Geometría de adquisición y distorsiones geométricas SAR

Los sensores de tipo SAR como el COSMO-SkyMed son de mirada lateral con ángulo θ . Según como sea la pendiente α de la topografía local en la zona alumbrada producirá distorsiones geométricas de tipo:

- Acortamiento/alargamiento (foreshortening en la Figura 2.8) : si $0 < \alpha < \theta$ es la cara que mira al sensor y se genera un acortamiento, mientras que, si $-\theta < \alpha < 0$ es la cara opuesta al sensor y genera alargamiento
- Inversión (layover en la Figura 2.8): este fenómeno ocurre cuando $\theta \leq \alpha$ y genera una inversión en la imagen
- Sombra (shadow en la Figura 2.8): ocurre cuando la señal no ilumina la cara opuesta del sensor.

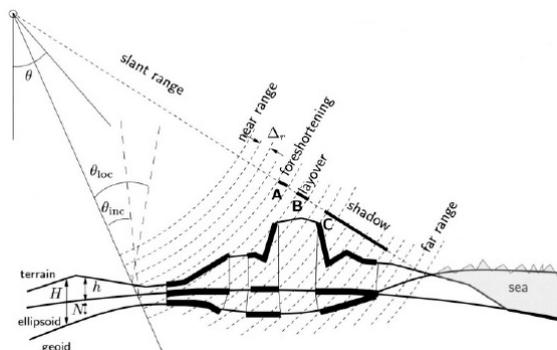


Figura 2.8: Distorsiones Geométricas. Fuente [7]

2.5.4. Observación de fase y altura topográfica

La InSAR es un proceso que se basa en obtener la diferencia de fase ϕ_p entre dos miradas SAR con geometría de adquisición conocida. Se utilizará la configuración interferométrica de la Figura 2.9 para obtener las relaciones físicas y geométricas entre las observaciones de dos fases SAR y finalmente obtener la altura topográfica.

Notar en la Figura 2.9 que se fija una normal al segmento $R1$ que incluye al punto desde donde se hace la adquisición 2 y cada parámetro será:

- $\psi_{n,p}$ valor de fase observado en un sensor n sobre un punto p

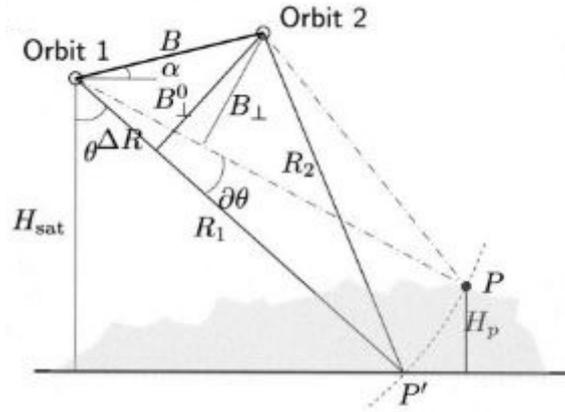


Figura 2.9: Configuración interferométrica. Fuente [7]

- $R_{n,p}$ distancia sensor n a un punto p
- ϕ diferencia de fase entre dos adquisiciones SAR
- B es la base geométrica entre las adquisiciones
- B_{\perp} base geométrica perpendicular a la adquisición
- ΔR o B_{\parallel} base geométrica paralela a la adquisición
- λ longitud de onda del sensor
- H_p altura de un punto p respecto a una superficie de referencia
- H_{sat} altura del satélite p respecto a una superficie de referencia
- θ ángulo de mirada
- α ángulo entre la horizontal en el punto de adquisición 1 y el segmento entre las adquisiciones

Los valores de fase observados para dos imágenes en una celda de resolución P como el de la Figura 2.9 desde las órbitas 1 y 2 son:

$$\psi_{1p} = -\frac{2\pi(2R_1)}{\lambda} + \psi_{scat,1p} \quad (2.7)$$

y

$$\psi_{2p} = -\frac{2\pi(2R_2)}{\lambda} + \psi_{scat,2p} \quad (2.8)$$

Donde R_1 y R_2 son las distancias geométricas y los términos $\psi_{scat,1p}$ y $\psi_{scat,2p}$ son las contribuciones de dispersión de fase de cada adquisición. A los fines de desarrollar las ecuaciones de la presente sección, se suponen a ambas contribuciones iguales. No obstante, en la Sección 2.5.5 se trata el concepto de coherencia interferométrica.

Utilizando las ecuaciones 2.7 y 2.8 se obtiene la diferencia de fase ϕ_p :

$$\phi_p = \psi_{1p} - \psi_{2p} = -\frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (2.9)$$

cuya derivada respecto a ΔR será:

$$\partial \phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \partial \Delta R \quad (2.10)$$

Geoméricamente, la diferencia de longitud del camino ΔR (Figura 2.9) puede aproximarse como ([7], ecuación 2.4.6):

$$\Delta R = B \sin(\theta - \alpha) \quad (2.11)$$

Esta aproximación se conoce como aproximación de campo lejano o de rayos paralelos. Sin embargo, este valor es difícil de calcular y se aproxima mediante:

$$\partial \Delta R = B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial \theta \quad (2.12)$$

Reemplazando (2.12) en (2.10):

$$\partial \phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta^0 - \alpha) \partial \theta \quad (2.13)$$

donde el valor inicial de θ^0 se obtiene para la superficie de referencia ($H_p = 0$).

Mientras que, la relación entre la diferencia de fase $\partial \phi_p$ y la altura del punto H_p será:

$$H_p = -\frac{\lambda R_{1p} \sin \theta_p^0}{4\pi B_{\perp,p}^0} \partial \phi_p \quad (2.14)$$

Haciendo $\partial \phi_p = 2\pi$ se obtiene la altura de ambigüedad:

$$h_{2\pi} = \left| \frac{\lambda R_{1p} \sin \theta_p^0}{2\pi B_{\perp,p}^0} \right| \quad (2.15)$$

Sin embargo, la ecuación 2.14 es el resultado de la fase de tierra plana y la fase topográfica. Mediante las ecuaciones 2.10, 2.12 y 2.14 se obtiene:

$$\partial \phi_p = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(D_p - \frac{B_{\perp,p}^0}{R_{1p} \sin \theta_p^0} H_p \right) \quad (2.16)$$

con D_p como el desplazamiento de superficie. Para ampliar nociones sobre diferencias de fase, altura topográfica y otros conceptos relacionados puede consultar [7] Sección 2.4.

2.5.5. Sobre la precisión de la fase interferométrica

2.5.5.1. Coherencia interferométrica y decorrelación

La coherencia interferométrica o coherencia compleja γ está relacionada con el ruido en la fase $j\phi_0$ de los pares de imágenes SAR. Puede ser usada como una medida de la precisión obtenida en la fase y se define por:

$$\gamma = \frac{E\{y_1 y_2^*\}}{\sqrt{E\{|y_1|^2\} E\{|y_2|^2\}}} = |\gamma| \exp(j\phi_0) \quad 0 \leq |\gamma| \leq 1 \quad (2.17)$$

El ruido de fase en los interferogramas puede expresarse en función del valor absoluto de la coherencia compleja. La coherencia compleja puede estimarse a partir de los datos interferométricos, en base a supuestos de ergodicidad, o derivarse teóricamente en función de las características conocidas del sensor, las circunstancias de adquisición y los algoritmos de procesamiento de señales ([7], página 98). La coherencia está relacionada a la función de densidad de probabilidad (PDF) la cual a su vez está relacionada al número de miradas independientes (look). Es decir, la coherencia es una medida del proceso InSAR y sus productos derivados, en el caso de estudio, los DEM. Pueden encontrarse más detalles sobre esto en [7] Secciones 4.2 y 4.3.

La definición de decorrelación puede ser bastante arbitraria. Aquí definimos la decorrelación como el ruido causado por las fuentes de error que tienen una ventana de estimación de máxima verosimilitud de coherencia regular.

Esto implica que los errores en la órbita y los errores debidos a las heterogeneidades atmosféricas se analizarán por separado, como se presenta en [7], Sección 4.4. Las fuentes de decorrelación serán:

- γ_{geom} : decorrelación geométrica, causada por diferentes ángulos de incidencia.
- γ_{DC} : decorrelación Centroide Doppler, causada por la diferencia en los centroides Doppler de dos adquisiciones.
- γ_{vol} : decorrelación en volumen, causada por la penetración de la onda radar en el medio de dispersión.
- γ_{ermal} : decorrelación termal o ruido del sistema, causado debido a las características del sistema. incluidos el factor de ganancia y características de la antena.
- $\gamma_{temporal}$: decorrelación temporal, causada por los cambios físicos en el terreno, afectando las características de dispersión en la superficie.
- $\gamma_{procesamiento}$: decorrelación inducida por el procesamiento, causada por los algoritmos por ejemplo de corrección y de interpolación.

Mientras que la decorrelación total γ_{tot} será:

$$\gamma_{tot} = \gamma_{geom} * \gamma_{DC} * \gamma_{vol} * \gamma_{ermal} * \gamma_{temporal} * \gamma_{procesamiento} \quad (2.18)$$

2.5.5.2. Medidas para obtener mejor coherencia

La coherencia γ es un valor definido entre 0 y 1, donde valores próximos a cero significa coherencia baja mientras que cercanos a 1 corresponde a alta coherencia. En la ecuación 2.18 se puede mejorar el producto haciendo:

- γ_{geom} : decorrelación geométrica, ángulos de incidencia lo mas similares posible.
- γ_{DC} : decorrelación Centroide Doppler, controlar los parámetros de enfocado de imagen.
- γ_{vol} : decorrelación en volumen, iguales valores de humedad de suelo entre otros.

- γ_{termal} : decorrelación termal o ruido del sistema, propio del sensor y por lo tanto utilizando escenas de un mismo sensor.
- γ_{temporal} : decorrelación temporal, base temporal con la menor cantidad de días posible.
- $\gamma_{\text{procesamiento}}$: decorrelación inducida por el procesamiento, algoritmos particulares de corrección e interpolación exclusivos para el sensor a procesar.

2.5.6. Errores de órbita

Un error en la órbita de alguna de las dos pasadas del SAR generará errores en la imagen y por lo tanto en el interferograma y la coherencia compleja. En la sección 2.5.5.1 se especificó que este problema no forma parte de la decorrelación y debe ser estudiado por separado. Será importante contar con todos los parámetros de adquisición para poder detectar posibles errores de órbita y hacer correcciones de ser necesario y posible.

2.5.7. Influencia de atmósfera

El SAR es un sensor activo cuya señal atraviesa cuerpos nubosos, sin embargo, esto no quita que los mismos no afecten a la señal. Dependiendo de la longitud de onda λ tendrá mayor o menor interacción con la atmósfera y los elementos que componen dicho medio de propagación. Notar además que el SAR tiene una mirada lateral y por lo tanto atraviesa una distancia mayor de atmósfera que un sensor apuntando al nadir, es decir, mirando hacia abajo del sensor. Es una buena sugerencia elegir pares de imágenes en momentos de similares condiciones en la escena y entre las escenas.

2.5.8. Multilooking y filtro de Goldstein

En la Sección 2.5.5.1 se relacionó la coherencia con la PDF y el número de miradas independientes (looks). Una opción para mejorar la coherencia es aumentar el número de looks en el cálculo de la PDF a costa de una pérdida de resolución espacial (ver [7], Sección 4.3). Otra opción es aplicar un filtro adaptativo de Goldstein, filtro basado en el concepto de multiplicación del espectro de Fourier de un pequeño parche de interferograma por su valor absoluto suavizado a la potencia de un exponente [8].

2.5.9. Desenrollado de fase

Generar un interferograma consiste en obtener las fases entre de un par interferométrico cuyos valores están acotados a $[-2\pi, 2\pi]$. Sin embargo, los fenómenos físicos, en este caso en el suelo, responden a fenómenos continuos y no a saltos, como la fase interferométrica. Por lo dicho anteriormente es que resulta necesario tomar esa fase enrollada y aplicar un proceso de desenrollado. Supongamos que todas las mediciones son precisas y exactas, y que no hay inconvenientes de redondeo ni truncamiento, entonces desenrollar la fase es un proceso trivial puesto que por el punto origen, camino y punto final siempre se tiene la misma diferencia de fase. En la realidad ninguna medición es exacta y el SAR no es la excepción. En la práctica suceden varios fenómenos que inciden en la incertidumbre del dato InSAR y son:

- decorrelación o coherencia γ (ver Sección 2.5.5)
- Influencia de la atmósfera (ver Sección 2.5.7)

El error de órbita no se incluye porque puede ser parametrizado, controlado y hasta corregido. El desenrollado de fase en el presente trabajo se realiza con una implementación complementaria al software SNAP ESA llamada SNAPHU que se ejecuta por consola. El mismo toma los datos de fase y coherencia para calcular el desenrollado de fase. Este proceso a su vez también va a incidir en los resultados finales del DEM.

2.5.10. El proceso InSAR y sus resultados

El primer proceso InSAR consiste en la corrección entre pares de imágenes, es decir, consiste en identificar y determinar de manera precisa la imagen master (primera en el tiempo) de la slave (segunda en el tiempo). Este proceso puede ser determinado a partir de GCP o identificando puntos coincidentes en ambas imágenes. Luego se continúa con el cálculo de la fase interferométrica y la aplicación de un filtro de Goldstein y el multilooking para mejorar el efecto de sal y pimienta resultante en el interferograma. El efecto de sal y pimienta es un término coloquial utilizado para identificar el efecto de salpicado que produce el ruido propio del sistema SAR en las imágenes y por lo tanto en sus productos derivados como un interferograma. Posteriormente es necesario hacer el desenrollado de fase (Sección 2.5.9) donde se obtiene el continuo de la fase en toda la escena que luego es convertida a altura con la ecuación 2.15 y utilizando un DEM. El proceso finaliza proyectando los valores de la geometría de adquisición SAR a coordenadas geográficas WGS84. Tanto el proceso de fase a elevación como el cambio de proyección utilizan un DEM de referencia como por ejemplo el SRTM. El resultado de un proceso InSAR es una imagen georreferenciada con píxeles que representan alturas relativas entre sí (propio del proceso de desenrollado).

Distintas etapas del proceso para llegar desde el objeto de estudio (la superficie topográfica) hasta un modelo que represente el mismo (el DEM) tienen influencia en la precisión y exactitud o en ambos. Algunos elementos como la coherencia interferométrica (Sección 2.5.5) pueden ser cuantificados, sin embargo, la influencia atmosférica (Sección 2.5.7) puede ser modelada aunque incluirá un error asociado, como ocurre al utilizar un modelo. Finalmente, el modelo resultante será el resultado de resolver el desenrollado de fase con todos esos errores incluidos en dicho cálculo. Por todo esto, es necesaria alguna medida que permita cuantificar que tan representativo es el modelo con respecto a la realidad física y esa instancia será la validación del modelo.

2.6. La misión COSMO-SkyMed

El programa COSMO-SkyMed es una constelación de satélites (la primera generación consta de los cuatro satélites de la Figura 2.10) artificiales de órbita baja heliosincrónica, sobre la línea del terminador. Sobre las plataformas están montados sensores SAR banda X de alta resolución con múltiple polarización y múltiples modos (Figura 2.11) de distintos anchos de barrido y resoluciones. El programa es propiedad de la República Italiana y operado por la ASI. La constelación forma parte del SIASGE junto a la constelación SAOCOM de la República Argentina.

El modo StripMap HIMAGE será el utilizado en el presente trabajo en nivel 1A SLC (i ,

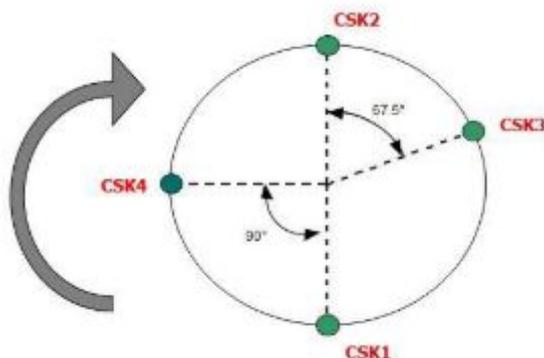


Figura 2.10: Geometría constelación COSMO-SkyMed. Fuente: ([9] página 9)

q) ([10], página 6, Sección 2.2) Sería interesante poder utilizar el modo Spotlight pero está reservado para usos militares ([9], página 22).

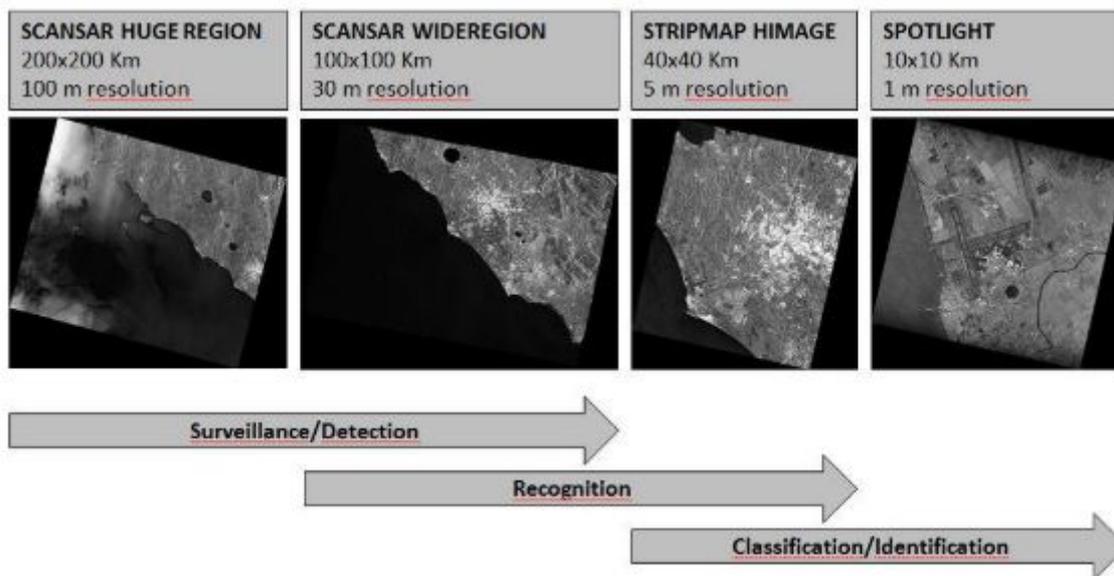


Figura 2.11: Modos de adquisición de los sensores COSMO-SkyMed. Fuente: [9] página 8

2.6.1. Georreferenciación de imágenes COSMO-SkyMed

Las sensores COSMO-SkyMed cuentan con parámetros de adquisición angulares y cartesianos con alta precisión que permiten obtener imágenes georreferenciadas en el sistema WGS84. Esto permite obtener datos tanto crudos como derivados en un sistema que pueda ser correlacionado con cualquier otro conjunto de datos que cuente con georreferenciación en el mismo sistema de referencia u otro sistema de referencia.

2.7. Remuestreo de datos raster

Un dato raster es una matriz cuyos elementos representan píxeles en la que se define la distancia interpíxel (vertical y horizontal) y su resolución radiométrica o profundidad de

color (en bits por píxel). La posibilidad de guardar una imagen como matriz permite hacer cálculos algebraicos y estadísticos sobre sus elementos.

Las imágenes raster pueden ser remuestreadas para obtener una imagen con un remuestreo en la distancia interpíxel (2.13), en su profundidad de color (2.14), en la orientación de la rejilla (2.12) o la combinación de todos éstos. Estos procesos modifican el dato original (crudo) para generar nuevos datos que no necesariamente permiten volver al dato original, y ese es uno de los inconvenientes del remuestreo.

