



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Escuela Politécnica Superior de Jaén*  
*Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica*

Trabajo Fin de Grado

# **ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA**

**Alumno: Miguel Parrilla Orellana**

Tutor: Prof. D. Antonio José Gil Cruz  
Prof. Dña. María Jesús Borque Arancón

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y  
Fotogrametría

**Diciembre, 2020**



Universidad de Jaén  
Escuela Politécnica Superior de Jaén  
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría

Don Antonio José Gil Cruz y Dña María Jesús Borque Arancón, tutores del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estimación del campo de velocidad en el sector occidental de la Cordillera Bética, que presenta Miguel Parrilla Orellana, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Diciembre de 2020

El alumno:

Miguel Parrilla Orellana.

Los tutores:

Prof. Antonio José Gil  
Cruz.

Prof. María Jesús Borque  
Arancón.



|        |                                                                 |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | ANTECEDENTES .....                                              | 6  |
| 1.1.   | Introducción .....                                              | 6  |
| 1.2.   | Contenido.....                                                  | 6  |
| 1.3.   | Objetivos .....                                                 | 7  |
| 2.     | DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.....                                     | 9  |
| 2.1.   | Geografía de la zona.....                                       | 10 |
| 2.1.1. | Geografía de la zona occidental de las Cordilleras Béticas..... | 10 |
| 2.2.   | Geología de la zona .....                                       | 11 |
| 2.2.1. | Zonas Externas .....                                            | 13 |
| 2.2.2. | Zonas Internas.....                                             | 14 |
| 2.3.   | Contexto geodinámico .....                                      | 15 |
| 3.     | RED DE CONTROL.....                                             | 19 |
| 3.1.   | Descripción.....                                                | 19 |
| 3.2.   | Diseño.....                                                     | 21 |
| 3.2.1. | Estación ALJI.....                                              | 22 |
| 3.2.2. | Estación CAST.....                                              | 23 |
| 3.2.3. | Estación LIJA.....                                              | 23 |
| 3.2.4. | Estación LOJA .....                                             | 24 |
| 3.2.5. | Estación RUBI .....                                             | 24 |
| 4.     | METODOLOGÍA.....                                                | 25 |
| 4.1.   | El sistema GPS .....                                            | 25 |
| 4.1.1. | Segmento espacial .....                                         | 26 |
| 4.1.2. | Segmento de Control .....                                       | 27 |
| 4.1.3. | Segmento de Usuario.....                                        | 28 |
| 4.2.   | Método PPP.....                                                 | 29 |
| 5.     | SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA.....                            | 30 |
| 5.1.   | Marcos de referencia ITRF .....                                 | 31 |
| 5.1.1. | ITRF2008 .....                                                  | 32 |
| 5.1.2. | ITRF2014 .....                                                  | 33 |
| 5.2.   | Marcos de referencia ETRF .....                                 | 34 |
| 5.2.1. | ETRF2014 .....                                                  | 35 |
| 6.     | PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS .....                             | 35 |
| 6.1.   | Procesado PPP Online .....                                      | 36 |
| 6.1.1. | APPS (Automatic Precise Positioning Service) .....              | 37 |
| 6.1.2. | Creación de ficheros con series temporales .....                | 38 |
| 6.1.3. | Construcción de las matrices varianza-covarianza .....          | 40 |
| 6.2.   | Transformación al Sistema Geodésico Local.....                  | 40 |

|                     |                                                                    |    |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.1.              | Cálculo de coordenadas ENU .....                                   | 42 |
| 6.2.2.              | Matrices varianza-covarianza asociadas a las coordenadas ENU ..... | 44 |
| 6.3.                | Análisis de series temporales (SARI) .....                         | 45 |
| 6.3.1.              | Detección de cambios de antena.....                                | 46 |
| 6.3.2.              | Estimación de velocidades absolutas .....                          | 47 |
| 6.3.3.              | Obtención de velocidades residuales .....                          | 54 |
| 6.4.                | Comparativa con los resultados de CGPS.....                        | 55 |
| 6.4.1.              | Procesado y análisis del ROA .....                                 | 55 |
| 6.4.2.              | Diferencias obtenidas .....                                        | 56 |
| 6.5.                | Interpretación de los resultados obtenidos .....                   | 59 |
| 6.5.1.              | Mapa de velocidades absolutas (ITRF2014) .....                     | 59 |
| 6.5.2.              | Mapa de velocidades residuales (ETRF2014).....                     | 59 |
| 6.5.3.              | Mapa de velocidades absolutas (ITRF2008) .....                     | 59 |
| 7.                  | DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....                       | 63 |
| 8.                  | PRESUPUESTO .....                                                  | 65 |
| 8.1.                | Justificación de precios .....                                     | 66 |
| 8.1.1.              | Honorarios por la realización del trabajo de gabinete .....        | 66 |
| 8.1.2.              | Gastos en licencias del software.....                              | 66 |
| 8.1.3.              | Gastos en hardware.....                                            | 66 |
| 8.2.                | Presupuesto de Ejecución Material .....                            | 67 |
| 8.2.1.              | Capítulo 1.....                                                    | 67 |
| 8.2.2.              | Capítulo 2.....                                                    | 67 |
| 8.3.                | Presupuesto Total .....                                            | 68 |
| 9.                  | REFERENCIAS .....                                                  | 68 |
| ANEXO I:            | Arreglos con programación MATLAB .....                             | 71 |
| Z_Programa0.m       | .....                                                              | 71 |
| Z_Programa1.m       | .....                                                              | 74 |
| Z_Programa2.m       | .....                                                              | 78 |
| Z_Programa3.m       | .....                                                              | 82 |
| Z_Programa4.m       | .....                                                              | 85 |
| ANEXO II:           | Tablas de coordenadas .....                                        | 89 |
| Estación ALJI       | .....                                                              | 89 |
| Estación CAST.....  | .....                                                              | 91 |
| Estación LIJA ..... | .....                                                              | 92 |
| Estación LOJA.....  | .....                                                              | 94 |
| Estación RUBI.....  | .....                                                              | 96 |

## **1. ANTECEDENTES**

### **1.1. Introducción**

Este proyecto nace con la intención de dar continuidad y profundizar en estudios que hayan sido realizados en una zona geográfica que se considera tectónicamente activa, tratándose pues, de la parte occidental de las Cordilleras Béticas. Nos apoyaremos en conocimientos geodésicos para resolver problemas tales como la determinación de la deformación a lo largo de un rango temporal de una manera cuantitativa.