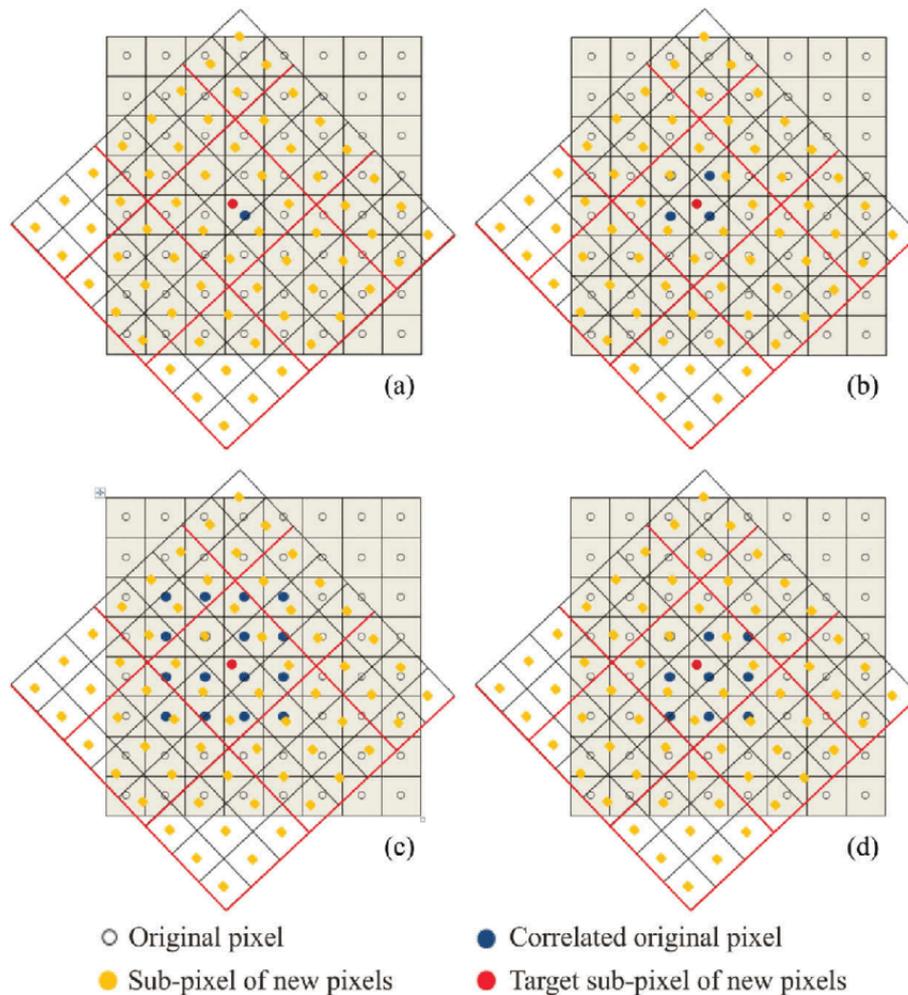


Figura 2.12: Remuestreo por reorientación de la rejilla. Fuente: [11]

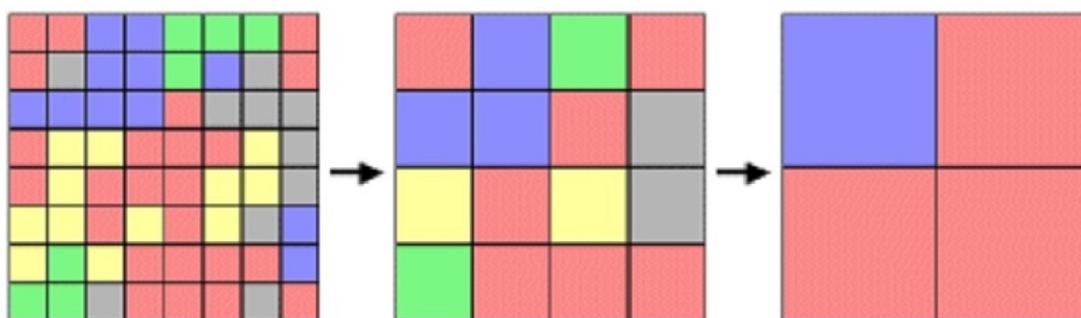


Figura 2.13: Remuestreo de distancia interpíxel. Fuente: internet

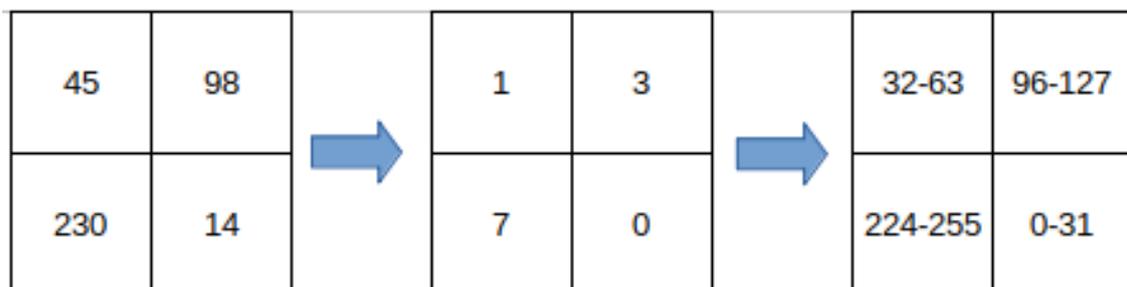


Figura 2.14: Remuestreo de escala. Fuente: Elaboración propia

La Figura 2.12 ejemplifica un remuestreo cambiando la orientación de la grilla con distintos métodos de remuestreo donde, (a) asigna el nuevo píxel el vecino más cercano, (b) hace una interpolación bilineal, (c) es una convolución cúbica y (d) es un método de remuestreo de píxeles agregados, basados en la imagen de entrada de 8×8 píxeles redimensionados a 3×3 píxeles.

2.8. Métodos de interpolación

Dado un conjunto de datos experimentales o mediciones se desea obtener una función que interpole a estos datos, es decir que esta nueva función coincida con los datos experimentales. El caso más simple consiste en construir una función de interpolación polinomial. Contrariamente a lo que se esperaría, se sabe que los polinomios de grado alto suelen producir problemas de estabilidad numérica, por lo que resulta conveniente particionar el dominio (o intervalo) de estudio en subregiones (subintervalos en el caso unidimensional) y construir funciones polinomiales de grado bajo en cada subregión (subintervalo). Los tipos de interpolación considerados en este trabajo serán el spline de primer grado o interpolación lineal por partes (Figura 2.15) y los spline cúbicos (Figura 2.18) [12].

2.8.1. Interpolación lineal por partes o spline de primer grado

Una función de spline es una función que consiste en piezas polinómicas unidas entre sí con ciertas condiciones de suavidad. Una interpolación lineal por partes como la graficada en la Figura 2.15 es una función poligonal cuyos segmentos son polinomios lineales unidos para lograr continuidad.

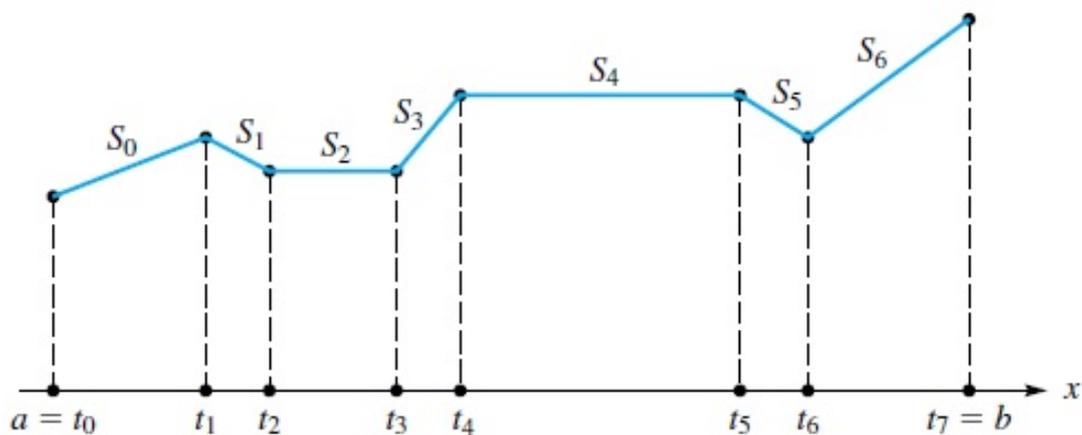


Figura 2.15: Interpolación lineal por partes. Fuente: [12]

Definición: Spline de primer grado.

Una función S es llamada spline de primer grado si:

- El dominio de S es en el intervalo $[a, b]$.
- S es continua en el intervalo $[a, b]$.
- Hay una partición del intervalo $a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$ tal que S es un polinomio lineal en cada subintervalo $[t_i, t_{i+1}]$.

En el caso bidimensional, se tiene un conjunto de puntos de interpolación (o nodos) en el plano xy , denotados por: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ (diferentes entre sí), cada uno de ellos asociado a un valor c_i . El objetivo es determinar una función F tal que

$$F(x_i, y_i) = c_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Se supone que esta función está definida en toda la región que contiene a los nodos. Elijiendo convenientemente los nodos se puede generar una malla, y obtener una función F , definida por partes, mediante polinomios de grado 1 en dos variables que definen una superficie determinada localmente por planos (Figura 2.16) que se pegan bien en los subdominios determinados por la malla.

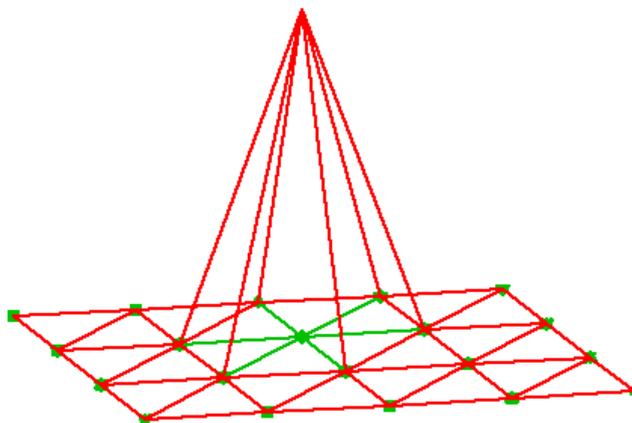


Figura 2.16: Planos locales que se se pegan con continuidad

La interpolación lineal por partes o spline de primer grado de la presente Sección explica como implementar dicho spline en el caso unidimensional. Sin embargo, la implementación de la Sección 4.4.2 utiliza la función `scipy.interpolate.griddata (método="lineal")` con método lineal. Es decir, utiliza la spline lineal en dos dimensiones como se observa en la Figura 2.17 donde el resultado es una superficie compuesta por los distintos triángulos que se forman a partir de los nodos. NOTA: El interpolador se construye triangulando los datos de entrada con Qhull [13] y en cada triángulo realizando interpolación baricéntrica lineal.

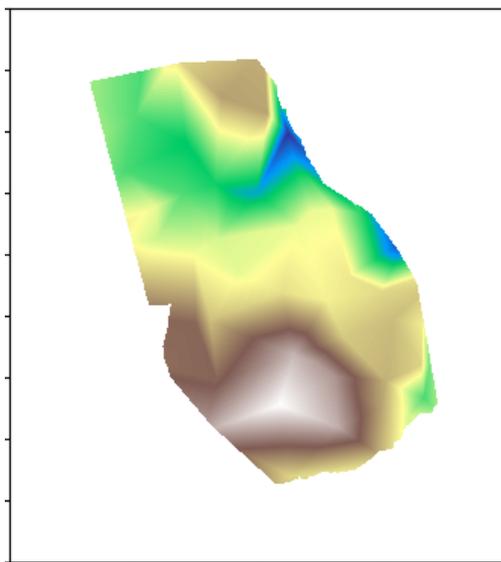


Figura 2.17: Spline lineal bidimensional generado en Python mediante `scipy.interpolate.griddata(método="lineal")`. Fuente: Elaboración Propia

2.8.2. Splines cúbicos

Esta Sección está basada en la Sección 9.2 de [12]. Los splines de primer grado vistos en la Sección 2.8.1 arrojan superficies generadas por rectas (o planos) con continuidad, pero cambios bruscos de pendiente en los vértices y las aristas. Si bien los splines cúbicos de la Figura 2.18 tienen un costo computacional mayor tienen la ventaja que son más suaves, reflejando con más precisión la superficie a determinar.

Definición: Spline cúbico.

Dado un conjunto de puntos (nodos) $a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$, una función S es llamada spline de grado 3 (o spline cúbico) si:

- El dominio de S es el intervalo $[a, b]$.
- S, S', S'' son continuas en $[a, b]$.
- S es un polinomio de grado 3 en cada subintervalo $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 0, \dots, n - 1$.

Esta definición puede generalizarse a grados más altos para lograr mayor suavidad pero se sabe que por consideraciones teóricas y computacionales los splines cúbicos son los más convenientes y habituales. Más aún, se ha demostrado que usar splines de grado mayor que 3 rara vez produce alguna ventaja [12].

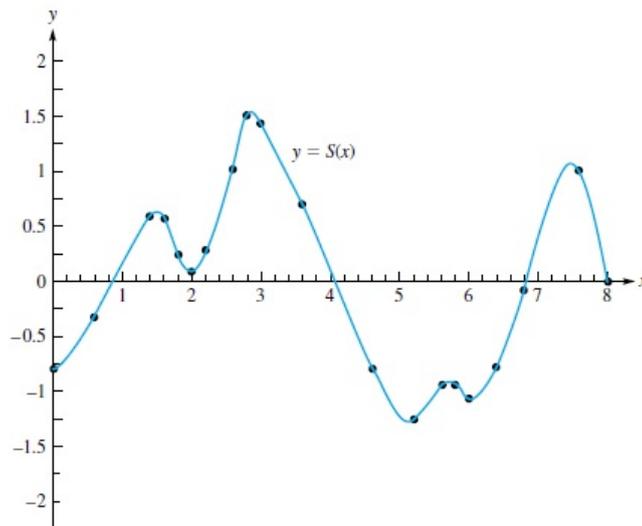


Figura 2.18: Spline cúbico. Fuente:[12]

El resultado de aplicar un spline cúbico en dos dimensiones genera una superficie suave que incluye a los puntos (nodos) que la definen.

La interpolación mediante spline cubico de la presente Sección explica como implementar dicho spline en el caso unidimensional. Sin embargo, la implementación de la Sección 4.4.2 utiliza la función `scipy.interpolate.Rbf (método="thin plate")`. Esto es, una función de base radial spline de placa plana [14] en dos dimensiones como se observa en la Figura 2.19 donde el resultado es una superficie suave, resultante de interpolar los nodos.

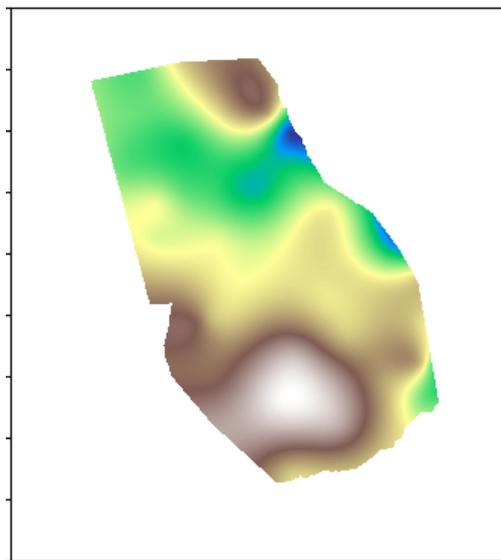


Figura 2.19: Superficie bidimensional generado en Python mediante `scipy.interpolate.Rbf`. Fuente: Elaboración Propia

2.9. Ajuste de superficies DEM

Una definición intuitiva de un modelo sería:

Un modelo es una representación de un objeto de estudio

Una definición mas formal sería:

Representación abstracta, conceptual, gráfica (o visual), física o matemática, de fenómenos, sistemas o procesos a fin de analizarlos, describirlos, explicarlos, simularlos y predecirlos.

La segunda definición es muy clara en términos formales y la primera tiene la ventaja de dejar en claro que es necesario:

- Determinar el objeto de estudio.
- Fijar condiciones de representatividad.
- Someter los supuestos modelos a las condiciones de representatividad.

Un DEM es un modelo generado mediante un conjunto de observaciones (datos SAR) que aplica una técnica (InSAR) y por lo tanto intenta representar al objeto observado. El proceso InSAR en sí mismo es un ajuste ya que utiliza los datos de fase para aproximar una función que será desenrollada y luego relacionada a la altura relativa del terreno.

Los resultados del proceso InSAR son datos relativos puesto que utilizan un DEM de referencia para extraer puntos a utilizar para la conversión de fase a elevación. Aún asumiendo que no hubiera errores de ningún tipo en términos relativos (no ocurre), existe la posibilidad de una diferencia absoluta en las coordenadas (x, y) debido a alguna diferencia en los parámetros de adquisición y por lo tanto en la georreferenciación (2.6.1). Si se utilizara un punto de una red geodésica 2.4.3 para el desenrollado, se podría considerar correctamente vinculado en la coordenada z para ese punto en particular. Pero, la incertidumbre en la resolución de la altura asociada a la coherencia interferométrica y el efecto atmosférico (Sección 2.5.9) pueden dar como resultado un modelo no representativo en términos relativos. Una opción, es ajustar el DEM resultante mediante ajuste con datos en tierra (Sección 2.4.2) obtenidos por alguna técnica de medición de mayor precisión (Sección 2.4.1) y de un algoritmo numérico (Sección 2.8) que genere una superficie a relacionar con el modelo obtenido en el proceso InSAR.

2.10. Procesamiento digital de imágenes

Una imagen digital es una matriz (Sección 2.7) donde es posible aplicar cálculos estadísticos y matriciales sobre sus elementos para la obtención de información relativa a los elementos que representa cómo corregir errores en la imagen. Otra operación que se puede hacer en una imagen es el procesamiento digital en el dominio del espacio o en el dominio de la frecuencia.

2.10.1. Filtros en el dominio del espacio

Para aplicar filtros en el dominio del espacio es necesario utilizar una convolución. Este tipo de filtros se clasifican por lineales y no lineales mientras que los tipos de filtros son:

- Filtro pasa bajo.
- Filtro paso alto.
- Realce de bordes por desplazamiento y diferencia.
- Realce de bordes mediante Laplace.
- Resalte de bordes con gradiente direccional.
- Detección de bordes y filtros de contorno (Prewitt y Sobel).

2.10.2. Filtros en el dominio de la frecuencia

Para aplicar filtros en el dominio de la frecuencia es necesario transformar la imagen del dominio del espacio al dominio de la frecuencia, aplicar el filtro de interés, transformar al dominio del espacio. Esto se hace mediante el siguiente proceso:

- Ingresar la imagen de entrada $f(x,y)$.
- Calcular la transformada de Fourier $F(u,v)$.
- Aplicar el filtro $H(u,v) * F()$.
- Calcular la transformada inversa de Fourier.
- Obtener la Imagen Filtrada.

Mientras que los tipos de filtros más utilizados son:

- Filtro pasa bajo
- Filtro paso alto
- Filtro paso banda

El filtro de Goldstein de la Sección 2.5.8 es un ejemplo de filtros en el dominio de la frecuencia que suaviza el ruido propio de la imagen SAR.

2.11. Herramientas estadísticas

Los principales conceptos estadísticos a utilizar son el RMSE, la media, la desviación estándar, los cuartiles y los valores extremos.

3.1. Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la ciudad de Rosario (Figura 3.2), en el extremo sureste de la Provincia de Santa Fe (Figuras 3.1 y 3.2), República Argentina (Figura 3.1). Las coordenadas geográficas son 32 grados 57 minutos Sur de latitud y 60 grados 39 minutos Oeste de longitud.

La ciudad De Santa Fe (capital provincial) se encuentra a 174 *km* al norte, Córdoba a 404 *km* al noreste y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (capital nacional) a 291 *km* al sudeste y los límites del ejido municipal son:

- Este: Río Paraná.
- Norte: Ciudad conurbada de Granadero Baigorria.
- Noreste: zona rural del municipio de Ibarlucea.
- Oeste: Municipios conurbados de Funes y Pérez.
- Sudeste: ciudad conurbada de Soldini.
- Sur: ciudad conurbada de Villa Gobernador Gálvez (separado por el río Saladillo).

3.2. Características urbanísticas

La población de Rosario es de aproximadamente 1.200.000 habitantes y sumando el área metropolitana alcanza a 1.600.000 de habitantes aproximadamente. El ejido urbano es de 179 *km*² con 120 *km*² aproximados de urbanización lo que representa un 67 % de superficie urbanizada. Notar que, a excepción del noreste, el resto de los límites con otros municipios presentan urbanización. Las zonas cercanas a los cursos de agua secundarios (Arroyo Luedña y Río Saladillo) y principal (Río Paraná) presentan urbanización densa y consolidada.

3.2 CARACTERÍSTICAS URBANÍSTICAS

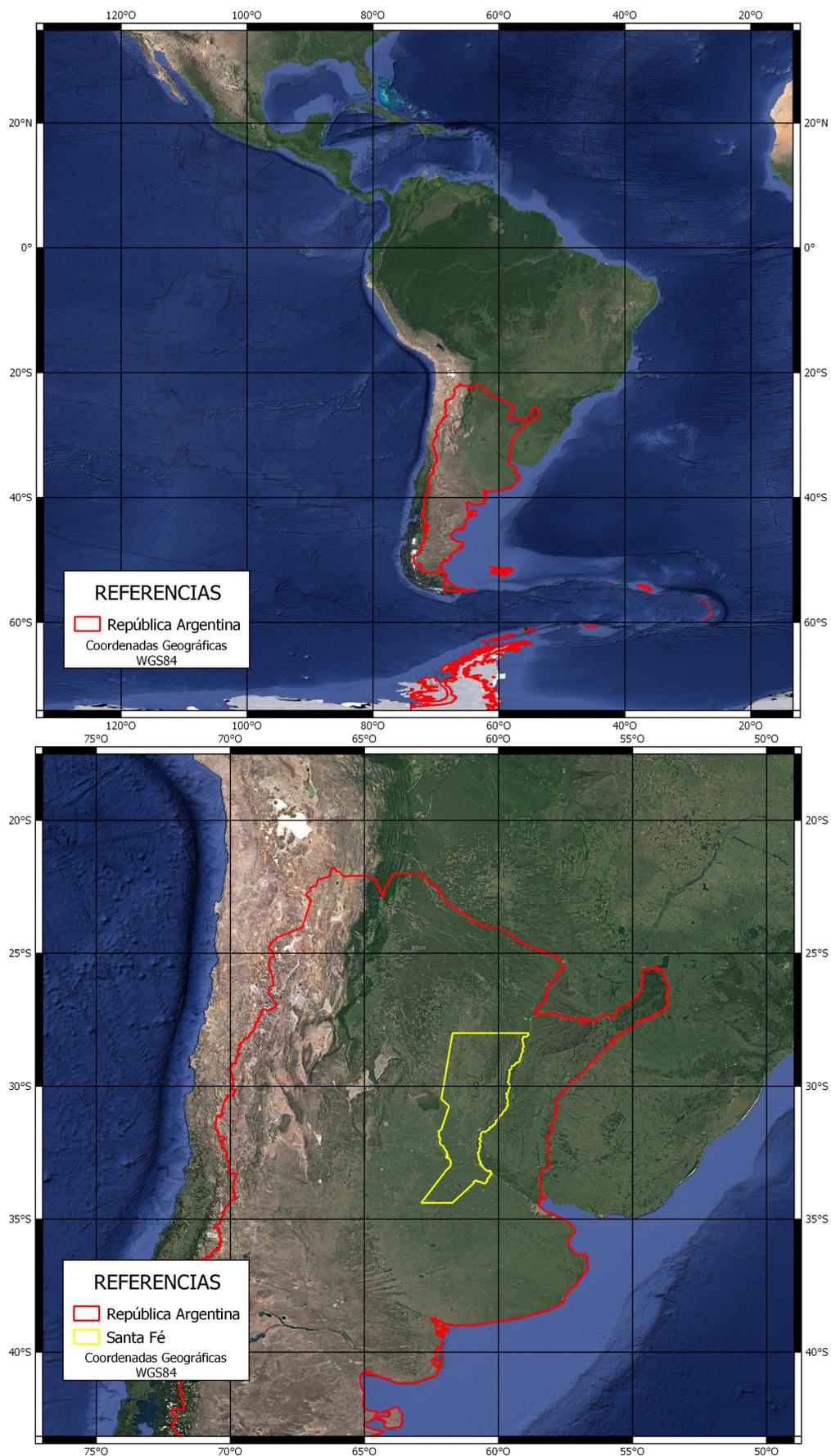


Figura 3.1: Arriba:Argentina en Sudamérica; Abajo:Santa Fe en Argentina. Fuente: Elaboración propia

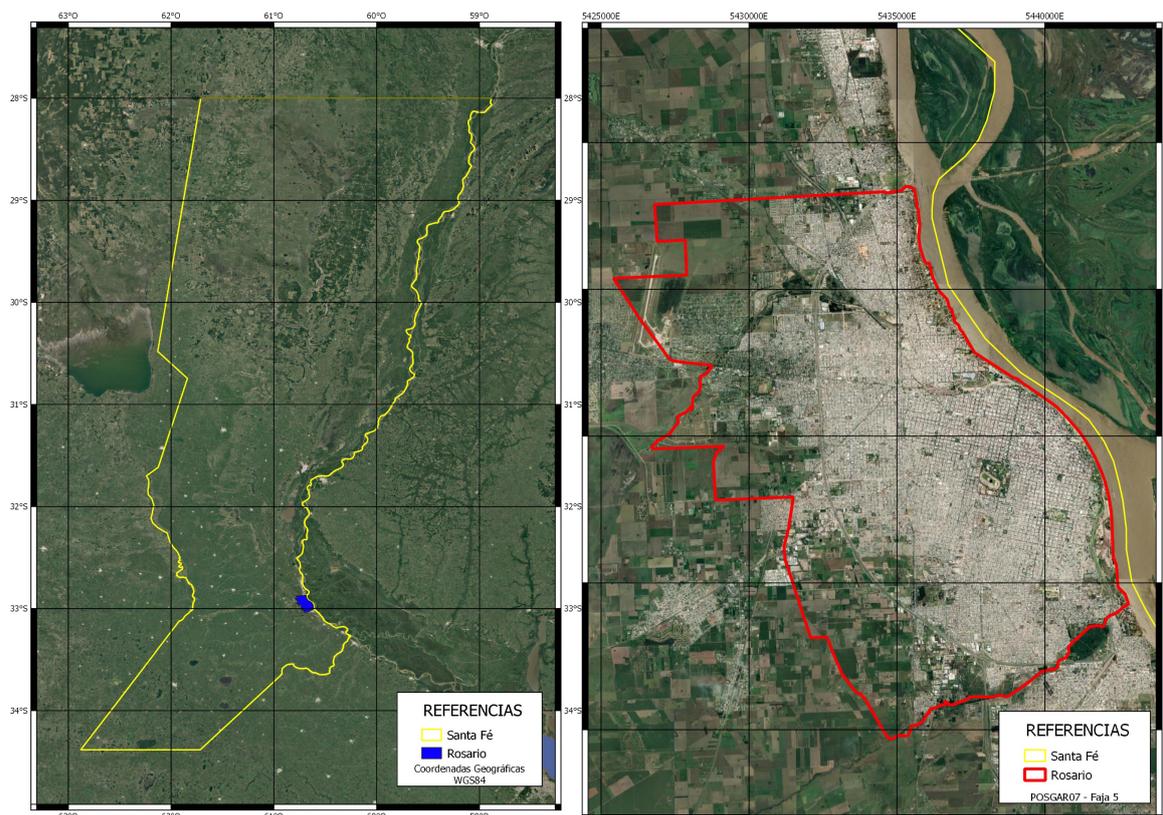


Figura 3.2: Izquierda:Rosario en Santa Fe; Derecha: Limite de la ciudad de Rosario. Fuente: Elaboración propia

3.3. Características ambientales

La provincia de Santa Fe se encuentra en la subregión llamada Pampa Húmeda que es una llanura con pendiente hacia el río Paraná donde el suelo tiende a volverse más ondulado como producto de la erosión de los ríos y una leve elevación del basamento cristalino. Esto es lo que lleva a la topografía de la ciudad de Rosario a ser más plana hacia el oeste y noreste y presentar barrancas al este. El arroyo Ludueña al norte y el Río Saladillo al sur presentan dos cambios de pendiente negativa mientras que al noreste del ejido se encuentran grandes barrancas contra el río.

El clima de la ciudad es subtropical húmedo con las cuatro estaciones bien definidas aunque su invierno es bastante suave. Las temperaturas promedio anuales oscilan entre los 14°C y 24°C con mayores lluvias en verano que invierno y un volumen de precipitaciones de entre 800 mm y 1300 mm al año.

La región responde a la subfalla del río Paraná, subfalla del Río de la Plata y la falla de Punta del Este, con sismicidad baja.

Por su ubicación, tipo de suelo, topografía y urbanización es que ocasionalmente las inundaciones afectan a las zonas más bajas de la ciudad.

Subsidencia y solevamiento

El aporte de agua a la cuenca genera aumento del volumen de agua en los acuíferos y por lo tanto genera fenómenos de subsidencia. Por el contrario, una pérdida de agua en los acuíferos u otros fenómenos físicos pueden generar solevamiento.

Metodología e implementación

4.1. Input data

El presente trabajo utiliza varios input data (datos de entrada) que se utilizan para obtener productos derivados (elementos 1,2,3 y 4 de la Tabla 4.1) y otros para usar como referencia (elementos 5,6 y 7 de la Tabla 4.1).

Num	Nombre	Característica	Fuente
1	ADT	Red Geodésica	UNR
2	PAF	Puntos GNSS	Rosario Datos Abiertos (RDA)
3	GNSS	Mediciones GNSS	Cátedra Geodesia
4	CSK	Imágenes SAR	SIASGE
5	SRTM	DEM InSAR	SNAP ESA
6	MDE-Ar	DEM InSAR	IGN
7	Aero	DEM fotogramétrico	IGN

Tabla 4.1: Input data de todo el proceso

Los elementos 1,2 y 3 de la Tabla 4.1 son datos GNSS de distintas características que serán relacionados para utilizarlos en las etapas de ajuste y validación mientras que el elemento 4 de la misma Tabla son las imágenes SAR que se utilizarán para generar los DEM. El dato 5 de la Tabla 4.1 es un DEM de referencia que se utiliza en SNAP ESA para la conversión de fase a altura y para la proyección de geometría de adquisición a coordenadas geográficas. Por último, los datos 6 y 7 de la misma Tabla son utilizados como referencias para observar el comportamiento de la topografía.

4.1.1. GNSS

Los puntos GNSS deben ser inamovibles, visibles en la imagen, perdurar en el tiempo, estar distribuidos homogéneamente, guardar cierta equidistancia entre ellos, cubrir toda la zona

de trabajo y; en áreas abiertas y llanas. Los receptores satelitales geodésicos comerciales de tipo GNSS actuales utilizan los sistemas NAVSTAR-GPS y GLONASS para obtener datos medidos en campo con precisiones centimétricas. En este trabajo se cuenta con tres tipos de datos GNSS y son:

Red Geodésica ADT [6]

Puntos GNSS de RDA

Mediciones GNSS

Los primeros datos son puntos que conforman una Red Geodésica desarrollada como trabajo final de grado de la carrera de Ingeniería en Agrimensura (I.Agrim) de la UNR. El segundo conjunto de datos consiste de una nube de puntos utilizada como Punto de Apoyo Fotogramétrico (PAF) medido con receptores satelitales GNSS doble frecuencia L1/L2 en modo diferencial. El tercer conjunto de puntos fue medido en conjunto con la Cátedra de Geodesia de la carrera de Ingeniería en Agrimensura de la UNR. La ubicación espacial de los puntos puede observarse en la Figura 4.1.

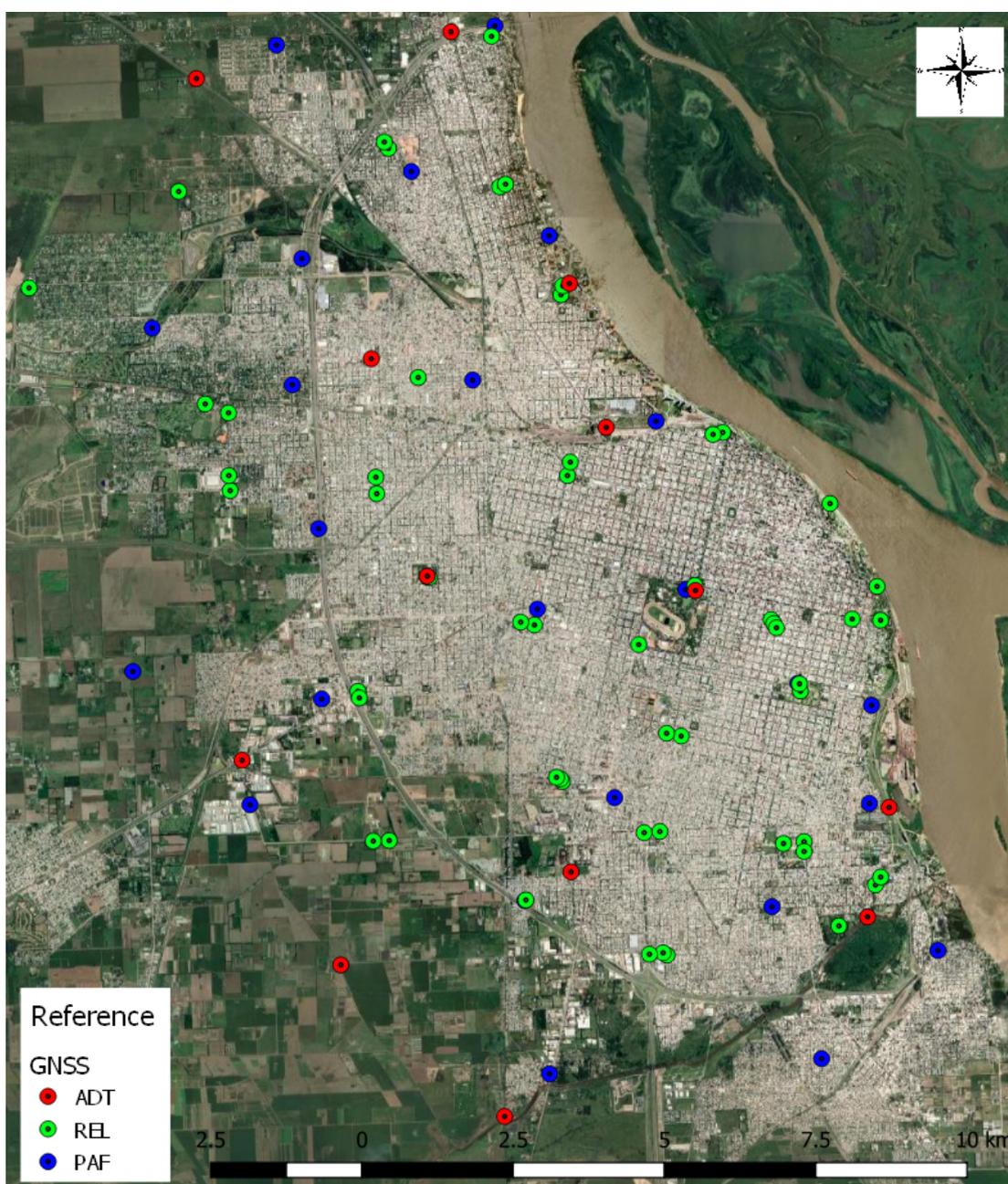


Figura 4.1: Puntos GNSS en la Ciudad de Rosario. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Imágenes SAR COSMO-SkyMed

NOTA: Imágenes COSMO-SkyMed HIMAGE de Nivel 1C, © ASI (2010-2019), provistas por ASI a la CONAE para el proyecto “Ajuste y validación de DEMs interferométricos con datos GNSS” en el marco del SIASGE.

Todos los derechos reservados. Se utilizó el catálogo Compañía ASI/Telespazio (E-GEOS) para buscar las imágenes de la zona de estudio como lo indica el área sombreada de la Figura 4.2.

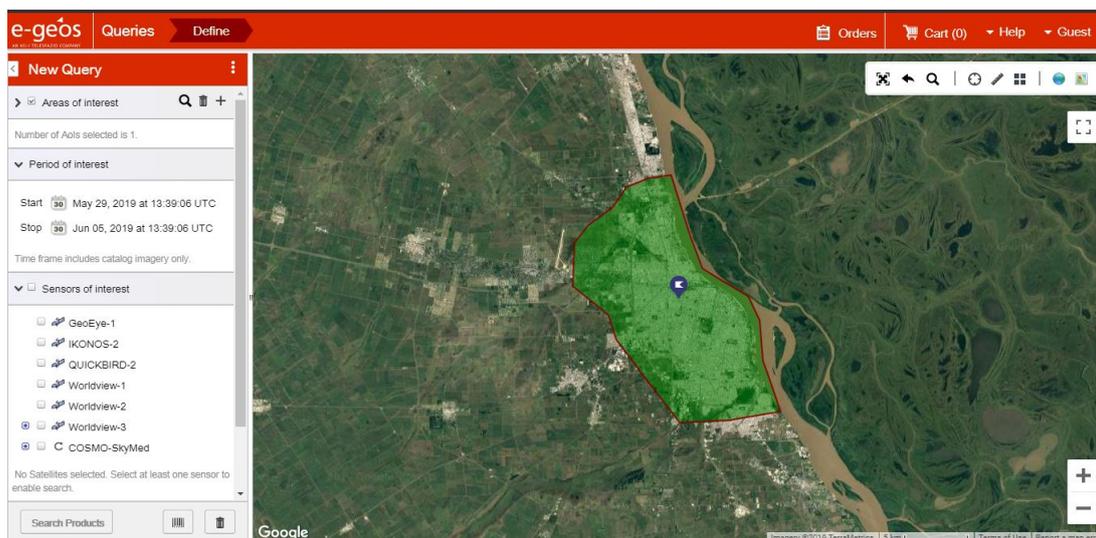


Figura 4.2: KMZ estimado de Rosario en el catálogo de E-GEOS

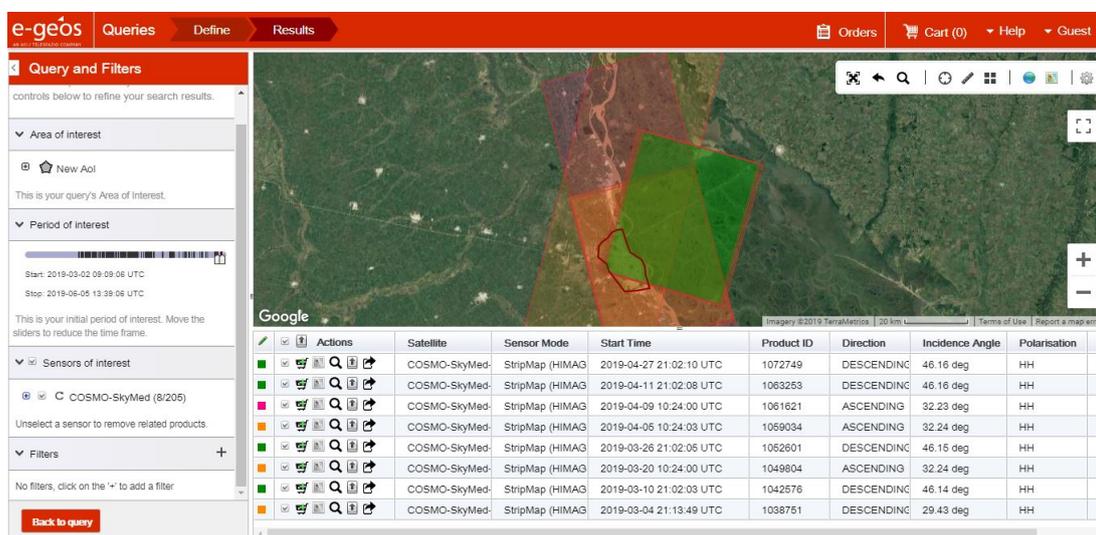


Figura 4.3: Imágenes COSMO-SkyMed para una búsqueda en la zona de Rosario

El catálogo arroja una lista de imágenes con detalles de satélite, modo, fecha y hora, identificación del producto, dirección, ángulo de incidencia, polarización y porcentaje de cobertura del área de interés. De las opciones disponibles se eligieron las 16 imágenes porque eran las únicas que cubren toda la escena de la figura 4.4 y fueron solicitadas a CONAE. Aunque para este trabajo es mejor una polarización VV, se utilizaron las HH porque son las disponibles. No obstante, en la etapa de preprocesamiento (Sección 4.3.2.1) se filtrarán los pares de imágenes por otros criterios.