Supone una primera toma de contacto con un análisis de series temporales de coordenadas. Éstas pertenecen a estaciones GPS permanentes de una subred, que, aunque lejos de ser un trabajo con grandes volúmenes de datos, nos ha permitido obtener una buena discusión de resultados con conclusiones coherentes en lo que respecta a trabajos anteriores.

### **1.2. Contenido**

Con este Trabajo de Fin de Grado, hemos efectuado un análisis del procesado de series temporales con coordenadas de estaciones geodésicas permanentes. Este método de control de deformaciones, se basa en la observación de redes geodésicas en diferentes épocas de tiempo. A causa de la situación sanitaria y las medidas institucionales impuestas con motivo del Covid-19, no ha sido posible realizar ninguna observación y todas las series temporales nos han sido dadas desde el principio. Los períodos de observación han abarcado desde el 2009 hasta el 2018, y se han utilizado datos de hasta cinco estaciones.

Dados los ficheros de observación, hemos procesado de manera independiente cada uno usando la técnica PPP (Precise Point Positioning). A través del servicio de procesamiento PPP en línea de GIPSY-OASIS de JPL (Jet Propulsion Laboratory): “APPS (Automatic Precise Positioning Service)” hemos generado ficheros de coordenadas ITRF2014 con la época de observación, las precisiones asociadas, y la correlación entre las diferentes componentes de coordenadas.

Finalizado el procesado, se han incorporado algunos arreglos en los archivos mediante el software Matlab. Comenzamos introduciendo el primer programa ('Z\_Programa1.m'), en el cual se exporta un fichero por estación, que contiene coordenadas ITRF2014 en cada época de observación; realizaremos la transformación para conocer sus coordenadas geodésicas locales ('Z\_Programa2.m'), y así establecer el origen del sistema en uno de los puntos de nuestra serie. Éstas se almacenarán de igual manera que las anteriores, en varios archivos con series temporales correspondientes a cada una de las estaciones. A partir de ellas, podemos obtener las velocidades absolutas mediante un programa de análisis de series temporales de posicionamiento GNSS interactivo. En nuestro caso, hemos trabajado con SARI (Santamaría-Gómez, 2019).

A partir de los resultados anteriores y aplicando una transformación teniendo en cuenta el movimiento de la Placa Euroasiática ('Z\_Programa3.m'), vamos a facilitar también los resultados en el Marco de Referencia Terrestre Europeo (ETRF2014). Nuestros resultados finales serán las velocidades absolutas (obtenidas a partir de series temporales de coordenadas ITRF2014) y velocidades residuales (aplicando la transformación al ETRF2014).

Para realizar una comparativa con nuestros resultados, se nos ofrecerán los obtenidos por el ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada) mediante CGPS. Se calcularán las diferencias entre éstos y los nuestros y se obtendrán unas conclusiones. Para este proceso será necesaria la transformación al marco de referencia ITRF2008 ('Z\_Programa4.m'), debido a que las soluciones del ROA vendrán expresadas de esta manera.

Para finalizar el trabajo, y apoyándonos en representaciones gráficas de nuestros resultados finales, determinaremos un modelo de deformación de los posibles movimientos de la corteza en esa zona y obtendremos nuestras propias conclusiones acerca de los movimientos de las estructuras geológicas pertenecientes al sector occidental de las Cordilleras Béticas.

### **1.3. Objetivos**

Puesto que lo que perseguimos no es solo la aportación de información sobre la deformación a nivel local/regional en la Cordillera Bética, sino que también se

genere una relación respecto al Macizo Ibérico o a la Depresión del Guadalquivir, se propone trabajar con una red de estaciones GPS permanentes, cubriendo los emplazamientos más estratégicos correctamente distribuidos, y generando ficheros de observación de 24 horas.

Podemos fijar como objetivo general de este proyecto de ingeniería el análisis de la variación temporal de coordenadas a partir de los ficheros de observación de 24 horas mencionados anteriormente. A través de mediciones GPS en diferentes épocas de tiempo, podremos interpretar los distintos comportamientos geológicos y deformaciones producidas. Para ello, se han realizado observaciones desde 2009 hasta 2018 y se ha observado desde cinco estaciones GPS permanentes, pertenecientes todas ellas a la Red GPS instalada para el proyecto Topo-Iberia (a saber: ALJI, CAST, LIJA, LOJA, y RUBI). A partir de estas observaciones, se crearán unas series temporales de coordenadas, de las cuales se extraerá la información deseada. Estas estaciones están situadas en unas zonas de características geológicas importantes, para así determinar cualquier movimiento del terreno que se produzca en el sector seleccionado de la Cordillera Bética.