Number	Satellite ID	Record Number (Imágenes de archivo)	Zona	Fechas	Modo	Ang.	Polariz.	Dir. Orb.	Enfoque	Nivel
	COSMO-SkyMed-1	1061621		2019-04-09 10:24:00 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-4	1059034		2019-04-05 10:24:03 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.24	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-4	320700		2013-10-29 10:28:44 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-3	320117		2013-10-26 10:28:45 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-1	258231		2013-04-24 10:29:56 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-4	258178		2013-04-20 10:29:58 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-4	208036		2012-11-11 10:31:13 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-2	206905		2012-11-07 10:31:13 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-4	65656		2011-07-04 10:35:33 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.15	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-3	60352		2011-07-01 10:35:36 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.21	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-1	53092		2011-02-14 10:36:59 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.21	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-3	47646		2011-02-07 10:37:03 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.23	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-2	45284		2010-08-30 10:38:55 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.21	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-1	38486		2010-08-22 10:38:58 UTC	StripMap (HIMAGE) - Right	32.17	HH	ASCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-1	44481		2010-07-28 21:59:21 UTC	StripMap (HIMAGE) - Left	33.98	HH	DESCENDING		SCS_B
	COSMO-SkyMed-3	44367		2010-07-21 21:59:26 UTC	StripMap (HIMAGE) - Left	34.05	HH	DESCENDING		SCS_B

Figura 4.4: Imágenes solicitadas a CONAE

4.1.3. SRTM de 1 arc sec

El SRTM de 1 *arc sec* (1 arco de segundo angular por píxel que para este caso es ~ 30 metros) es un DEM generado con datos capturados por una misión espacial a bordo del transbordador espacial Endeavour con dos sensores SAR en banda C (2.5.2) a una distancia de 60 metros uno del otro y capturando datos de la misma área de interés en simultáneo.

Este producto está disponible para utilizar en el software SNAP ESA de la ESA y se utiliza como DEM de referencia en el proceso InSAR.

4.1.4. MDE-Ar del IGN

El IGN celebró un convenio con la NGA para recibir el modelo SRTM de Argentina con resolución de ~ 30 metros por píxel. A partir de este modelo, se obtuvo otro de ~ 45 metros por píxel, que se generó aplicando las siguientes tareas:

- Relleno de vacíos
- Inclusión de datos en las zonas de lagos
- Filtrado espacial
- Enmascarado de límites

Para calcular la precisión altimétrica del MDE-Ar generado, se realizó la comparación de los valores de las alturas de puntos de la base de datos altimétrica del IGN con los valores resultantes del MDE, es decir, $H_{base\ de\ datos} - H_{MDE-Ar}$. Es decir, se evaluó la diferencia entre los valores oficiales de altura publicados por el organismo y el valor de altura definido por el modelo.

Observación: Las alturas del modelo SRTM son ortométricas y su nivel de referencia coincide con el modelo gravimétrico terrestre EGM96.

La máxima diferencia positiva fue de +21 metros y la máxima diferencia negativa fue -30 metros, siendo la diferencia promedio de -2,10 metros y el desvío estándar 3,23 metros.

Todas estas especificaciones son descriptas en el *Informe MDE-Ar 45m* ([15]).

Tanto el modelo como sus especificaciones pueden ser descargados desde:

<https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Principal>

4.1.5. Aerofotogramétrico del IGN

A partir de vuelos aerofotogramétricos llevados a cabo por el IGN con:

- a) una cámara digital Vexcel UltraCamXp
- b) un sistema de navegación GNSS
- c) un sistema inercial IMU

es que el IGN ha desarrollado una línea de producción que le permite la determinación precisa de los parámetros de orientación externa de los fotogramas, la aerotriangulación por haces de rayos, y finalmente, la generación de un DEM aerofotogramétrico refinado con una resolución espacial de 5 metros y una precisión vertical submétrica.

Al igual que los DEM de la Sección 4.1.4, pueden ser descargados en:

<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Principal>

4.2. Software

La Tabla 4.2 incluye los softwares utilizados en los procesos técnicos desarrollados para el cumplimiento de los objetivos especificados.

Num	Nombre	Uso	Licencia
1	TBC	Procesamiento GNSS	Propietaria
2	SNAP ESA	InSAR	Gratuito
3	QGIS	GIS y salidas gráficas	Open Source
4	Python	Programación	Open Source

Tabla 4.2: Softwares utilizados

El computador disponible es una notebook con sistema operativo Windows 10, procesador Intel Core i7 y 12 GB de memoria RAM.

4.2.1. TBC

El TBC es un software propietario de la compañía Trimble para el procesamiento diferencial (Sección 2.4.1) de datos GNSS mediante la aplicación de filtros de Kalman como herramienta matemática. El software TBC cuenta con varias funciones como el cambio de sistema de referencia, marco de referencia y proyección, procesamiento diferencial, correcciones en alturas de los instrumentales, cambio de parámetros de antenas, entre otros.

La licencia utilizada en el presente trabajo es la que viene incluida con la compra de los receptores GNSS Trimble (Sección 4.1.1) propiedad de la FCEIA.

4.2.2. SNAP ESA

SNAP ESA es un procesador digital de imágenes que permite operar con datos de tipo raster y vectoriales, aplicar matemática de bandas, filtros, firmas espectrales, histogramas, entre otros. Dicho software es un desarrollo gratuito de la ESA para el procesamiento de datos de las misiones Sentinel (actualmente los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2), aunque también permite el procesamiento de datos proveniente de otras misiones satelitales.

Este software permite procesar imágenes de tipo radar y aplicar el procesamiento InSAR con la excepción del desenrollado de fase para el cual se utiliza la implementación accesoria SNAPHU que se ejecuta por consola.

En resumen, este software será utilizado para el procesamiento InSAR de imágenes HIMAGE COSMO-SkyMed y utilizando datos auxiliares de tipo raster y vectorial, como el DEM SRTM y los límites administrativos de Rosario del portal RDA.

4.2.3. QGIS

El QGIS es un software libre para la creación de Sistemas de Información Geográfica programado en C++, Python y Qt que cuenta con herramientas para conectar a servidores de datos raster y vectorial, matemática de bandas, cambios en los marcos de referencia, modificaciones de la geometría de las imágenes raster, conversiones raster a vectorial y viceversa. Cuenta con la posibilidad de utilizar la librería GDAL y GRASS y por lo tanto las herramientas disponibles en ésta. El QGIS es una herramienta óptima para matemática de bandas, cambios en la distancia interpíxel, cambios en el marco de referencia, visualizaciones y salidas gráficas.

4.2.4. Python

Python [16] es un lenguaje de programación multiparadigma, multiplataforma, con licencia de código abierto cuya filosofía hace hincapié en la legibilidad de código. Cuenta con variables de tipo matriz (array), listas (list), números flotantes (float), cadenas de caracteres (str), tuplas de datos (tuple) útiles para el procesamiento digital de imágenes que se detallan en la Tabla 4.3. Python cuenta con librerías específicas de álgebra de matrices, procesamiento digital de imágenes y GIS como las especificadas en la Tabla 4.4.

Num	Tipo	Característica	Uso
1	array	Matriz	Imágenes
2	list	Lista de datos	Puntos GNSS
3	float	Números decimales	Parámetros
4	str	Cadena de caracteres	Meta data
5	tuple	Tupla de datos	Meta data

Tabla 4.3: Variables de interés

Nombre	Característica
numpy [17]	funciones matemáticas de alto nivel para operar vectores o matrices
scipy [18]	álgebra, interpolación, FFT, procesamiento de imágenes
csv	Manipular archivos csv
gdal [19]	lectura y escritura de formatos de datos geoespaciales y GIS
matplotlib [20]	generación de gráficos a partir de arrays
os	Operación con archivos y carpetas

Tabla 4.4: Librerías utilizadas en Python en la Sección 4.4

En resumen, los input data de la Sección 4.1 son manipulados mediante los formatos de dato de la Tabla 4.3 y las herramientas de las librerías de la Tabla 4.4.

4.3. Implementación en el área de estudio

La implementación de la metodología propuesta para el área de estudio definido en la Sección 3.1 consiste en obtener una nube de puntos de alta precisión obtenidos mediante equipos GNSS en modo diferencial 2.4.1 para generar superficies de interpolación (Sección 2.8). En una etapa intermedia se aplicaron un LPF a la superficie de interpolación de primer grado para suavizar los puntos sin derivada como aristas y vertices. Posteriormente se tomaron las superficies de interpolación de primer y segundo grado para calcular la diferencia y el promedio, esto es:

$$Diferencia_{(Interpolaciones)} = Altura_{(1^{\circ} pasabajo)} - Altura_{(2^{\circ})} \quad (4.1)$$

$$Altura_{(Interpolaciones)} = \frac{Altura_{(1^{\circ} pasabajo)} + Altura_{(2^{\circ})}}{2} \quad (4.2)$$

El cálculo de la diferencia (ecuación 4.1) permitió observar qué tanto se dispersaron las superficies entre sí y por lo tanto asumir que algunas de las dos tiene error que consecuentemente trasladaron al DEM ajustado, mientras que el promedio (ecuación 4.2) es el valor a aplicar en el ajuste del DEM.

Por otro lado, se tomaron las imágenes COSMO-SkyMed de la Sección 4.1.2 de la zona de interés y se aplicaron 2.5 para obtener el DEM de la ciudad.

Finalmente se tomaron las superficies de interpolación para calcular la diferencia y el promedio, esto es:

$$Diferencia_{(Ajuste)} = Altura_{(DEM)} - Altura_{(Interpolaciones)} \quad (4.3)$$

$$Altura_{(Ajuste)} = \frac{Altura_{(DEM)} + Altura_{(Interpolaciones)}}{2} \quad (4.4)$$

4.3.1. Puntos de control

Los puntos de control serán los puntos medidos mediante GNSS en modo diferencial y vinculados o parte de la red Red Geodésica Acosta, Dannenberg, Tanabe (ADT).

La ciudad de Rosario cuenta con la red ADT que es el resultado de un trabajo final para obtener el grado de Ingeniero Agrimensor en la FCEIA de la UNR. El método de medición de la red consistió en un posicionamiento estático relativo de tres receptores a la vez, con una sesión de 40 minutos y un intervalo de grabación de 15 segundos.

Debido al método de medición adoptado para los puntos principales de la red, se compensaron triángulos independientes entre sí. Cabe aclarar que todos los triángulos tienen una base común que está conformada por el punto F705 y UNRO (cuyas coordenadas fueron consideradas conocidas). El punto UNRO es un punto RAMSAC ubicado en el techo del edificio de la FCEIA ubicado en Pellegrini 250.

El segundo conjunto de datos son los PAF que se midieron en método diferencial en sesiones de 40 minutos o más y con la estación permanente UNRO como base.

4.3.1.1. Relevamiento GNSS

La campaña de medición se realizó en 3 días participando un chofer del municipio y tres ingenieros agrimensores: Ingenieros Delorenzi, Ramires y O'Connor. En la Sección 4.3.1 se especificaron dos de los tres conjuntos de puntos a utilizar para el ajuste y la validación. El tercer conjunto de datos será una nube de puntos medida con receptores Trimble R6 de doble frecuencia y doble constelación en sesiones de 3 a 10 minutos en intervalos de grabación de 5 segundos. Algunos de estos puntos forman parte de la red ADT y puntos PAF para control y vinculación sumado a nuevos puntos geoméricamente distribuidos para contar con vectores entre puntos de aproximadamente 3 km de largo y ubicados en zonas despejadas de:

- Playones deportivos municipales
- Áreas cementadas o de tierra
- Rotondas y avenidas
- Baldíos

A solicitud de los ingenieros agrimensores de la Dirección de Cartografía Digital de la Municipalidad de Rosario es que en algunos casos se midieron puntos auxiliares para generar puntos de apoyo en las zonas de los puntos listados.

4.3.1.2. Procesamiento Diferencial en TBC

El procesamiento de los datos medidos en la campaña fue realizada por el profesor Gustavo Noguera con participación del Ing. Agrimensor Guillermo O'Connor en dos medias jornadas de trabajo, es decir, una jornada completa de procesamiento.

El primer paso en TBC es crear un proyecto nuevo con los parámetros definidos según el IGN en el glosario del presente trabajo que son:

Parámetro	Valor
Sistema de Referencia	WGS84
Marco de Referencia	POSGAR07
RAMSAC/POSGAR07 base	UNRO
Época	ITRF 05 época 2006.632
Sistema de Proyección	Gauss-Krüger Argentina - 5 (EPSG:5347)

Tabla 4.5: Parámetros geodésicos utilizados

Se cargaron los datos del relevamiento donde se controlaron las alturas de antenas y se continuó con la carga de los datos de UNRO y la definición de éste como punto base para el procesamiento. Definido el punto base UNRO y cargados con puntos relevados con sus alturas es que se procesaron los vectores y se controló que todos los puntos tengan solución fija con elipses de error debajo de los $\pm 0,05m$ cuyo resultado son los puntos de la Tabla 4.6.

Jornada	Cantidad de puntos
1	13
2	28
3	34

Tabla 4.6: Cantidad de puntos resultantes por jornada de campaña

De estos puntos es necesario aclarar que algunos puntos responden a mediciones de puntos de la red ADT y PAF para control y vinculación.

4.3.1.3. Vinculación de puntos GNSS

Los puntos ADT, PAF y el relevamiento de nuevos puntos (Sección 4.3.1.1) utilizaron como base la estación UNRO y por lo tanto utilizan los parámetros de la Tabla 4.5. La comparación entre los valores de altura de 3 puntos ADT y 3 puntos PAF con sus homónimos medidos durante el relevamiento arroja valores menores al centímetro. Por lo tanto, el control de vinculación mediante el punto UNRO es aceptable y arroja como resultado 96 puntos totales (Figura 4.1) entre puntos ADT, PAF y relevamiento que se detallan en la Tabla 4.7.

Cantidad	Uso
58	Ajuste
38	Validación

Tabla 4.7: Cantidad de puntos GNSS para el ajuste y la validación

4.3.2. InSAR con imágenes COSMO-SkyMed en SNAP ESA

4.3.2.1. Preprocesamiento

Una vez que se inicia el SNAP ESA se cargan los pares de imágenes COSMO-SkyMed arrastrando a la Sección **Product Explorer** y en la pestaña **Radar/Interferometric/InSAR Stack Overview** se calcula el preprocesamiento que arroja los valores de la Tabla 4.8.

N	Master	Slave	Perp.	T	Coh	H.A.	fDC[H]
1	21Jul2010	28Jul2010	-216.31	-7	0.31	30.39	-849.21
2	22Aug2010	30Aug2010	-200.28	-8	0.76	30.77	109.55
3	14Feb2011	07Feb2011	-35.37	7	0.46	170.72	715.28
4	04Jul2011	01Jul2011	-494.58	3	0.49	12.17	216.26
5	07Nov2012	11Nov2012	-336.38	-4	0.48	17.96	458.88
6	24Apr2013	20Apr2013	699.37	4	0.21	-8.63	696.34
7	29Oct2013	26Oct2013	401.02	3	0.39	-15.04	-570.30
8	05Apr2019	09Apr2019	651.80	-4	0.20	-9.25	-777.73

Tabla 4.8: Resultado del preprocesamiento en SNAP ESA (en rojo los mejores pares)

4.3.2.2. Implementando los procesos InSAR en SNAP ESA

Con los mejores resultados del preprocesamiento (resaltados en rojo en la Tabla 4.8) se realizó el proceso InSAR siguiendo la secuencia y los parámetros de las Tablas 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12. Sin embargo, para el proceso final fue seleccionado el par N° 2 de la Tabla 4.8. Es interesante resaltar que todos los procesos InSAR en SNAP ESA pueden aplicarse con distintas opciones y son:

- cada proceso individual en el menú **Radar**
- automatizando procesos con GraphBuilder o Batch Processing en el menú **Tools**
- corriendo por consola los procesos utilizando como base los archivo *.xml* generados al guardar los procesos en la herramienta GraphBuilder

Estas opciones fueron enlistadas por orden de automatización de menor a mayor y cada una tiene sus ventajas y desventajas. El autor utilizó los primeros dos porque el tercero generaba errores en el computador utilizado (Sección 4.2).