Fijado ya el objetivo general, podemos extraer otros objetivos particulares que giran en torno a él y que son necesarios para completar e impulsar la calidad de nuestro estudio. Estos son:

- La perfecta aplicación y conocimiento del PPP (Precise Point Positioning), conociendo tanto el significado y las utilidades de la técnica, como la aplicabilidad y la interfaz del programa utilizado en este proyecto (inputs y outputs que debemos tener en cuenta para que el procesado sea correcto).
- La detección de offset de antena, la consecución de un archivo de coordenadas por cada una de las estaciones, la transformación a un sistema geodésico local, la determinación de velocidades residuales a partir de velocidades absolutas, y la transformación entre marcos de referencia. Estas tareas se resolverán ayudándonos de varias implementaciones en el lenguaje de programación Matlab. Así pues, se crearán hasta cinco programas que resolverán estos objetivos. Todos ellos, vendrán desarrollados en el Anexo I de este proyecto.

- El análisis de series temporales de coordenadas, llevado a cabo en este proyecto mediante el software SARI. Con él podremos obtener velocidades absolutas a través de regresión lineal de unos datos de coordenadas, introducidos mediante un documento de texto. Gracias a las funcionalidades ofrecidas por SARI, podremos realizar tareas tales como la introducción de offset de antena para las series temporales de coordenadas, o la exportación de gráficas.
- La obtención visual de un campo de velocidades que nos muestre a modo de mapa, cuáles han sido las deformaciones en las distintas estaciones. Para ello se ha utilizado el software Autocad Map 3D. En él se ha importado capas editadas en QGIS, y se han dibujado los vectores (para las velocidades) y las elipses de error (para las incertidumbres) correspondientes a cada uno de los resultados obtenidos.
- La realización una correcta interpretación para explicar los resultados obtenidos; apoyándonos en los propios resultados, los conocimientos geológicos previos de la zona, la tectónica de placas, etc.

## **2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA**

Aunque prácticamente en la totalidad trabajo el entorno geodésico es el más recurrente, debemos tener claro que otros aspectos como el contexto geológico o el geodinámico darán origen a los cambios que vamos a estudiar. Por ejemplo, nos ayudarán a estudiar y modelizar el comportamiento de la corteza en la zona estudiada, desde la geomorfología.

Las redes geodésicas proporcionan patrones de deformación que muestran la actividad de estructuras geológicas, y eventualmente revelan el patrón de deformación general. Recurriendo a anteriores proyectos (Gárate et al., 2015; González-Castillo et al., 2015), los datos GPS de estaciones de observación continua y de mediciones auxiliares, muestran aproximadamente un desplazamiento NO-ONO en la parte occidental de la Cordillera Bética con respecto al Macizo Ibérico. Además, se ha venido demostrando que la construcción de esta Cordillera Alpina continúa en la actualidad, de acuerdo con la sismicidad vigente dada en el límite entre la placa euroasiática y la africana.

Con estos antecedentes, pueden dirigirse distintas aplicaciones para prevenir y diseñar planes de contingencia para riesgos geológicos o medioambientales. Especialmente aquellas zonas en las que se producen terremotos y considerables deslizamientos del terreno relacionados con el desarrollo actual del relieve y la elevación de los márgenes continentales.

## **2.1. Geografía de la zona**

Las Cordilleras Béticas constituyen la totalidad de los relieves montañosos que se encuentran en el sur de la península ibérica. Éstas se extienden desde el golfo de Cádiz hasta el litoral de Alicante y las islas Baleares y tienen una longitud de unos 620 km, con su máxima altitud en el pico Mulhacén (3478 m). El Valle del Guadalquivir y el Macizo Ibérico actúan como fronteras geográficas, indicando el fin de este sistema montañoso.

La cordillera se divide estructuralmente en dos zonas. Las Zonas Externas se subdividen en los dominios Prebético (que aflora al norte principalmente en la parte oriental), y Subbético (que cabalga sobre el Prebético al este de Jaén). Las Zonas Internas se extienden desde Estepona (Málaga) por el oeste, hasta el cabo de Santa Pola, entre Murcia y Alicante, por el este; ocupando una posición más meridional. Se subdividen en tres dominios (Complejo Maláguide, Complejo Alpujárride y Complejo Nevado Filábride). Estas zonas y divisiones se analizarán con profundidad en el apartado 2.2.

### *2.1.1. Geografía de la zona occidental de las Cordilleras Béticas*

Este trabajo, como se adelanta en el título, se centra en la región más occidental del sistema montañoso, comprendida entre Málaga y la desembocadura del río Guadalquivir; y que por lo tanto configura la parte norte del arco de Gibraltar.

En el tercio sur de la zona afloran dominios de las zonas Internas (Complejo Maláguide y Complejo Alpujárride). El Complejo del Campo de Gibraltar aflora extensamente en la parte de Gibraltar y Barbate, hacia el norte y hacia Málaga. Se sitúa estructuralmente sobre las Zonas Externas y están recubiertos por las Zonas Internas.

El tercio superior está ocupado por las estribaciones occidentales béticas de las Zonas Externas con afloramientos triásicos, jurásicos y cretácicos sin una clara continuidad estricutral que, hacia el norte, están rodeadas por las Unidades de Flysch.

El régimen tectónico de esta parte occidental está localizado en zonas con fallas normales como la cuenca de Ronda, la zona de falla normal de Ubrique y hacia el sur de la provincia de Cádiz. Además de otras fallas activas en este sector de las que normalmente no son tenidas en cuenta debido que su superficie suele ser menor.