Proceso	Parámetro	Valor
Corregistration	N° of GCP's	20000
Corregistration	Test CGPs are on land	-
Corregistration	Apply fine Registration SLCs	✓
Corregistration	Estimate Initial Coarse Offset	-
Corregistration	Coarse Window Width	128
Corregistration	Coarse Window Height	128
Corregistration	Row interpolation Factor	4
Corregistration	Col interpolation Factor	4
Corregistration	Max Iterations	10
Corregistration	GCP Tolerance	0,25
Corregistration	Fine Window Width	32
Corregistration	Fine Window Height	32
Corregistration	Coherence Threshold	0,6
Corregistration	Cross Correlation based registration	✓
Corregistration	Fine accuracy in Azimuth	16
Corregistration	Fine accuracy in Range	16
Corregistration	Coherence based registration	-
Corregistration	RMS Threshold (pixel accuracy)	0,001
Corregistration	Warp Polynomial Order	1
Corregistration	Interpolation Method	CubicConv(6pts)
Corregistration	Show residuals	✓
Interferogram	Substract flat- earth phase	✓
Interferogram	Degree of Flat Earth polynomial	5
Interferogram	Number of Flat Earth estimation points	1001
Interferogram	Orbit interpolation degree	5
Interferogram	Include coherence estimation	✓
Interferogram	Square Pixel	✓
Interferogram	Independent Window Sizes	-
Interferogram	Coherence Range Window Size	10
Interferogram	Coherence Azimuth Window Size	11

Tabla 4.9: Parámetros a ingresar en SNAP ESA para el corrección e interferograma

Proceso	Parametro	Valor
Goldstein	Adaptative Filter Exponent in (0,1]	1
Goldstein	FFT Size	64
Goldstein	Window Size	3
Goldstein	Use Coherence mask	-
Goldstein	Coherence Threshold in (0,1]	0,2
Multilooking	GR Square Pixel	✓
Multilooking	Independent Looks	-
Multilooking	Number of Range Looks	4
Multilooking	Number of Azimuth Looks	4
Multilooking	Mean GR Square Pixel	8,28
Multilooking	Output Intensity	-

Tabla 4.10: Parámetros a ingresar en SNAP ESA para aplicar el filtro de Goldstein y Multilooking

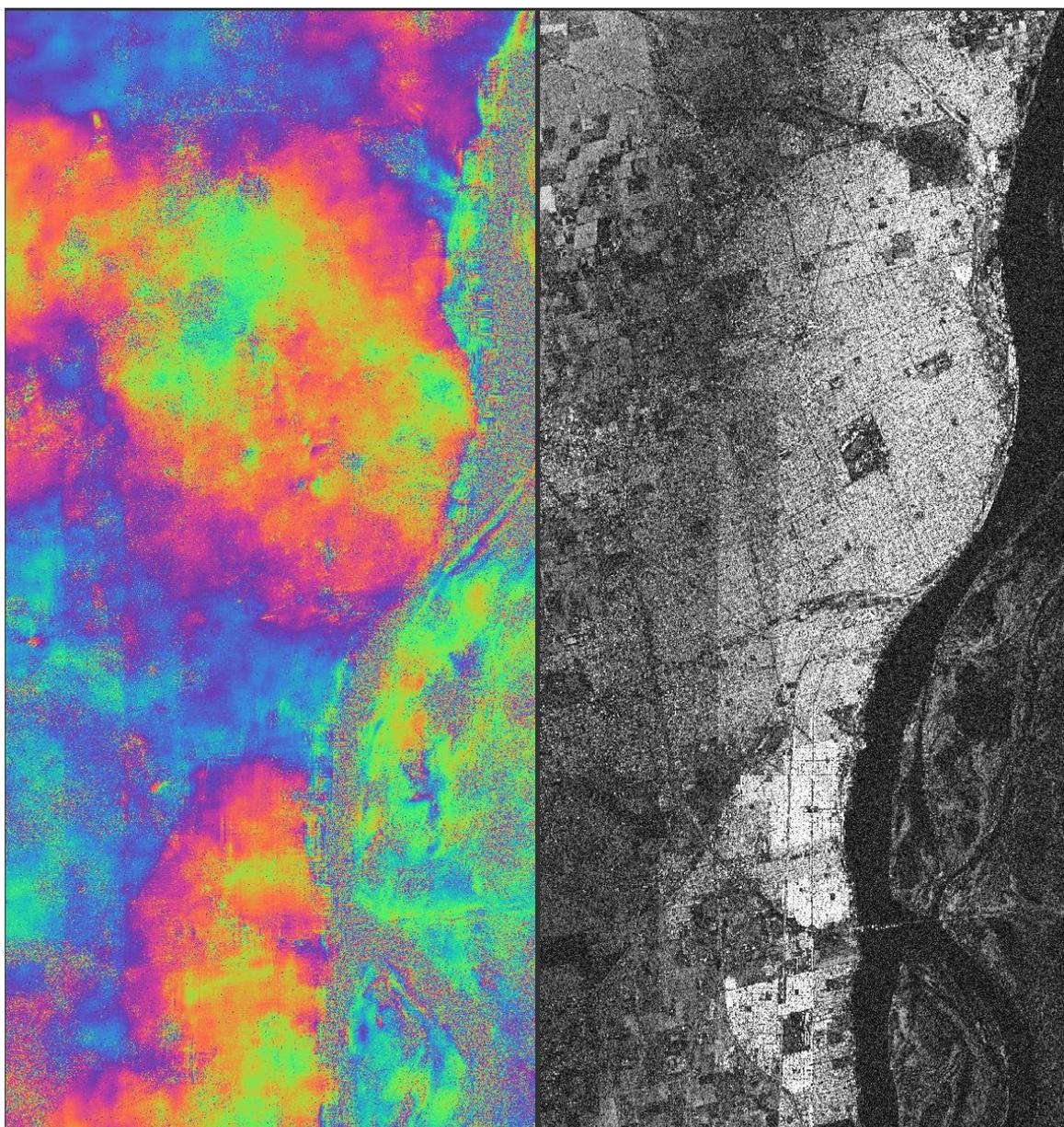


Figura 4.5: Interferograma y coherencia interferométrica para el par seleccionado. Fuente: Elaboración propia

Proceso	Parametro	Valor
Snaphu Export	Statistical - cost mode	DEFO
Snaphu Export	Initial method	MCF
Snaphu Export	Number of Tile Rows	1
Snaphu Export	Number of Tile Columns	1
Snaphu Export	Number of Processors	4
Snaphu Export	Row Overlap	0
Snaphu Export	Column Overlap	0
Snaphu Export	Tile Cost Threshold	500

Tabla 4.11: Parámetros a ingresar en SNAP ESA para generar el interferograma enrollado

```

Símbolo del sistema
snaphu v1.4.2
27 parameters input from file snaphu.conf (84 lines total)
only one tile--disregarding multiprocessor option
Logging run-time parameters to file snaphu.log
Reading wrapped phase from file Phase_ifg_22Aug2010_30Aug2010.snaphu.img
No weight file specified. Assuming uniform weights
Reading correlation data from file coh_22Aug2010_30Aug2010.snaphu.img
Calculating deformation-mode cost parameters
Building range cost arrays
Building azimuth cost arrays
Initializing flows with MCF algorithm
Setting up data structures for cs2 MCF solver
Running cs2 MCF solver
Running nonlinear network flow optimizer
Maximum flow on network: 2
Number of nodes in network: 4350589
Flow increment: 1 (Total improvements: 0)
Treesize: 4350589 Pivots: 1419517 Improvements: 19960
Maximum flow on network: 2
Flow increment: 2 (Total improvements: 19960)
Treesize: 4350589 Pivots: 3 Improvements: 0
Maximum flow on network: 2
Total solution cost: 34776098
Integrating phase
Writing output to file UnwPhase_ifg_22Aug2010_30Aug2010.snaphu.img
Program snaphu done
Elapsed processor time: 0:04:45.34
Elapsed wall clock time: 0:05:29
C:\Users\jorge\Desktop\ML\EXPORT\4_ML\8_dias_Stack_ifg_Flt_3_4_ML\snaphu-v1.4.2_win64\bin>

```

Figura 4.6: Ejecución de SNAPHU del archivo a desenrollar. Fuente: Elaboración propia

Proceso	Parametro	Valor
Phase To Elevation	Digital Elevation Model	SRTM 1sec HGT
Phase To Elevation	DEM Resampling Method	Bilinear_interpolation
Terrain Correction	Source Bands	Elevation
Terrain Correction	Digital Elevation Model	SRTM 1sec HGT
Terrain Correction	DEM Resampling Method	Bilinear_interpolation
Terrain Correction	Image Resampling Method	Bilinear_interpolation
Terrain Correction	Source GR Pixel Spacings	7.85(m)x8.71(m)
Terrain Correction	Pixel Spacing(m)	9
Terrain Correction	Pixel Spacing(deg)	8,0848
Terrain Correction	Map Projection	WGS84(DD)
Terrain Correction	Mask out areas without elevation	✓
Terrain Correction	Output complex data	-
Terrain Correction	Selected source band	✓
Terrain Correction	DEM	✓
Terrain Correction	Latitude & Longitude	-
Terrain Correction	Incidence Angle from ellipsoid	-
Terrain Correction	Local incidence angle	-
Terrain Correction	Projected local incidence angle	-
Terrain Correction	Apply radiometric normalization	-

Tabla 4.12: Parámetros a ingresar en SNAP ESA para obtener elevación y corregir la geometría de adquisición

Como resultado de los procesos aplicados en la Tabla 4.9 se obtiene un stack de imágenes coregistrado (Sección 2.5.10) con la imagen de coherencia interferométrica (Sección 2.5.5.1) y la imagen del interferograma (Sección 2.5). La Tabla 4.10 aplica un filtro de Goldstein y realiza un multilooking de 4 miradas tanto en rango como en azimuth (Sección 2.5.8).

El proceso de la Tabla 4.11 se aplicó desde la pestaña **Radar/Interferometric/Products/Unwrapping/Snaphu Export** para exportar la fase enrollada y correr por consola el desenrollado mediante el Snaphu (Sección 2.5.9). Los pasos para ejecutar Snaphu fueron:

- Bajar Snaphu desde:
<https://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/snaphu/>
- Descomprimir el archivo descargado y ubicar el directorio *bin*
- Copiar los archivos resultantes de proceso de la Tabla 4.11 en el directorio *bin* mencionado en el punto anterior
- Escribir en consola: `cd Direccion Completa Directorio in`
- Abrir el archivo **snaphu.conf** y copiar el comando en dicho archivo similar a: `snaphu -f snaphu.conf Phase_HH_22Aug2010_30Aug2010.snaphu.img6342`
- Copiar en consola el comando copiado en el punto anterior

El proceso de la Figura 4.6 crea en el directorio *bin* trabajado un nuevo archivo de fase desenrollada que debe ser cargado en SNAP ESA desde la pestaña ubicada en **Radar/Interferometric/Products/Unwrapping/Snaphu Import** La Tabla 4.12 contiene los parámetros para convertir de fase a elevación a partir de la altura de ambigüedad (2.15) y la corrección de la geometría de adquisición lateral propia del radar (Sección 2.5.3).

4.3.3. Sobre los resultados en relación a las distorsiones geométricas

En áreas urbanas y sobre todo en áreas de edificaciones en altura se presentan casos de distorsiones geométricas que podrían resolverse aplicando un script que calcule los puntos con posibles deformaciones y los elimine o reemplace para, de esta forma, no incluir estos datos con error en el modelo.

4.3.4. Ediciones previas del modelo a validez y ajustar

El resultado de la Sección 4.3.2.2 es una imagen con píxeles de altura (notar que si bien podríamos decir que es un DEM es necesario al menos una comparación con datos del objeto a representar para poder afirmar que es un modelo del mismo) de la escena total y es necesario recortar las áreas límite de la Ciudad de Rosario. Para esto hacemos:

- Descargar límites de:
<https://datos.rosario.gob.ar/>
- Cargar límites desde la pestaña **Vector/Import**
- Enmascarar el resultado de 4.3.2.2 en **Raster/Mask/Land Sea Mask**

El resultado es una imagen con elementos NaN y valores de altura en los píxeles dentro de los límites del municipio.

El paso siguiente es exportar la imagen con su respectiva georeferencia y esto se hace seleccionando el valor resultante y clickeando la pestaña **File/Export/GeoTiff**.

4.3.5. Remuestreo de un DEM

La imagen saliente desde SNAP ESA tiene una distancia interpíxel de $7,85\text{ m} \times 8,71\text{ m}$ que se puede observar en la Tabla 4.12 y esto surge por aplicar un multilooking de 4 en ambos. Para facilitar los cálculos es que se definió utilizar un píxel de 10 metros y por eso es que se hace necesario remuestrear los píxeles a este valor además de convertir de WGS84 a POSGAR07. Este proceso se realizó en QGIS ya que es más amigable y versátil que el SNAP ESA. No obstante, podrá notar el lector que la aplicación del multilooking (Sección 2.5.8) no es un remuestreo (Sección 2.7) pero si termina generando un cambio en la distancia interpíxel. En resumen, se aplicó un multilooking, un remuestreo en distancia interpíxel y una conversión de sistema geodésico.

4.3.6. Bandeado vertical en los resultados InSAR

Notará el lector el bandeado vertical en las imágenes de la Figura 4.5 y se preguntará el motivo. En principio se consideró la posibilidad de un movimiento en la plataforma que derivó en un movimiento uniforme del sensor, aunque, vuelto a procesar con la misma notebook (Sección 4.2) el mismo par y con el mismo SNAP ESA arrojó valores distintos. Sin embargo, fue utilizada la imagen con bandeado para el proceso de la Sección 4.4 porque al momento de implementar el ajuste y la validación no se había hecho ese reprocesamiento.

4.3.7. Control de resultados por comparación

En el QGIS se compararon los resultados del DEM COSMO-SkyMed (Figura 4.7) con el DEM SRTM y el DEM aerofotogramétrico del IGN todos llevados a resolución de 10 metros como se especifica en la Sección 4.3.5. Notar que SRTM es banda L y el DEMIGN es un modelo obtenido mediante fotogrametría y el DEM COSMO-SkyMed en banda X pero a fines de la comparación es útil.

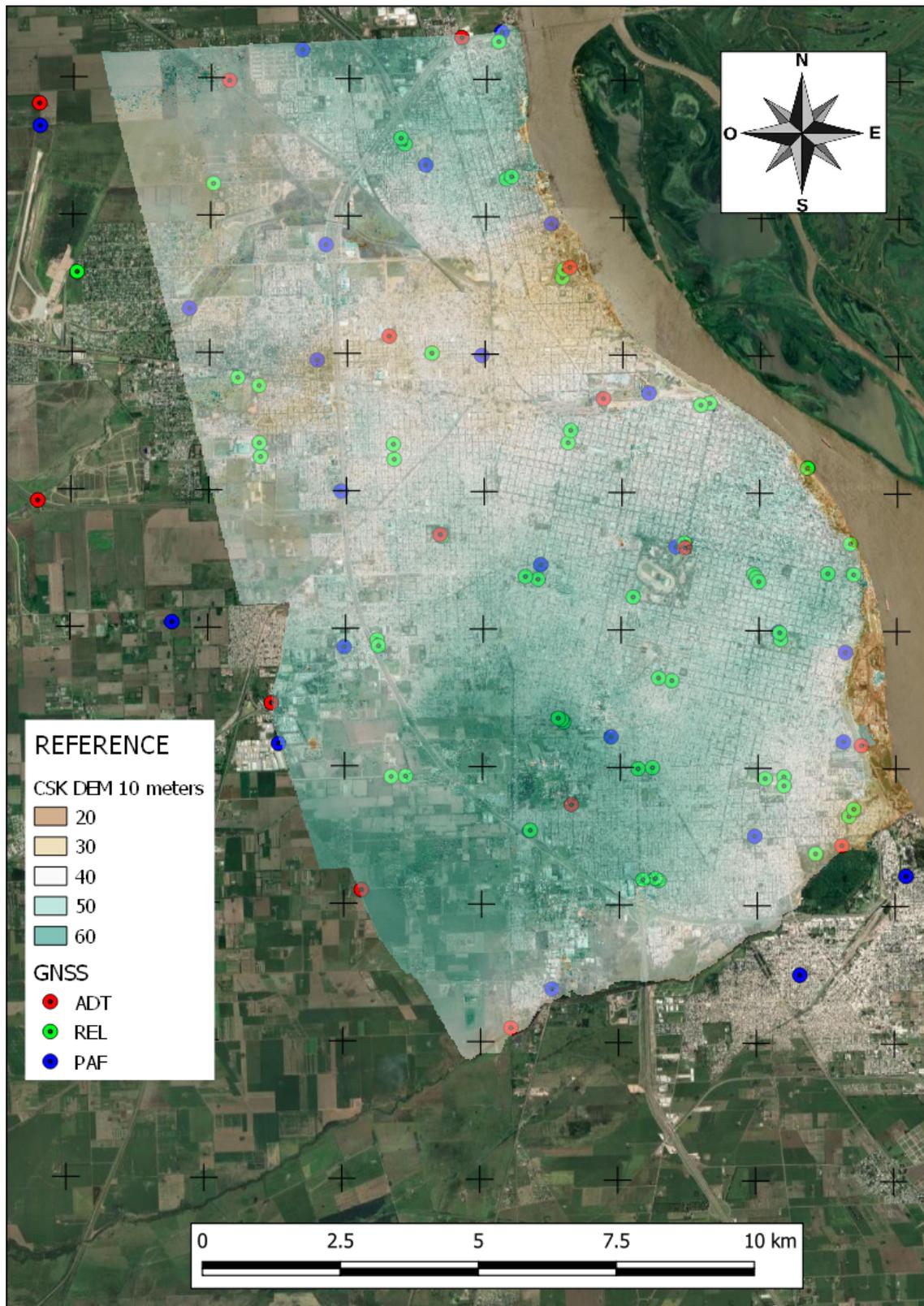


Figura 4.7: Resultado del proceso InSAR con distancia interpíxel de 10 metros en POSGAR07 y los puntos GNSS. Nota: las cruces representan la cuadrícula con una distancia de 2,5kilometros. Fuente: Elaboración propia

4.4. Ajuste y validación

Siguiendo el concepto de modelo definido en la Sección 2.9 es que la presente sección define al objeto de estudio como la superficie topográfica. El resultado del proceso InSAR como el modelo de dicho objeto y la validación mediante datos GNSS como instancia para determinar la representatividad o no del modelo. Mientras que las superficies de interpolación se consideran una propuesta de cálculo a partir de datos reales que mejoren los resultados en la instancia de validación y por lo tanto de la representatividad. El programa utilizado es diseñado por el equipo de trabajo utilizando el lenguaje de programación Python y utilizando las librerías citadas en la Sección 4.2.4. El mismo consiste de 19 funciones creadas por el usuario que llaman a funciones de las librerías mencionadas. Las funciones se utilizan en distintas instancias del algoritmo implementado de la Figura 4.8 y se basa en el trabajo realizado en 2003 por Euillades y otros [3].

4.4.1. Inicio del programa

El programa consta de dos scripts y son:

Nombre	Característica
<i>call_CAAF.py</i>	main o principal
<i>CAAF.py</i>	Funciones

Tabla 4.13: Scripts desarrollados para los procesos de la Sección 4.4

NOTA: CONAE ASI ASR FAMAFA (CAAF) es un acrónimo utilizado para asignar el nombre a los scripts en referencia a las principales instituciones participantes.

Las primeras líneas de código del script 4.1 describen los procesos que se realizan desde el mismo, carga la librería **CAAF** y crea los valores genéricos que pueden ser modificados si es necesario.

```

1 # This script have different block, these are:
2 #     17#             Generic values
3 #     18#             calling functions to adjustment
4 #     19#             calling functions to validation
5 #     20#             calling functions to show graphics
6 #     21#             calling functions to save
7 #     22#             call of functions for statistical analysis
8
9 import CAAF
10
11 #####
12 #     17#             Generic values
13 #####
14 kernel      = 7
15 run         = 'y'
16 mov         = 3
17 shower      = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,
18               13,14,15,16,17,18,19]
19 #0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,15,16,17,18,19
20 directory   = 'C:\\Users\\jorge\\Desktop\\05_Python\\'
21 dir_saved   = directory
22 dir_input   = directory+'CSK_10m.tif'
23 dir_csv     =(directory+'adjustment.csv',directory+'validation.csv')

```

```

23
24 to_save = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,
13,14,15,16,17,18,19]
25 titles=('00 CSK original','01 CSK moved in XY, Z and filled with LPF'
26         ,
27         '02 First degree spline','03 First degree spline with low pass
filter' ,
28         '04 Cubic Spline surface'
29         ,
30         '05 Difference first degree spline LPF and CSK filled'
31         ,
32         '06 Mean first degree spline LPF and CSK filled'
33         ,
34         '07 Difference cubic spline and CSK filled'
35         ,
36         '08 Mean cubic spline and CSK filled'
37         ,
38         '09 Difference first degree spline LPF and cubic spline'
39         ,
40         '10 Mean first degree spline LPF and cubic spline'
41         ,
42         '11 Difference first degree spline with LPF and without'
43         ,
44         '12 Mean first degree spline with LPF and without'
45         ,
46         '13 Difference 10 and CSK Filled','14 Mean 10 and CSK Filled'
47         ,
48         '15 Difference 10 and CSK Filled','16 Mean 10X.25 and CSK FilledX
.75' ,
49         '17 Difference 14 and 16','18 Image Resulting with 0'
50         ,
51         '19 Image Resulting with nan' )
52 namef='02_results'
53 #generic values
54 #####
55 # 17# Generic values
56 #####

```

Script 4.1: Importar CAAF en el script main o principal

Las primeras líneas del script 4.2 importan las librerías a utilizar y describen brevemente qué hace cada función utilizada en el programa.

```

1 import numpy as np
2 import scipy as sp
3 import csv
4 import gdal
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import os
7
8 # This script have different functions, these are:
9 # 1# Open CSV
10 # 2# Generate list of coordinate
11 # 3# Read and extraction of the geo spatial information
12 # 4# List to array on local coordinate
13 # 5# Correlation values CSK and GNSS
14 # 6# Rood mean square
15 # 7# delta_XY
16 # 8# Validation of movement on XY
17 # 9# Z Difference
18 # 10# Create interpolation and spline surface

```

```

19 # 11# LPF
20 # 12# Adjustment
21 # 13# Save a image with spatial information
22 # 14# Plots
23 # 15# Statistics
24 # 16# Organizing
    
```

Script 4.2: Librerías importadas en el script CAAF.py

Es importante resaltar que tanto en el script 4.1 como en el 4.2 son sólo las primeras líneas de dichos scripts y no la totalidad de los mismos.

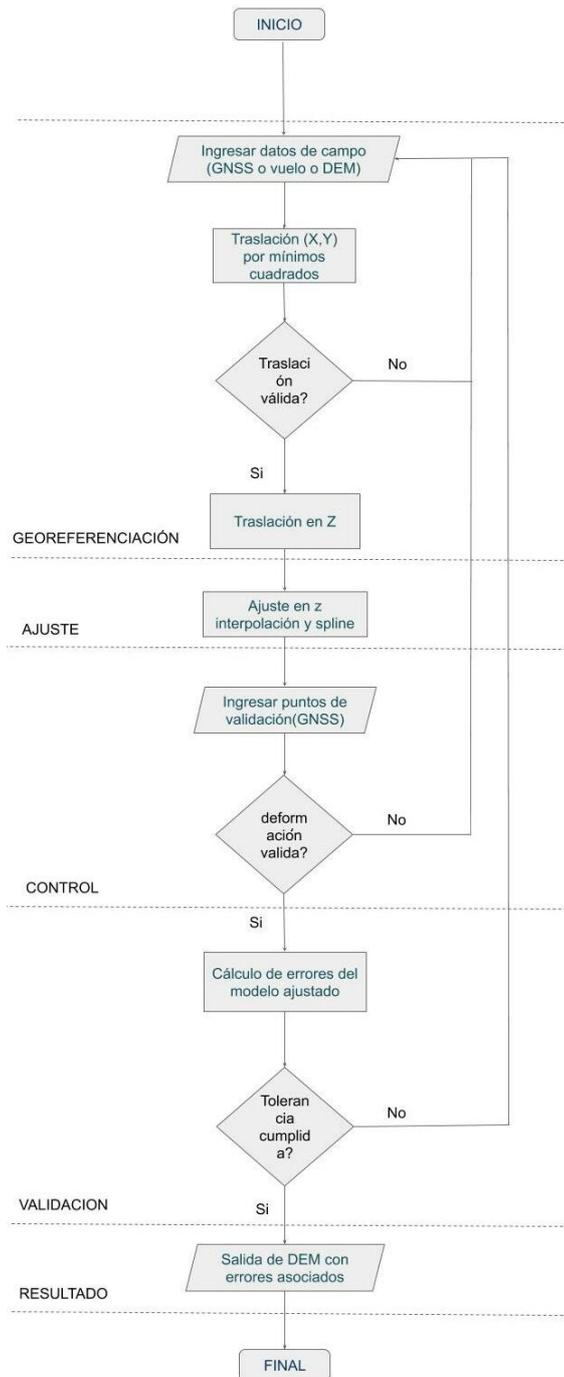


Figura 4.8: Algoritmo de trabajo desarrollado. Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Ejecutar el ajuste de datos

El proceso de ajuste se inicia con la carga del archivo de extensión *.csv* que contiene los puntos GNSS (58 puntos en total según la Tabla 4.7) y la imagen DEM COSMO-SkyMed resultante del proceso InSAR (Sección 4.3.2). Con las características geométricas de la imagen crea una grilla de iguales características y datos sólo en los píxeles que coinciden con un punto GNSS y con estos dos generará dos interpolaciones: un spline de primer grado y un spline cúbico (para simplificar nombres le llamaremos SA-SC. En el caso de la interpolación lineal por partes (spline de primer grado) se aplica un LPF (Sección 2.10.2) ya que obtiene vértices y aristas que no existen en el terreno (que a partir de aquí llamaremos SA-SL-LPF). Por otro lado, la imagen DEM es filtrada en valores mayores a 20 metros y esos valores son rellenados con una imagen auxiliar creada a partir de un LPF a la misma imagen DEM.

El proceso de ajuste comienza con la georreferenciación en las coordenadas (x, y) y se aplica buscando el menor RMSE entre las diferencias entre los píxeles del DEM COSMO-SkyMed y los píxeles con altura GNSS desplazando estos últimos en la primera y segunda vecindad. El menor valor resultante fue el obtenido desplazando la imagen DEM un píxel al oeste y cero en sentido norte-sur. Lo dicho anteriormente implica que el DEM COSMO-SkyMed se ha desplazado 10 metros a la derecha y esto representa un excelente resultado de georeferenciación. El paso siguiente consistió en calcular el error en la coordenada (z) que se definió como la media de las diferencias entre los píxeles DEM COSMO-SkyMed y los píxeles con dato GNSS cuyo resultado fue 1,66 metros y por lo tanto se restó a toda la imagen $-1,66$ metros. RE resultado es una imagen corregida en las coordenadas (X, Y, Z) y que para simplificar nombres llamaremos CSK-LPF-GR.

Posteriormente se filtraron las tres superficies, es decir, la SA-SL-LPF, SA-SC y CSK-LPF-GR entre si para verificar que en cada una de las tres tenga dato y donde no hay dato no haga ajustes.

Como instancias de control en los resultados se aplican la media y la diferencia entre SA-SL-LPF y SA-SC y; SA-SL-LPF y SA-SC con CSK-LPF-GR para evaluar si las imágenes interpoladas guardan o no relación con el DEM.

La instancia de ajuste en sí mismo consiste en calcular la media entre CSK-LPF-GR con la media resultante entre SA-SL-LPF y SA-SC.

4.4.3. Ejecutar la validación de datos

Los primeros pasos de la validación son similares al ajuste, donde el programa carga del archivo de extensión *.csv* que contiene los puntos GNSS (38 puntos en total según la Tabla 4.7) y la imagen que ingresa será el DEM COSMO-SkyMed ajustado que se obtuvo en la Sección 4.4.2.

4.4.4. Ventanas gráficas y almacenamiento

Todos los productos son desplegados en ventanas individuales y almacenados con su respectiva especificación de nombre en la variable *titles* del bloque *Generic Values* que se visualiza en el script 4.1. No obstante, siendo valores genéricos, pueden ser modificados por el usuario para visualizar y/ o guardar sólo los resultados de interés.

5.1. Python

Los resultados de las Secciones 4.3.2 y 4.3.1.2 son los input de la Sección 4.4 para obtener las visualizaciones de las 20 Figuras 5.1-5.20 donde las escalas inferior e izquierda representan las coordenadas en la matriz de la imagen y la escala de colores de la derecha representan las alturas de los píxeles en metros. Estas visualizaciones se obtienen a partir de las imágenes *.tif* que conservan la meta data de la imagen DEM original y por lo tanto son imágenes georreferenciadas en el marco de referencia POSGAR07.