## 2.2. Geología de la zona

Cuando hablamos de la geología española (Península Ibérica e Islas Baleares), hablamos de mostrar, a través de varias divisiones geológicas, el reflejo de la huella geológica que se ha formado a lo largo del tiempo. En la Figura 1 se muestra el nombre y la extensión de cada una de ellas. Mediante este mapa geológico, podemos situar las Cordilleras Béticas y su relación con las demás sistemas montañosos:

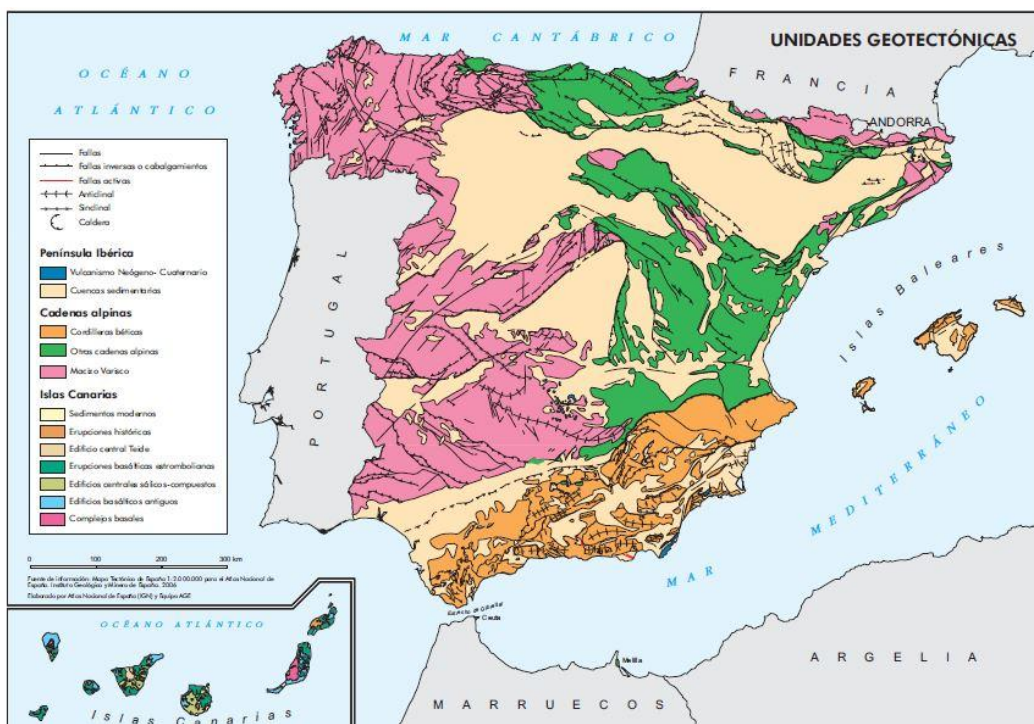


Figura 1. Mapa de las principales unidades geotectónicas de España. Imagen obtenida de [https://www.ign.es/espmmap/mapas\\_relieve\\_bach/Relieve\\_Mapa\\_03.htm](https://www.ign.es/espmmap/mapas_relieve_bach/Relieve_Mapa_03.htm).

Las Cordilleras Béticas constituyen la gran unidad estructural que ocupa el sur de España, se extiende hasta Baleares, y cruza el estrecho de Gibraltar para tener continuidad en el norte de África. Se identifica como una cordillera formada por plegamiento, durante la orogenia alpina, de un geosinclinal que tenía gran continuidad hasta el este, ya que se unía con las cordilleras alpinas europeas y asiáticas (Vera Torres et al., 1983).

Dentro de las Cordilleras Béticas se pueden delimitar dos grandes regiones con características muy diferentes, de acuerdo con la edad y naturaleza de los materiales, y del tipo de deformación que lo afecta (Figura 2). Las Zonas Externas están formadas por una cobertera plegada de rocas sedimentarias, mesozoicas y terciarias; el Paleozoico no aflora y constituye el zócalo. En las Zonas Internas, por el contrario, afloran extensamente materiales del Paleozoico, en gran parte metamorfizados; la deformación que afecta al conjunto es de gran intensidad, sin que se delimiten zócalo y cobertera, ya que afecta a la totalidad de los materiales. Además de estas unidades principales, en el sur de la provincia de Cádiz afloran extensamente materiales ligados a mantos de corrimiento de procedencia mediterránea, que constituyen las denominadas unidades del Campo de Gibraltar o unidades Fylsch.

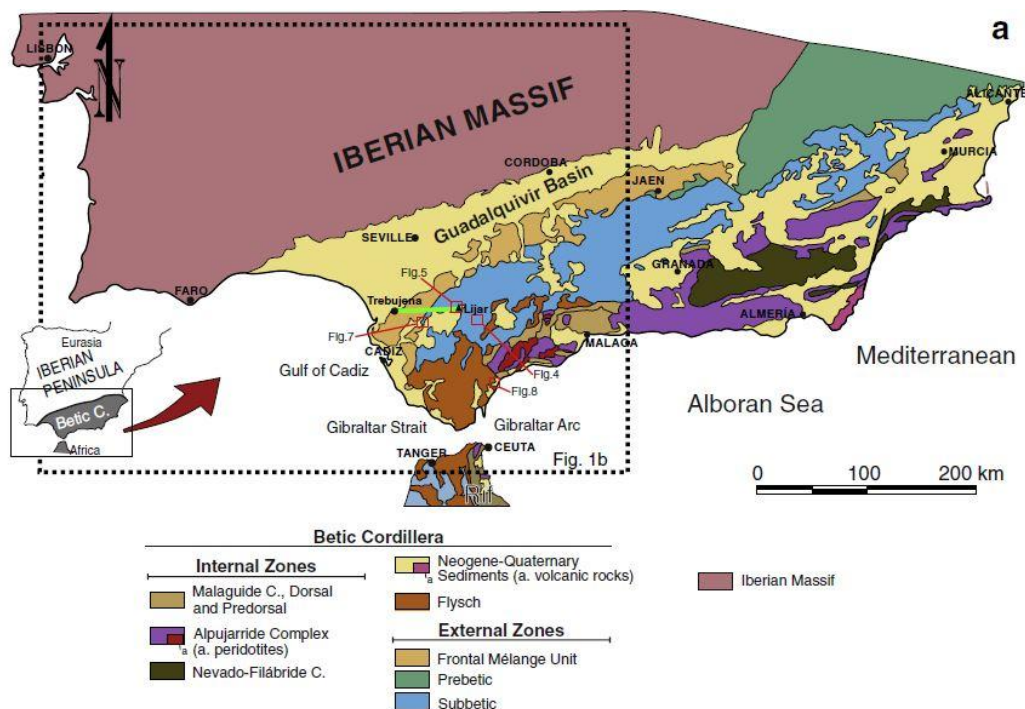


Figura 2. Marco geológico de la Cordillera Bética y sus límites (González-Castillo et al., 2015).

### *2.2.1. Zonas Externas*

Ocupan una gran extensión, y están constituidas por un conjunto potente de rocas sedimentarias, en su mayoría marinas, del Mesozoico y Terciario hasta el Mioceno inferior. Están plegadas con una deformación cobertera, que produce un despegue general en el Triásico con evaporitas. Existen estructuras de manto de corrimiento según las cuales, partes que durante el depósito eran más meridionales cabalgan sobre áreas más septentrionales. El zócalo paleozoico no aflora, y de acuerdo con los datos geofísicos se encuentra a profundidades de cinco a ocho kilómetros, estimándose que debe estar constituido por materiales análogos a los del macizo Ibérico.

Dentro de las zonas externas se pueden delimitar dos grandes unidades según la naturaleza de los materiales y el grado de deformación. La primera, situada al norte, en la zona Prebética que es la que durante el Mesozoico estaba más cerca del continente, constituido por el Macizo Ibérico. Hacia el sur, y hasta el límite de las zonas internas, se extiende la zona Subbética, que estaría localizada durante el depósito más alejada del continente, y en la que tienen lugar manifestaciones volcánicas submarinas durante Mesozoico.

#### **Zona Prebética**

Sus materiales mesozoicos presentan características estratigráficas en parte comunes con los de la Cordillera Ibérica, de manera que el límite entre ambas, al sur de la provincia de Valencia, se establece por criterios estructurales, concretamente la dirección dominante de los ejes de los pliegues. La sedimentación del Mesozoico queda influida grandemente por la proximidad del continente, presentando episodios detríticos frecuentes en el Cretácico Inferior y niveles marinos someros, e incluso costeros. En las partes más próximas al continente se presentan episodios de sedimentación continental, o episodios de interrupción sedimentaria debidos a emersiones. Litológicamente dominan las calizas y dolomías en el Jurásico y en el Cretácico, y los materiales detríticos (areniscas y lutitas) en el Triásico y parte del Cretácico Inferior. La deformación principal es de pliegues y fallas, sin que existan grandes mantos de corrimiento. Los ejes de los pliegues dominantes tienen dirección ENE-OSO. El plegamiento principal tuvo lugar en el Mioceno.

### **Zona Subbética**

Las diferencias con respecto a la anterior, desde el punto de vista estratigráfico, consisten en que los materiales de esta zona son marinos, alejados de costas, eventualmente profundos, con escasos niveles detríticos y con episodios formados mayoritariamente por restos de microorganismos marinos, como los radiolarios y las globigerinas. Las rocas más frecuentes son las calizas y las margas, ricas en fósiles de organismos pelágicos y planctónicos, en las que a veces se intercalan coladas de rocas volcánicas básicas, de erupciones submarinas. Presenta una estructura con mantos de corrimiento que cabalgan hacia el norte y duplican los materiales de la misma edad en una misma vertical. Además de esta estructura de gran envergadura, son frecuentes los pliegues y las fracturas. La dirección dominante de los ejes de los pliegues es, como en la zona Prebética, ENE-OSO. La edad del plegamiento principal es miocena, aunque tuvieron lugar otras etapas de deformación anteriores.

#### *2.2.2. Zonas Internas*

En ellas afloran extensamente los materiales paleozoicos (y, posiblemente, además precámbricos) representados de manera primordial por rocas metamórficas, y de modo más local, por rocas plutónicas ultrabásicas. Sobre los materiales paleozoicos se encuentran materiales del Triásico, y solo en una de las unidades (complejo maláguide) hay términos más modernos. La estructura de las zonas internas es muy compleja y corresponde a la superposición de mantos de corrimiento, que en algunos casos presentan un importante desplazamiento horizontal.

El metamorfismo regional del ciclo alpino afecta a los materiales paleozoicos de manera casi general, y en algunas unidades afecta también al Triásico. De acuerdo con la posición tectónica, la naturaleza de los materiales y el grado de metamorfismo, se han delimitado tres grandes unidades, que corresponden a tres grandes mantos de corrimiento, dentro de los cuales frecuentemente hay duplicaciones tectónicas, o mantos de corrimiento de menor envergadura.

Estas unidades, en orden de superposición desde abajo hacia arriba son las siguientes:

### **Complejo nevado-filábride**

Aflora en el núcleo de Sierra Nevada y en la sierra de Filabres, de donde toma su nombre. Está constituido por rocas metamórficas, entre las que dominan los micaesquistos grafitosos, con intercalaciones de cuarcitas; son frecuentes también las anfibolitas, gneis y mármoles. Está intensamente deformado y presenta esquistosidad generalizada. La estructura interna muestra duplicaciones tectónicas.

### **Complejo alpujárride**

Debe su nombre a que aflora extensamente en la comarca de Las Alpujarras, situada al sur de Sierra Nevada. Comprende términos paleozoicos constituidos por micaesquistos, que hacia la parte alta pasan a filitas que llegan a ser de edad triásica inferior. El resto del Triásico está formado por un conjunto muy potente de calizas y dolomías, depositadas en medio marino somero. En la Serranía de Ronda presentan intrusiones de rocas ultrabásicas (peridotitas). El complejo alpujárride presenta una estructura interna bastante compleja, debido a la existencia de diversas unidades dentro de él, que cabalgan unas sobre otras.