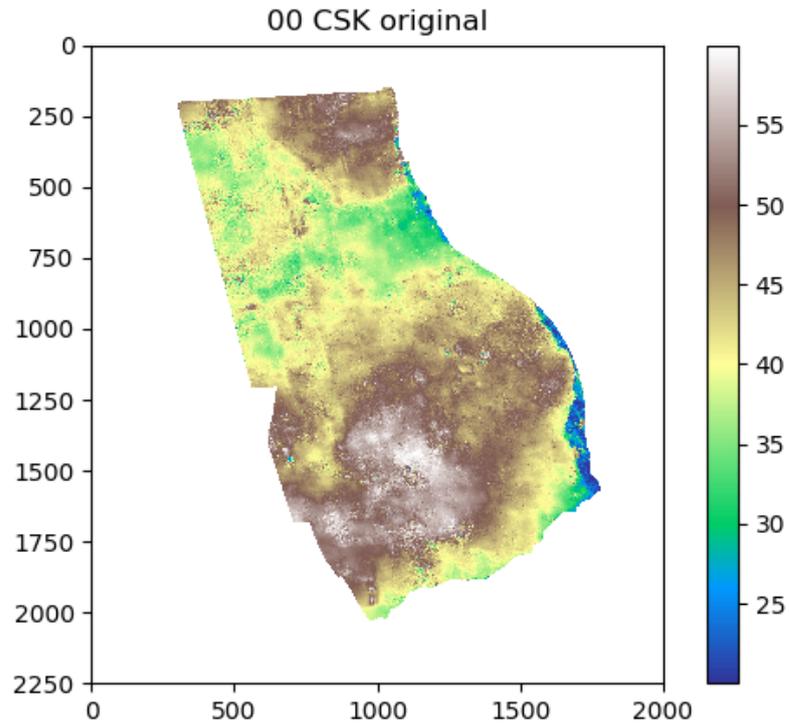


Figura 5.1: Proceso de Python 0

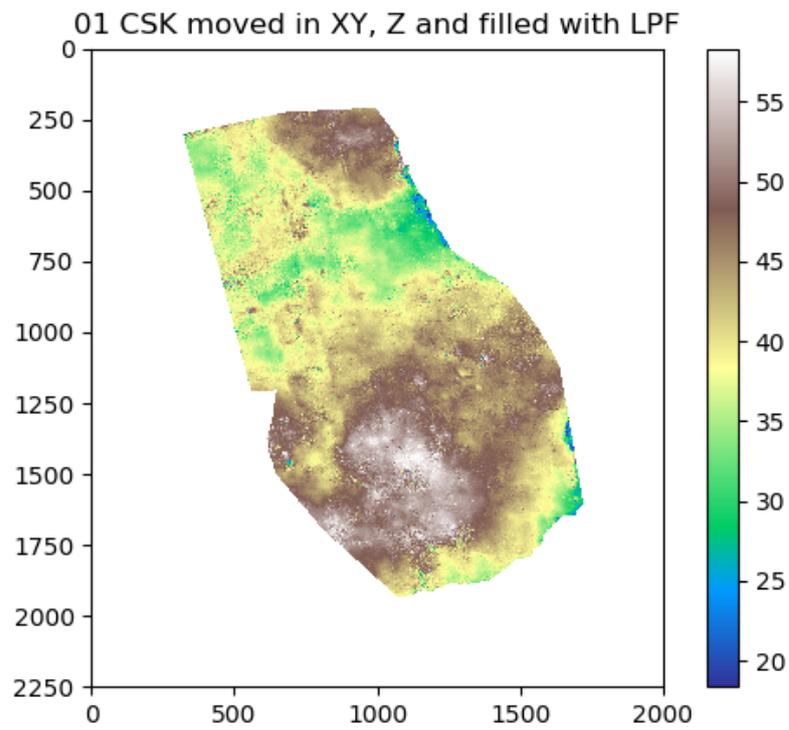


Figura 5.2: Proceso de Python 1

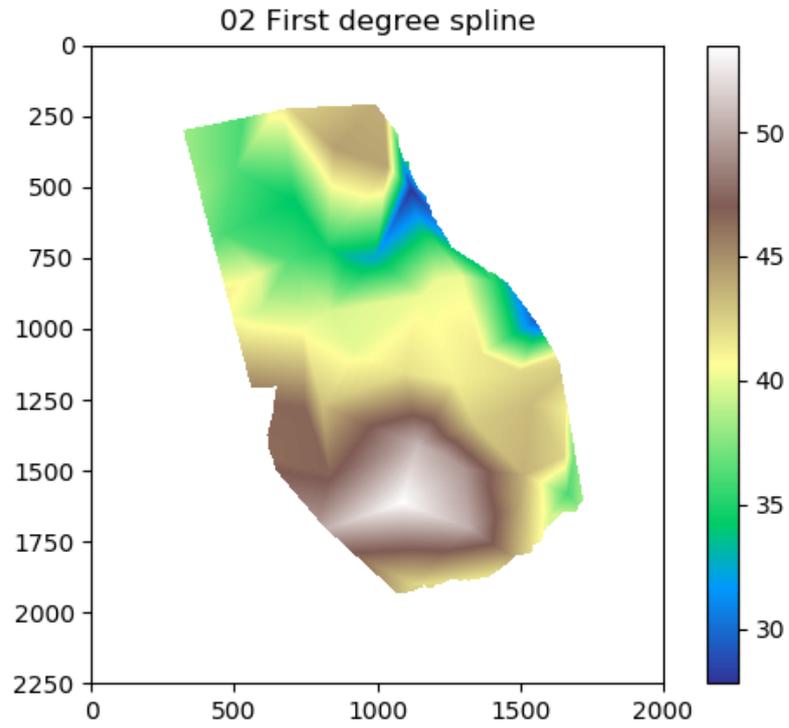


Figura 5.3: Proceso de Python 2

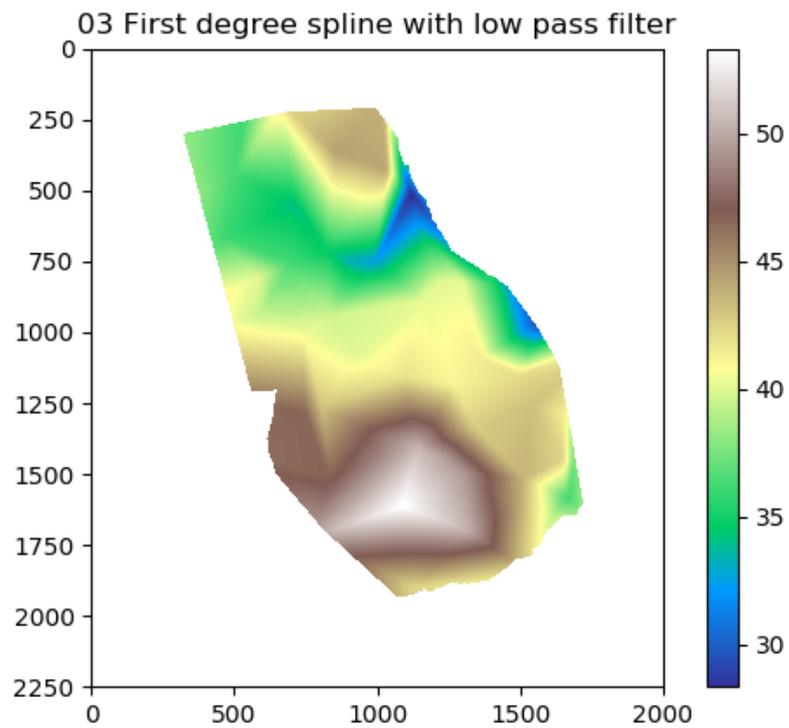


Figura 5.4: Proceso de Python 3

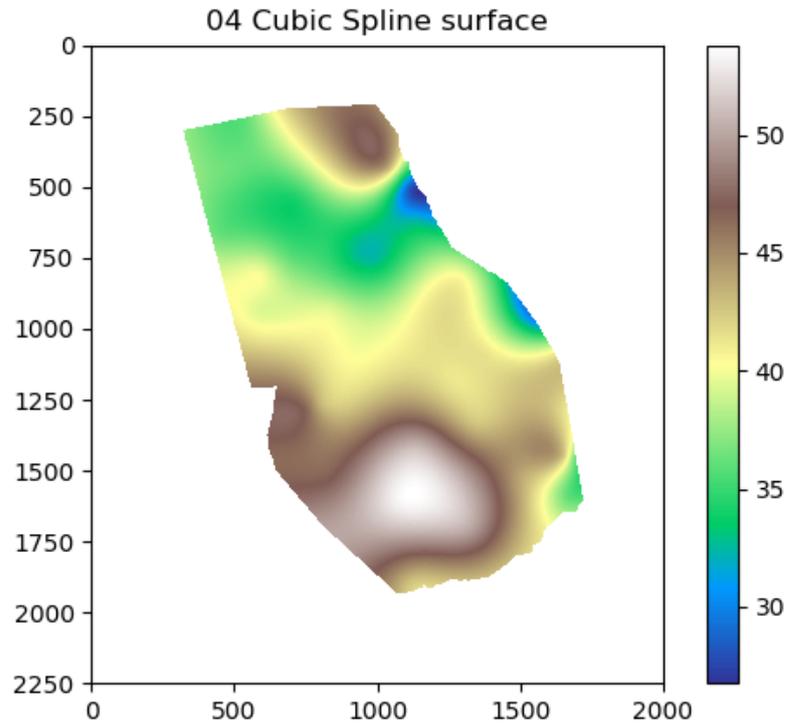


Figura 5.5: Proceso de Python 4

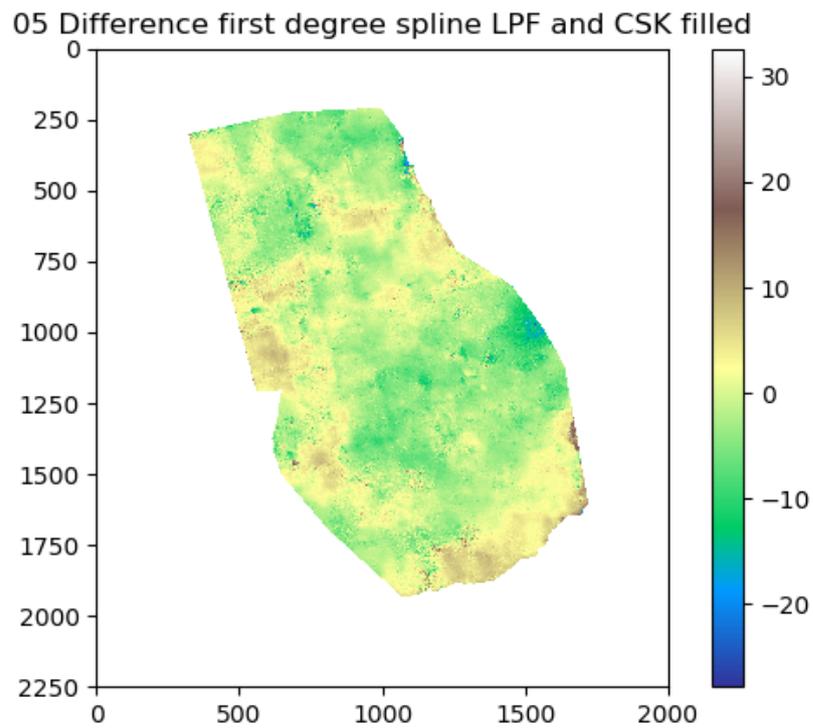


Figura 5.6: Proceso de Python 5

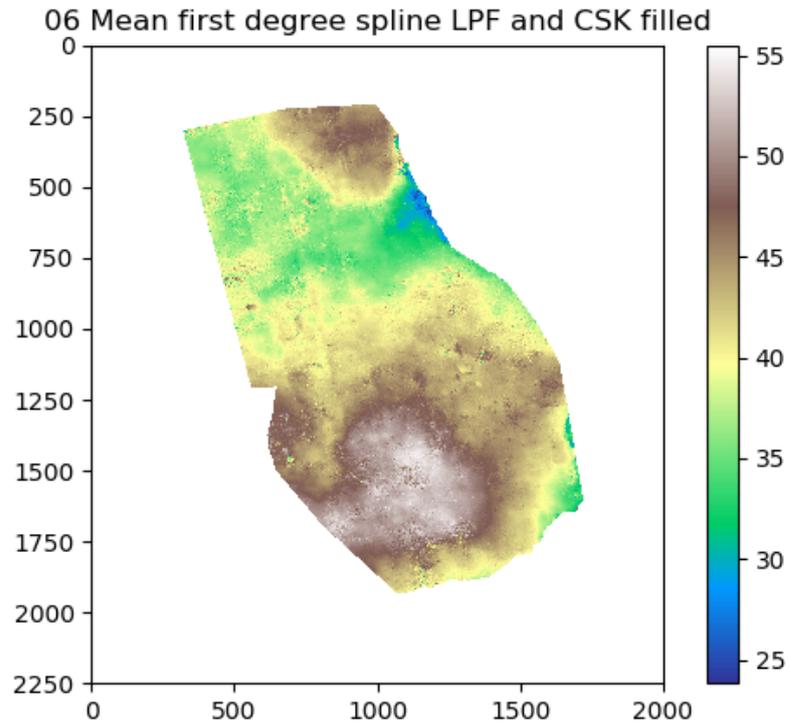


Figura 5.7: Proceso de Python 6

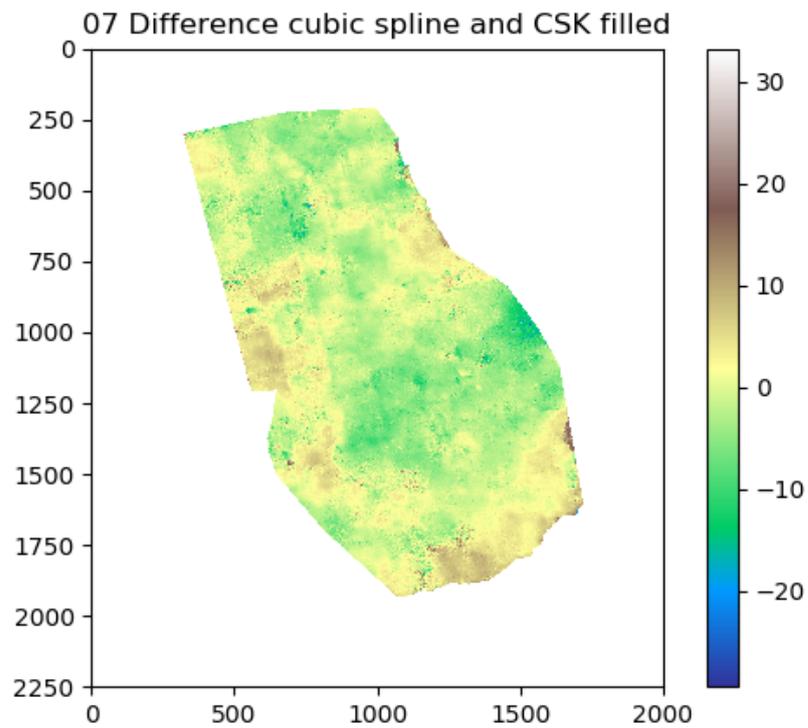


Figura 5.8: Proceso de Python 7

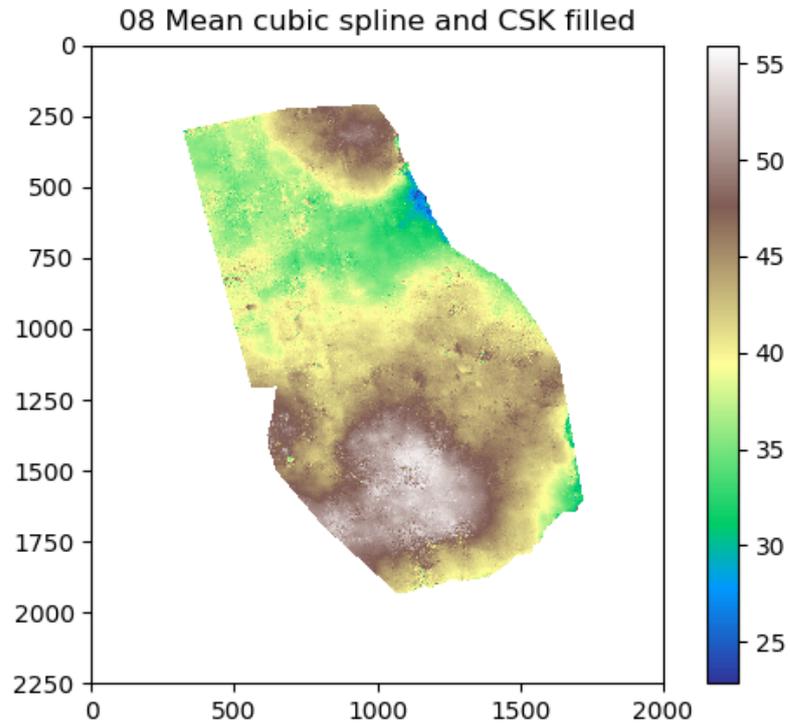


Figura 5.9: Proceso de Python 8

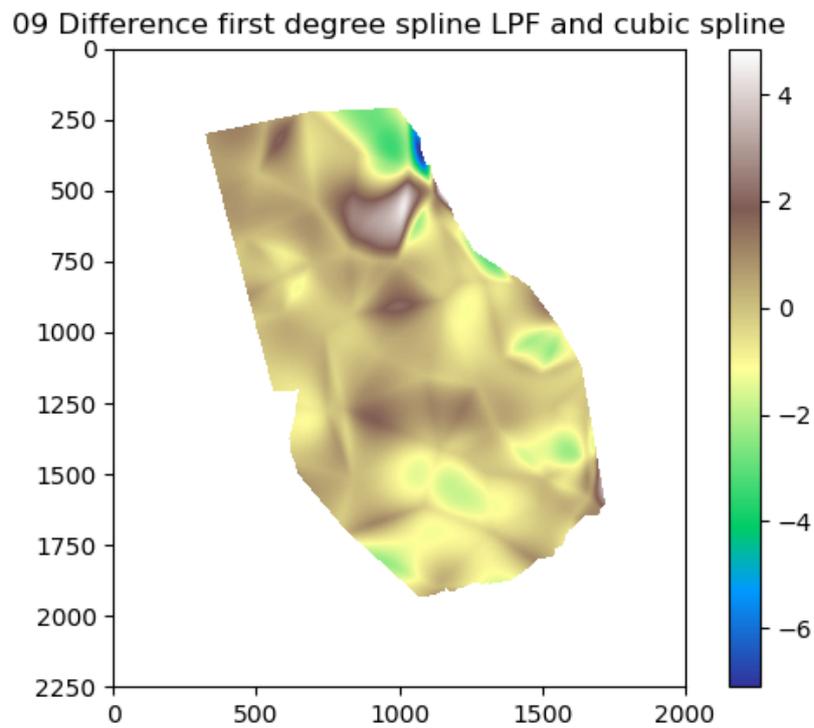


Figura 5.10: Proceso de Python 9

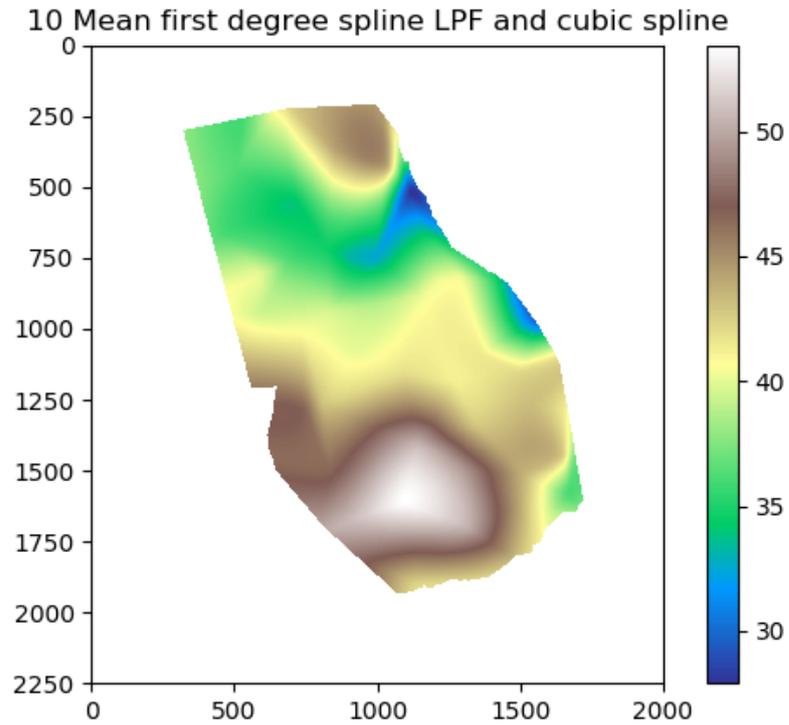


Figura 5.11: Proceso de Python 10

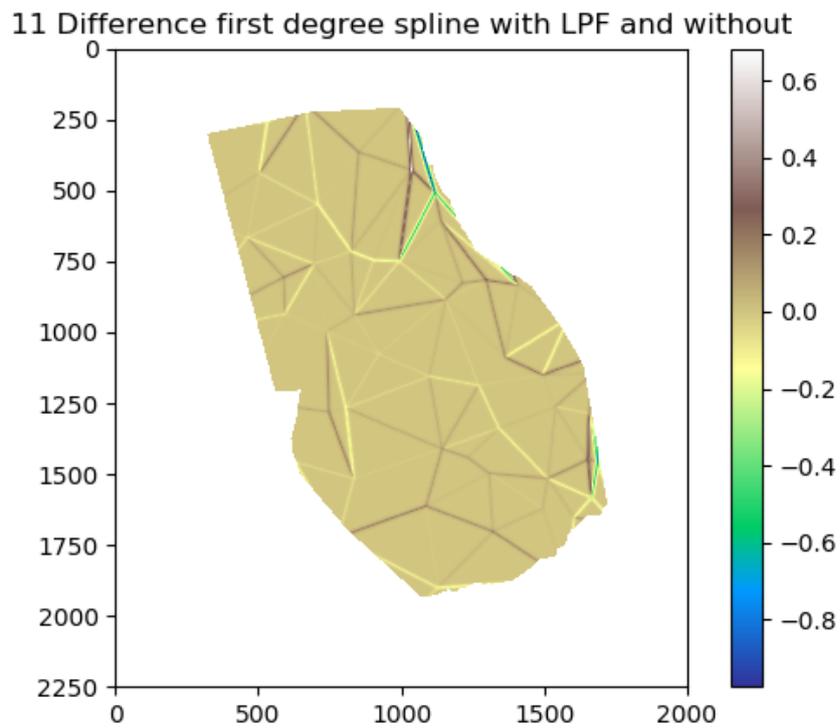


Figura 5.12: Proceso de Python 11

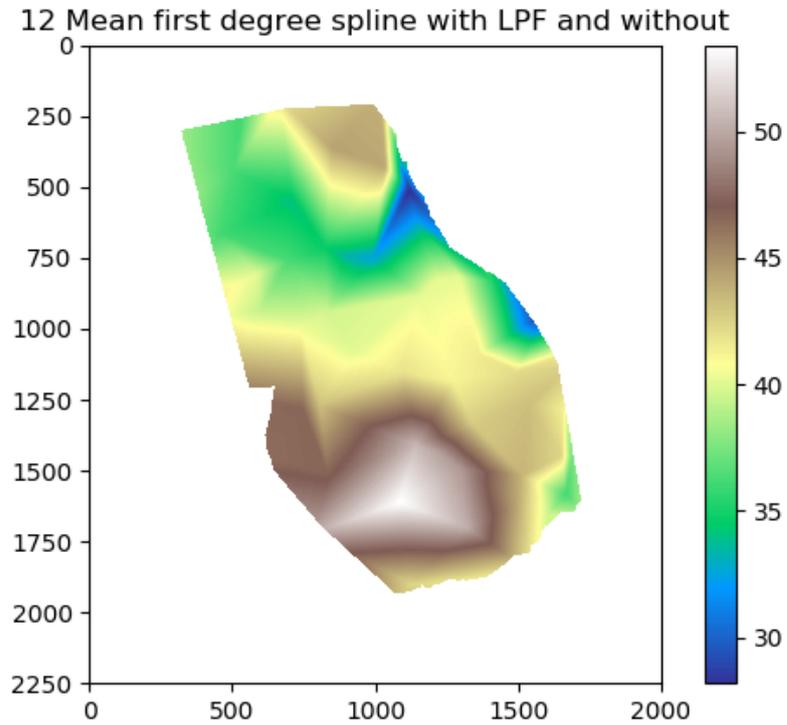


Figura 5.13: Proceso de Python 12

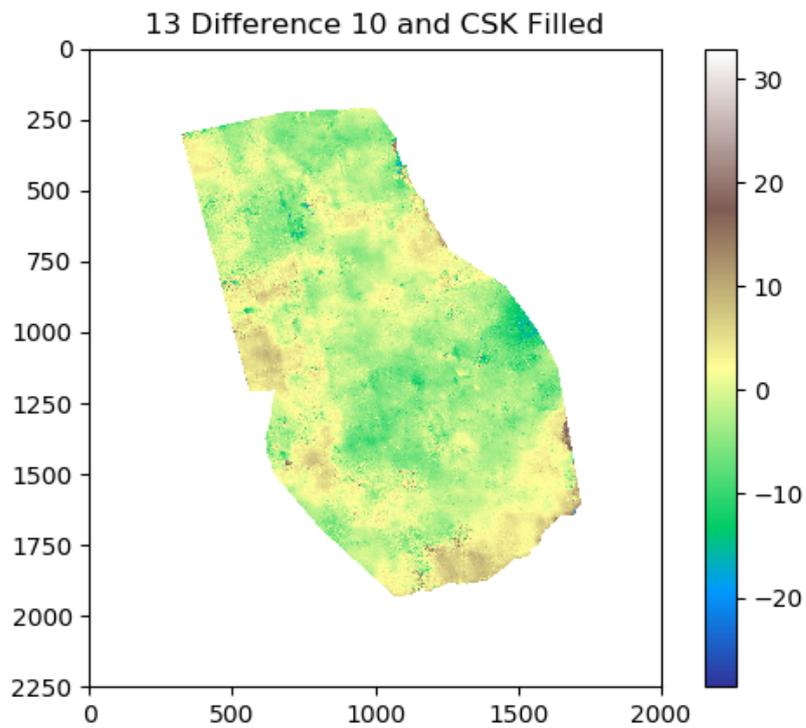


Figura 5.14: Proceso de Python 13

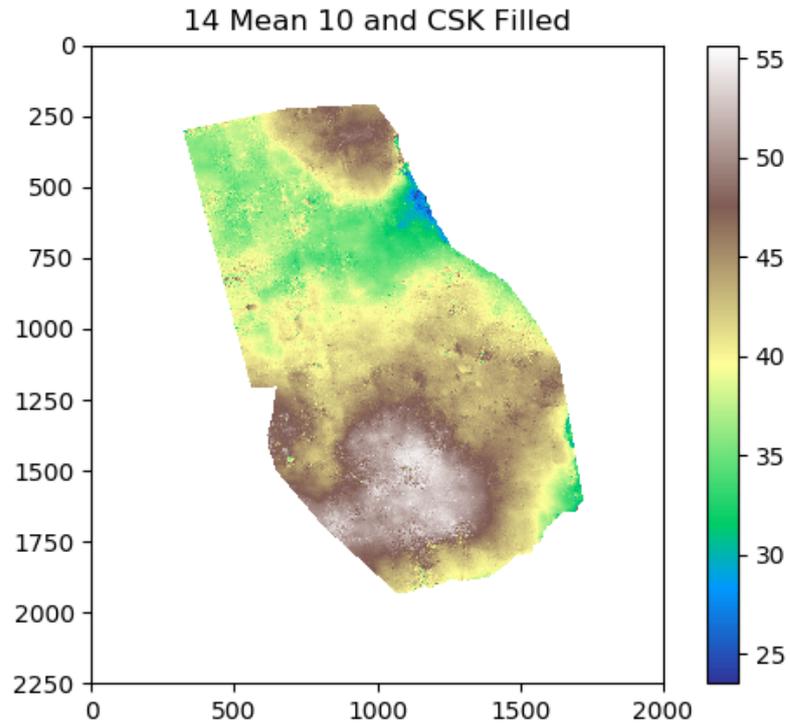


Figura 5.15: Proceso de python 14

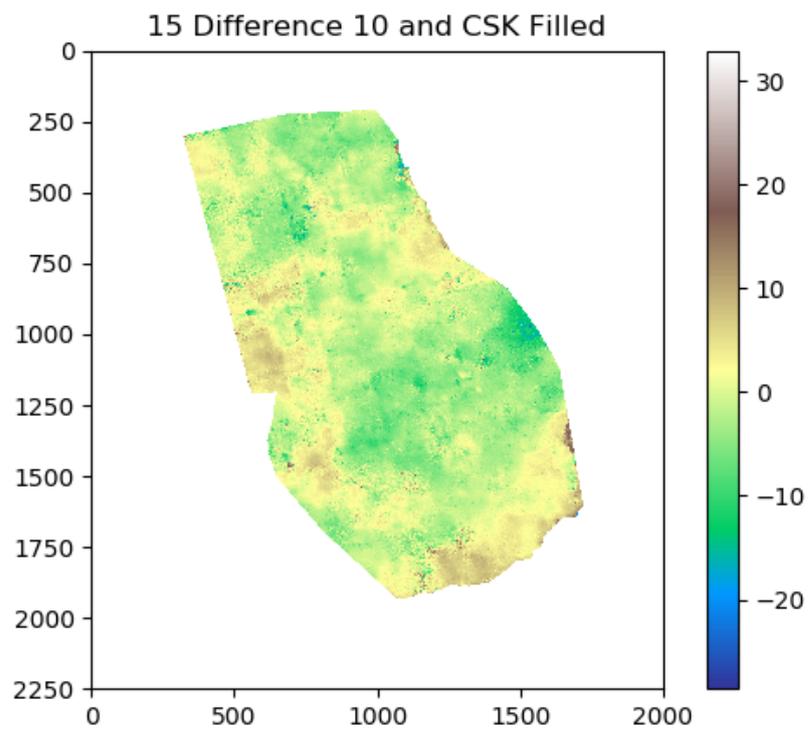


Figura 5.16: Proceso de Python 15

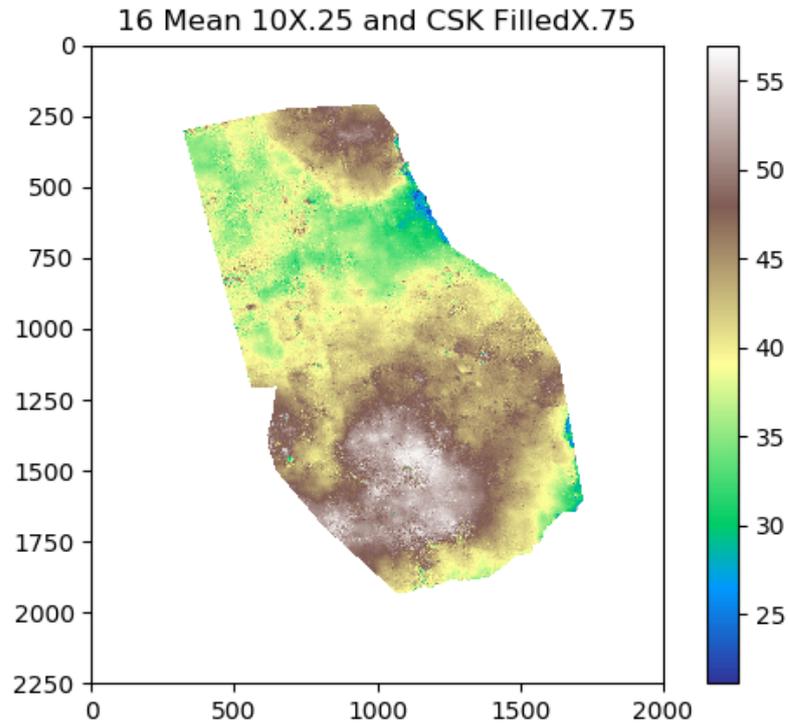


Figura 5.17: Proceso de Python 16

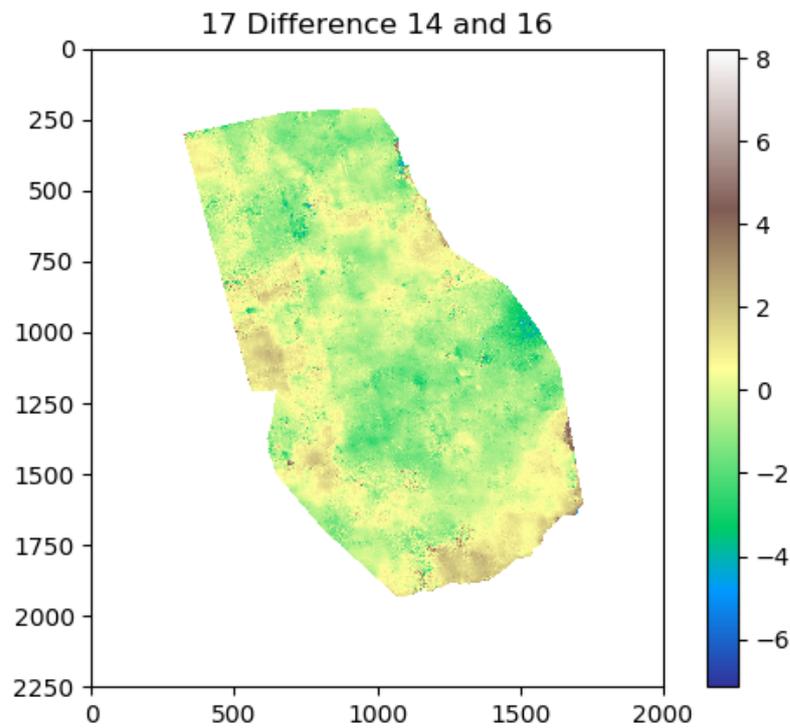


Figura 5.18: Proceso de Python 17

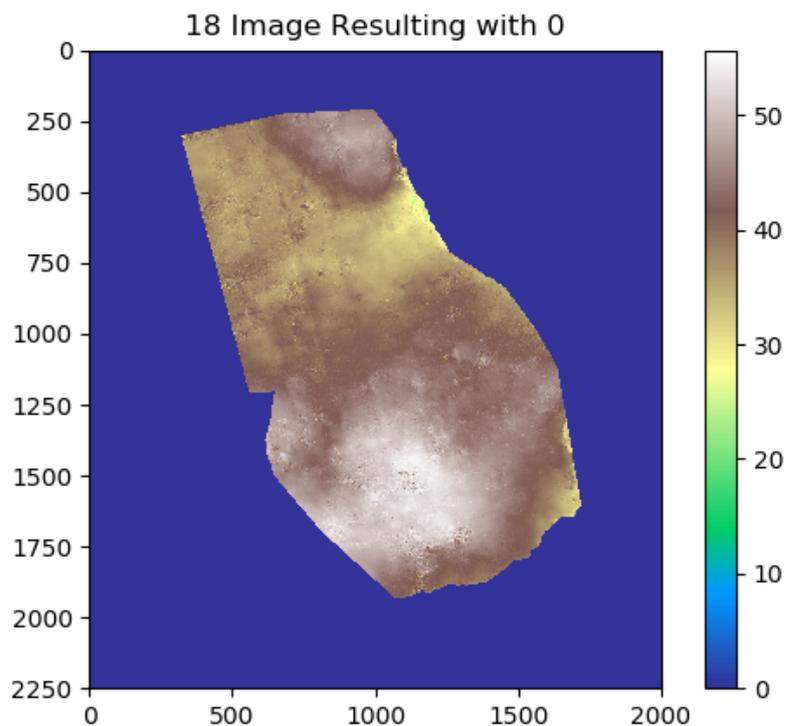


Figura 5.19: Proceso de Python 18

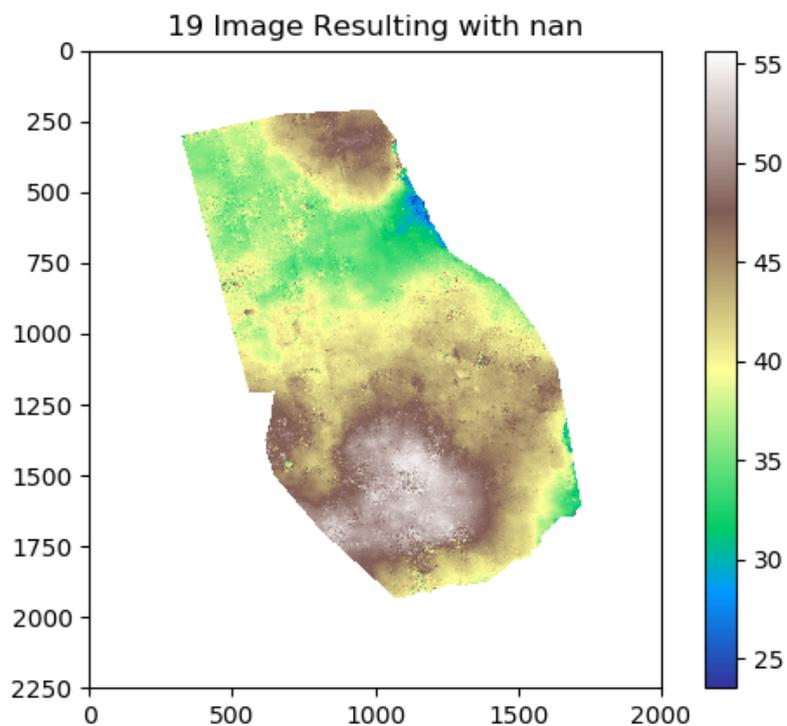


Figura 5.20: Proceso de Python 19

Las Figuras 5.21 y 5.22 son los histogramas resultantes de calcular las diferencias entre el DEM COSMO-SkyMed previo y posterior al proceso de ajuste y validación de la Sección

4.4, es decir, las imágenes de la Figuras 5.1 y 5.20, respectivamente.

5.1.1. Cálculos estadísticos

Los cálculos estadísticos de valores extremos, cuartiles, media y desviación estándar son calculados para el DEM COSMO-SkyMed que ingresa luego del desplazamiento lineal en la coordenada (z). Los resultados de este proceso se pueden visualizar en la Tabla 5.1.

Imagen	Mínimo	1° cuartil	Promedio	3° cuartil	Máximo	Desv. Stand
1	-9,73	-0,73	1,66	4,71	8,09	3,66
2	-11,39	-2,39	0,00	3,04	6,43	3,66
3	-3,19	-0,72	0,85	2,37	6,02	2,19

Tabla 5.1: Resultado del cálculo de errores del 1) DEM original, 2) desplazado en (x,y) y (z) y 3) ajustado

5.2. Histogramas en QGIS

Los histogramas de esta sección son el resultado de aplicar dicho proceso a las diferencias entre en DEM COSMO-SkyMed original y el DEM aerofotogramétrico IGN. La Figura 5.21 hace la diferencia con el DEM COSMO-SkyMed previo al ajuste y la Figura 5.22 lo hace con el posterior al ajuste.

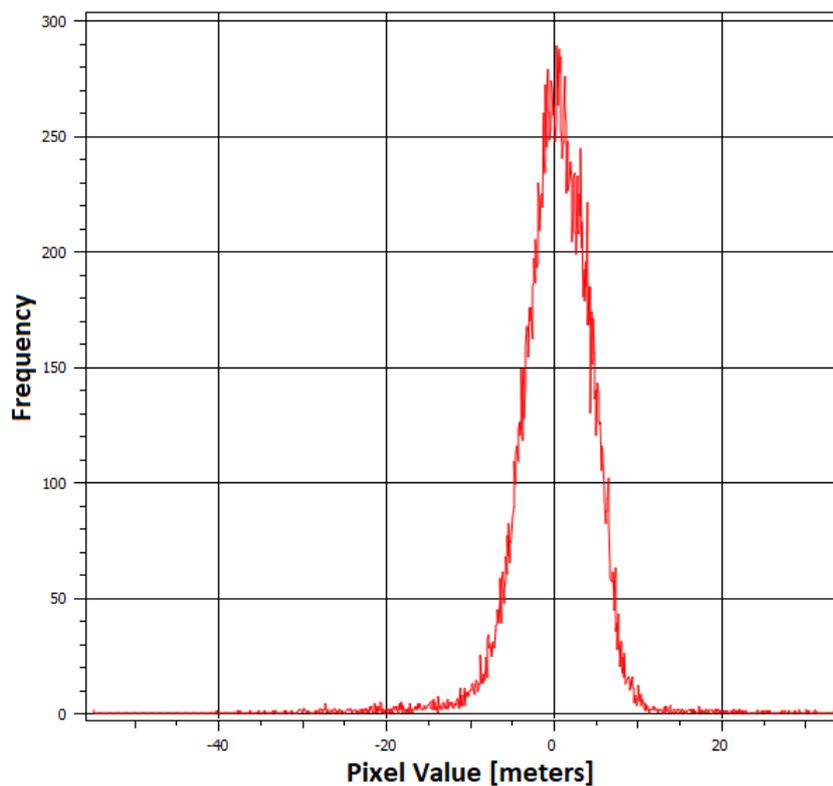


Figura 5.21: Histograma de dif. DEM COSMO-SkyMed original y el DEM aerofotogramétrico IGN

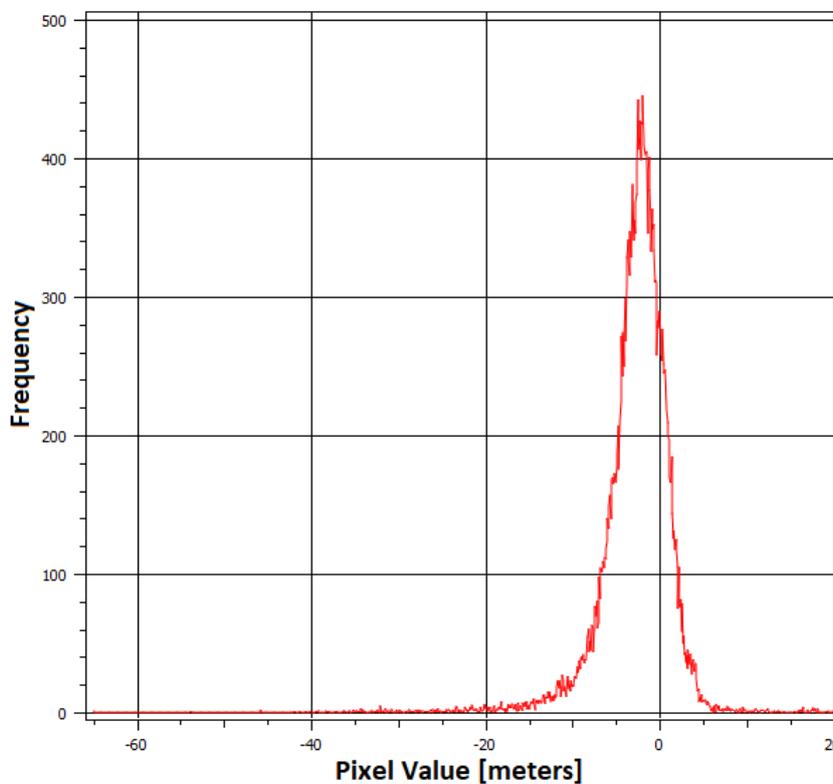


Figura 5.22: Histograma de dif. DEM COSMO-SkyMed ajustado y el DEM aerofotogramétrico IGN

CAPÍTULO 6

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones arribadas a partir de los objetivos inicialmente propuestos, los fundamentos teóricos, las suposiciones y los resultados obtenidos en el trabajo. En algunas ocasiones resulta difícil reconocer donde están los supuestos no asumidos como considerar el marco teórico correcto, errores en los procesos o interpretar los resultados con miradas parciales o muy generales. Se intentará ser lo más preciso y exacto posible para aportar información que sea de interés y utilidad al lector.

6.1. Análisis de resultados

6.1.1. Input/output - GNSS

Los datos de la red ADT son una red geodésica que cuenta con mediciones dobles de cada vector de los triángulos y además fueron ajustados mediante el método de cuadrados mínimos.

Los datos del relevamiento diferencial fueron procesados con la ayuda del Profesor Gustavo Noguera. Tanto para ADT como para PAF, se relevaron 3 puntos como instancia de control con deltas menores a $\pm 0,02$ metros. Se relevaron 3 puntos ADT asumiendo la posibilidad de tener un error en la altura de la antena o un movimiento del suelo debido a los fenómenos de subsidencia y solevamiento mencionados en la Sección 3.3 pero, como se mencionó, los deltas siempre fueron menores a $\pm 0,02$ metros. Estos valores resultan insignificantes a los fines del presente trabajo y por lo tanto se asumen aceptables los datos GNSS.

6.1.2. Input/output - InSAR

El proceso InSAR se hizo con el software gratuito SNAP ESA diseñado específicamente para procesar datos de las misiones Sentinel aunque, en este trabajo, se utilizaron datos COSMO-SkyMed. Los resultados obtenidos se consideran aceptables y prometedores, sin

embargo posiblemente podrían ser optimizados con algún software específico que permita realizar todo el proceso en un mismo software puesto que en el SNAP ESA no está implementado el desenrollado de fase.

6.1.3. El ajuste y la validación

El planteo de ajuste se realizó con una implementación programada en Python que, asumiendo al conjunto de puntos GNSS como suficientes, indican una mejora en el modelo y por lo tanto aceptables. La imagen de la Figura 5.10 indica zonas con diferencias positiva entre -6 metros y $+4$ metros entre las superficies de interpolación lineal por partes LPF y el spline cúbico generadas en la Sección 4.4.2. Asumiendo que algunas de las dos estuviera cercana a la realidad topográfica y la otra totalmente alejada, estaría agregando un error de -3 metros hasta $+2$ metros. Esta situación se produce por ser una zona con cambios de pendiente abruptos y se podría solucionar con densificaciones de puntos GNSS.

Las imágenes de las Figuras 5.21 y 5.22 indican una variación de la media cercana a $0,00$ metros aproximadamente, a un valor cercano a $-2,5$ metros. Esto puede estar indicando un valor demasiado grande en el ajuste en la coordenada (z) o un valor distinto debido a que las superficies de interpolación intentan ser representaciones de valores cercanos al suelo, y los radar en banda **X** como el COSMO-SkyMed interactúan con retrodispersores como construcciones, árboles o vehículos. Además, las mismas imágenes de las Figuras 5.21 y 5.22 indican que la media aumentó de frecuencia y varió de una curva simétrica a una curva asimétrica positiva.

6.2. Sobre los objetivos