### **Complejo maláguide**

Los materiales más inferiores son pizarras, lutitas y algunos niveles calizos, de edad Paleozoica, poco o nada metamorfizados. Sobre ellos se encuentran unos conglomerados del Permo-Triásico; la serie continúa con materiales mesozoicos y terciarios poco potentes, con niveles calizos y margosos de origen marino.

## **2.3. Contexto geodinámico**

El ámbito geodinámico incluye el orógeno Bético-Rifeño, el prisma de acreción del Golfo De Cádiz, y las cuencas de los mares de Alborán y el Argelino-Balear occidental. Esta zona ha traído cambios desde hace 30 millones de años, regido por un mismo proceso de evolución de la litosfera subcontinental bajo un régimen de convergencia oblicua de las placas.

Trabajos previos (Gárate et al., 2015; González-Castillo et al., 2015), indican que tanto la corteza como el manto litosférico muestran un importante

adelgazamiento en las zonas emergidas (Arco de Gibraltar) y hacia la Cuenca de Alborán, a través de sus márgenes. La estructura actual de la corteza y manto litosférico condicionan enormemente el relieve y la morfología de los márgenes del Mar de Alborán. El Arco de Gibraltar actualmente está formado por dos zonas ligeramente engrosadas y en compresión, situadas en el margen sur de Iberia (Cordillera Bética) y el norte de Marruecos (Cordillera del Rif).

- La parte interior del arco corresponde a una zona adelgazada y en extensión (Cuenca de Alborán) bajo la cual se localiza un manto anómalo.
- La parte exterior del arco se caracteriza por la presencia de sendas cuencas y por un conjunto de elementos estructurales que configuran el prisma de acreción del Golfo de Cádiz.

Durante la época del Mioceno, tuvo lugar un rápido y espectacular desplazamiento de las estructuras en dirección E-O que se superpone al campo regional de esfuerzos de dirección NNO-SSE asociado a la convergencia entre la placa euroasiática y la africana. Esta convergencia se ha ido materializando en forma de terremotos superficiales de mecanismo inverso.

Para explicar esta configuración, se han propuesto diversos tipos de modelos basados, respectivamente, en procesos de subducción, desprendimiento de litosfera, delaminación o eliminación de la raíz cortical por convección del manto. Estos procesos se apoyan en evidencias actuales aportadas por estudios como por ejemplo tomografías sísmicas. Desde la Figura 3 hasta la Figura 7 se muestran cuatro modelos geodinámicos. Algunos de ellos están relacionados con la tectónica de placas, mientras que otros son el resultado de la evolución de la cordillera.

Colapso extensional (Platt & Vissers, 1989): Las fuerzas que causan la extensión y compresión en la zona del Dominio de Alborán en tiempos del Mioceno temprano, se originan a partir de la liberación de energía potencial como consecuencia de la desaparición de una raíz gruesa del manto litosférico que se formó durante la compresión alpina (Figura 3).

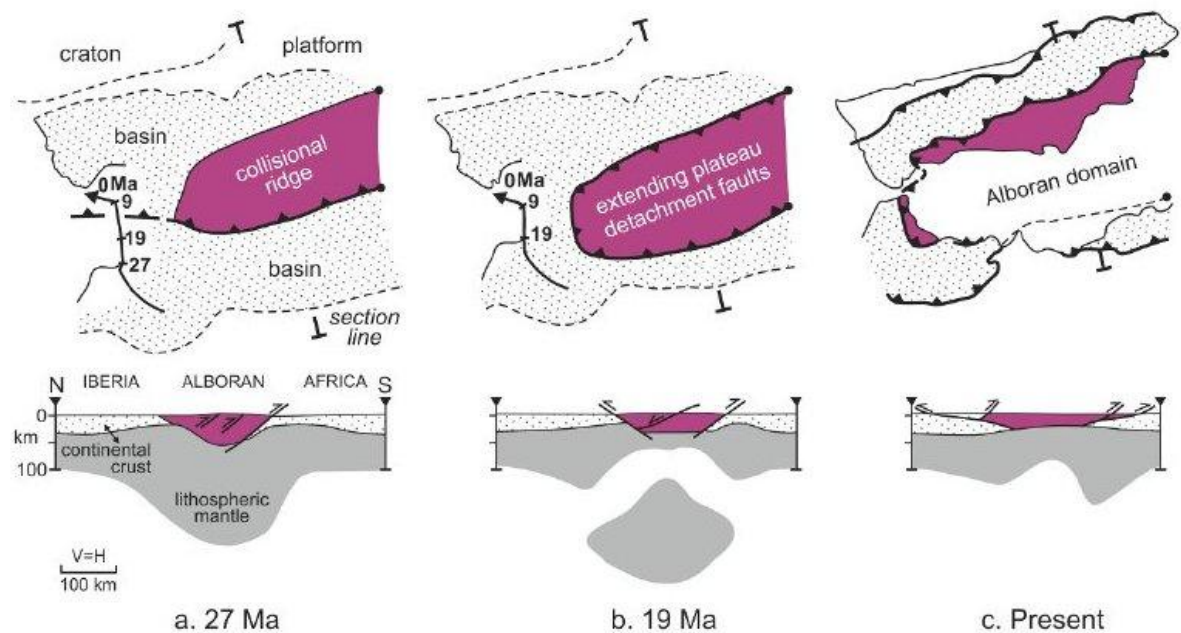


Figura 3. Evolución de la Cordillera Bético-Rifeña según el colapso extensional (Platt & Vissers, 1989).

Delaminación (Seber et al., 1996): Tanto la litosfera de la zona del Rif, como la de la zona Bética pasa por un proceso de delaminación. Esto sucede debido a que la base de la litosfera en ambas regiones no está bien compactada. A medida que la litosfera se desprende de la corteza suprayacente, el material de la astenosfera se eleva y reemplaza a la litosfera, especialmente debajo de las regiones de Alborán y la zona del Rif (Figuras 4 y 5).

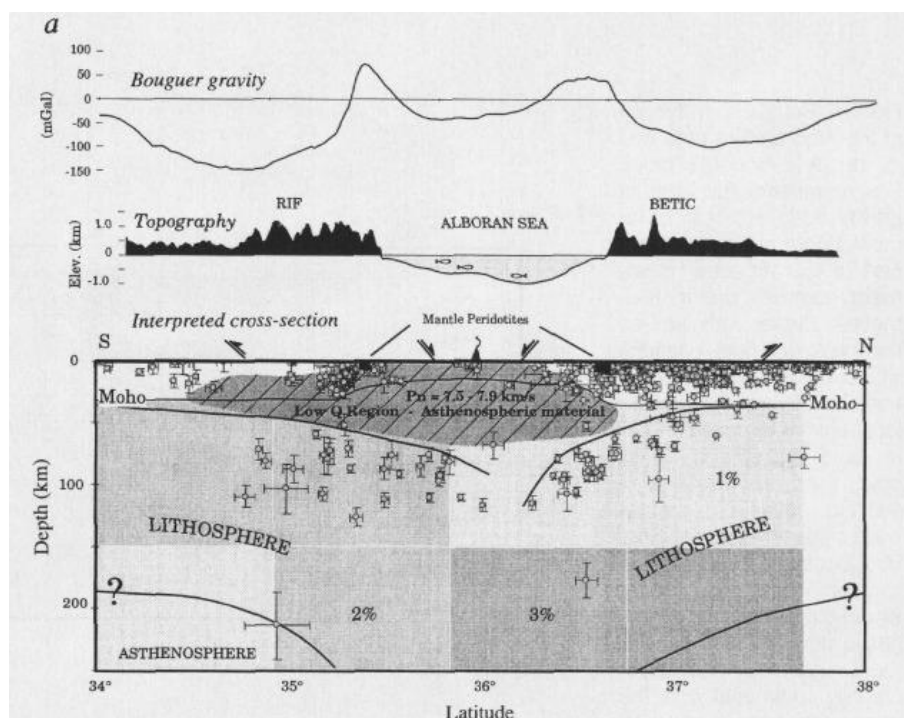


Figura 4. Situación de la litosfera en la Cordillera Bético-Rifeña (Seber et al., 1996)

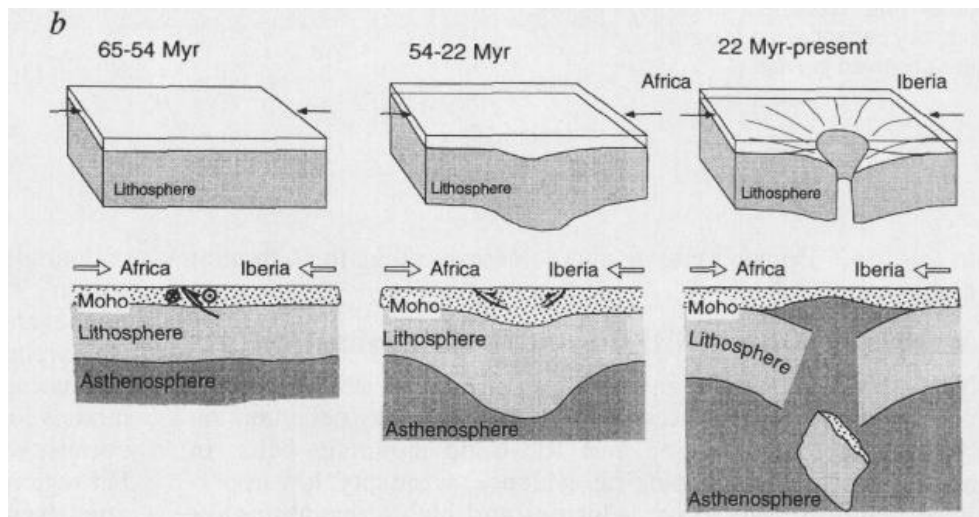


Figura 5. Proceso de delaminación en la Cordillera Bético-Rifeña (Seber et al., 1996).

Subducción con retroceso (Lonergan & White, 1997): La subducción única con inmersión en sentido noroeste, habría provocado un retroceso multidireccional. Este retroceso en sentido oeste entre Iberia y África, habría provocado rotaciones de multidireccionales en la Cordillera Bética y la zona del Rif, y un consecuente movimiento hacia el oeste de las Zonas Internas Bético-Rif (Dominio Alborán). Este movimiento provoca un desgaste, reduciendo el grosor de las zonas Bético-rifeñas. (Figura 6).