Recordando el objetivo general de la Sección 1.1:

Crear una metodología completa para obtener modelos digitales de elevación en áreas urbanas mediante imágenes SAR satelitales y ajustados mediante datos GNSS medidos en campo.

y los objetivos específicos:

1. Generar un DEM mediante InSAR con datos COSMO-SkyMed en la ciudad de Rosario.
2. Georreferenciar un DEM mediante la comparación en los valores de altura respecto a datos GNSS medidos en campo.
3. Ajustar un DEM a partir de superficies generadas mediante datos GNSS medidos en campo.
4. Validar un DEM a partir de la comparación con datos GNSS medidos en campo.
5. Calcular las diferencias entre un DEM InSAR y datos GNSS medidos en campo.

y, en función de lo descrito en el **Análisis de resultados** de la Sección 6.1 se asume cumplidos los objetivos.

Formación y Difusión

Como parte de la maestría se desarrollaron actividades de formación y divulgación relacionadas a la temática de la presente tesis.

7.1. Summer School 2019 - IEEE GRSS IFT-R3S

En julio de 2019 se desarrolló el *3rd Institute of Space Sciences Summer School - 1st IEEE GRSS Instrumentation and Future Technologies Remote Sensing Summer School (IFT-R3S)* en el Institute of Space Sciences de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Belaterra, España. Los ejes temáticos de dicha Summer School fueron SAR, InSAR, reflectometría GNSS y Lidar. Estos ejes revestían particular interés para la presente tesis y por este motivo el maestrando aplicó para participar como oyente con el aval y autorización de sus tutores de la ASI. La Summer School permitió afianzar los conocimientos sobre SAR, InSAR, nuevos usos de los GNSS, programación en Python, idioma inglés, interacción con otros investigadores y líneas de trabajo.

7.2. XII Congreso Nacional de Agrimensura

El mes de octubre del año 2019 reunió a profesionales de la Agrimensura y Afines vinculados a la investigación, gestión pública, docencia y actividad particular, para celebrar el XII Congreso Nacional de Agrimensura en la ciudad de Mendoza, Argentina. El comité organizador, mediante la FADA, invitó al maestrando a realizar una disertación y la publicación de un artículo científico (<http://congreso.agrimensuramza.com/#trabajos>) ambos relacionados a la presente tesis.

CAPÍTULO 8

Trabajos Futuros

Sobre los input

En relación a los datos de entrada se podría aumentar la cantidad de datos GNSS de campo considerando en la distribución de puntos a los cambios de pendiente del terreno, procesar imágenes COSMO-SkyMed en modo Spotlight y procesar imágenes SAOCOM en modo StripMap.

Sobre el ajuste

Otras opciones interesantes a ser consideradas serían aplicar cuadrados mínimos, kriging u otros en el ajuste.

Sobre los softwares

Las licencias de software son muy caras y por lo tanto se podría programar la implementación de la metodología completa en un mismo lenguaje como Python para seguir la línea de trabajo. Además, se podría programar una interfaz gráfica con botoneras, ayudas y sugerencias que sean amigables para el usuario.

Sobre el análisis de errores

Sólo se aplicó el momento de primer y segundo orden que son la media y la desviación estándar, pero podrían aplicarse los momentos de orden tres y cuatro que serían la simetría y la curtosis.

Sobre nuevas implementaciones

Python cuenta con librerías y funciones de inteligencia artificial que se podrían aplicar para optimizar sobre todo las áreas donde las superficies de ajuste se distancian entre sí y definir cuáles serían las mejores superficies de ajuste.

Referencias bibliográficas

- [1] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, *et al.*, “The shuttle radar topography mission,” *Reviews of geophysics*, vol. 45, no. 2, 2007.
- [2] W. Koppe, L. Henrichs, and P. Hummel, “Assessment of worlddemtm global elevation model using different references,” in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 5296–5299, July 2015.
- [3] P. Euillades and M. Vénere, “Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros,” *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 19, no. 1, pp. 33–44, 2003.
- [4] E. Huerta, A. Mangiaterra, and G. Noguera, *GPS: posicionamiento satelital*. Rosario, Santa Fe, Argentina: UNR Editora, first ed., 2005.
- [5] A. A. Stahlschmidt, “Disposición marco posgar07,” tech. rep., Boletín Oficial Argentina, 2009.
- [6] G. Acosta, G. Dannenberg, and G. Tanabe, *Red Geodesica para la Ciudad de Rosario*. 2011.
- [7] R. F. Hanssen, *Radar interferometry*. Springer Science & Business Media, dec 2001.
- [8] I. Baran, M. Stewart, B. Kampes, Z. Perski, and P. Lilly, “A modification to the goldstein radar interferogram filter,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 1–5, 10 2003.
- [9] C. Fiorentino and M. Virelli, *COSMO-SkyMed Mission and Products Description*. Italian Space Agency, 2016.
- [10] I. S. Agency, *COSMO SkyMed SAR Products Handbook*. Agenzia Spaziale Italiana, 2007.
- [11] K. Xu, Q. Tian, Y. Yang, Y. Jibo, and S. Tang, “How up-scaling of remote-sensing images affects land-cover classification by comparison with multiscale satellite images,” *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1–27, 10 2018.

- [12] E. W. Cheney and D. R. Kincaid, *Numerical Mathematics and Computing*. USA: Brooks/Cole Publishing Co., 6th ed., 2007.
- [13] C. B. Barber, D. P. Dobkin, and H. Huhdanpaa, “The quickhull algorithm for convex hulls,” *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 22, no. 4, pp. 469–483, 1996.
- [14] G. E. Fasshauer, *Meshfree approximation methods with MATLAB*, vol. 6. World Scientific, 2007.
- [15] IGN, “Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina MDE-Ar,” 2014.
- [16] G. Van Rossum and F. L. Drake Jr, *Python tutorial*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands, 1995.
- [17] T. Oliphant, “NumPy: A guide to NumPy.” USA: Trelgol Publishing, 2006–. [Online; accessed <today>].
- [18] E. Jones, T. Oliphant, P. Peterson, *et al.*, “SciPy: Open source scientific tools for Python,” 2001–. [Online; accessed <today>].
- [19] GDAL/OGR, “GDAL/OGR geospatial data abstraction software library,” 2019.
- [20] J. D. Hunter, “Matplotlib: A 2d graphics environment,” *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007.