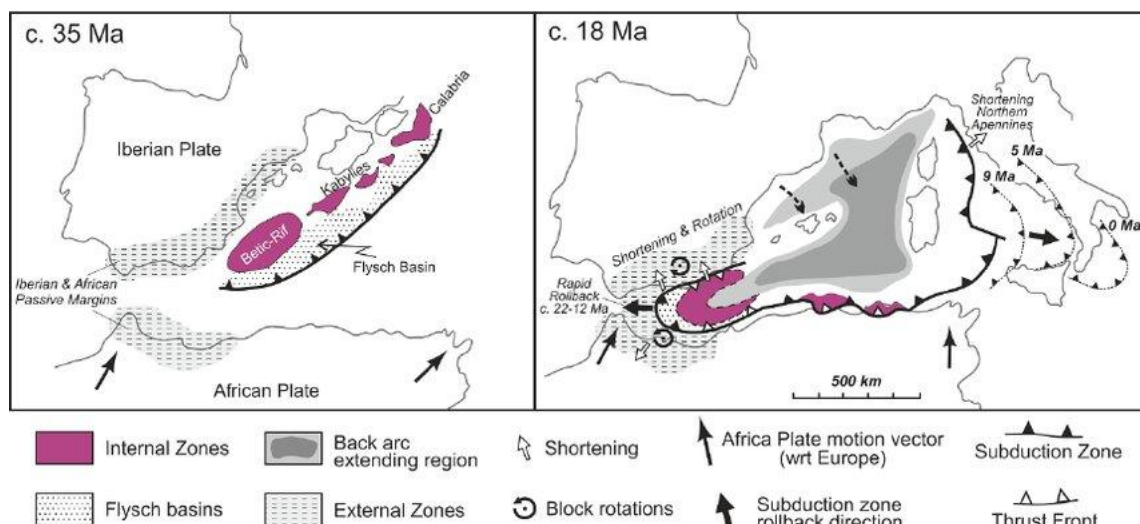


Figura 6. Reconstrucción de la zona central-occidental del Mediterráneo motivada por un proceso de subducción (Lonergan & White, 1997).

Desprendimiento de la litosfera (Morency, 2004): Está causada por el estado térmico y la energía acumulada de dos placas que convergen. Tras esta convección sublitosférica, la litosfera del manto se hunde en el manto convectivo. Con el paso del tiempo, esta parte hundida acabará desprendiéndose (Figura 7).

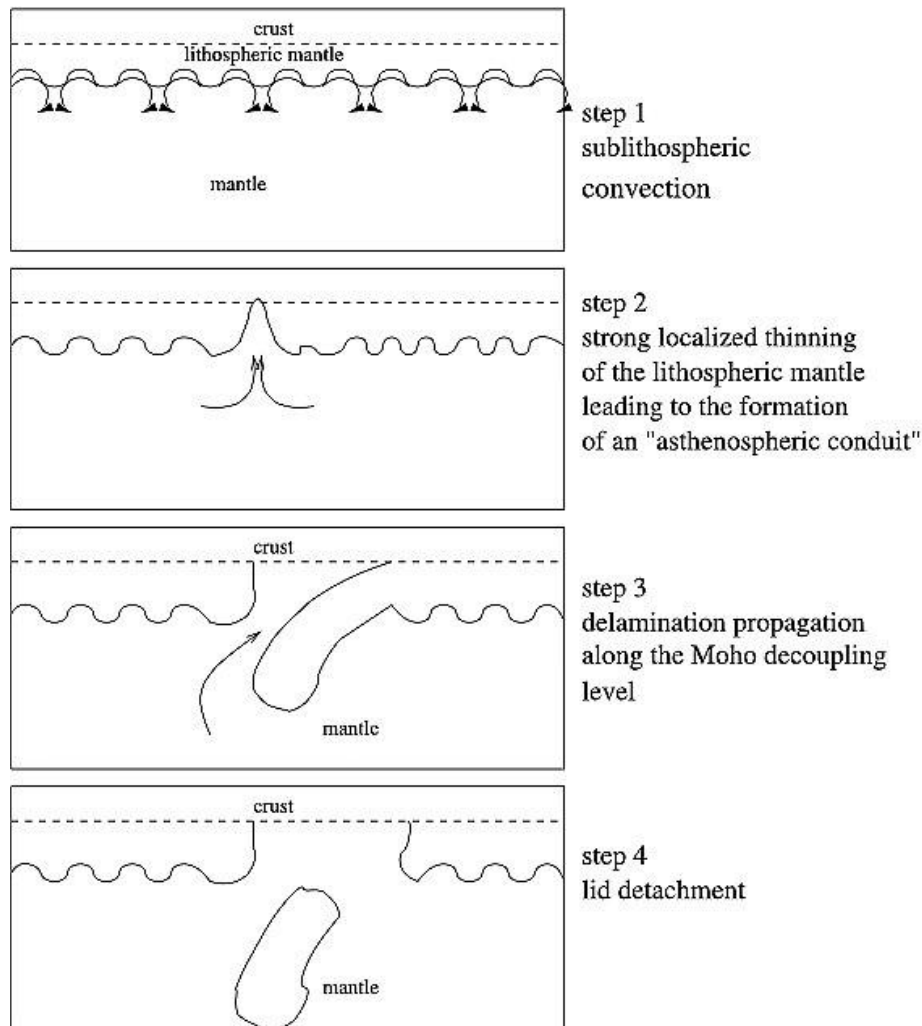


Figura 7. Procedimiento de desprendimiento de litosfera (Morency, 2004).

### 3. RED DE CONTROL

#### 3.1. Descripción

Topo-Iberia consiste en una investigación multidisciplinar sobre la Península Ibérica y sus fronteras continentales (Gárate et al., 2015) . Fue financiada por el Gobierno Español a partir del proyecto de investigación CSD2006-00041 (Geociencias en Iberia: Estudios integrados de topografía y evolución 4D). Se ha estado desarrollando y explotando una nueva base de datos integrada, incluyendo observaciones geológicas, sísmicas, geodésicas y por métodos magnetotelúricos. Así, se crea una visión general de interacciones que abarcan los diversos procesos en las zonas profundas, en las zonas poco profundas, y la superficie terrestre. Entre los procesos que se desarrollan podemos encontrar la tectónica de placas, las mareas terrestres, y la evolución del paisaje. Dentro de la Península, se identifican

tres ámbitos prioritarios de actuación: El Sistema Bético-Rifeño, el Sistema Pirenaico, y la zona de la Meseta.

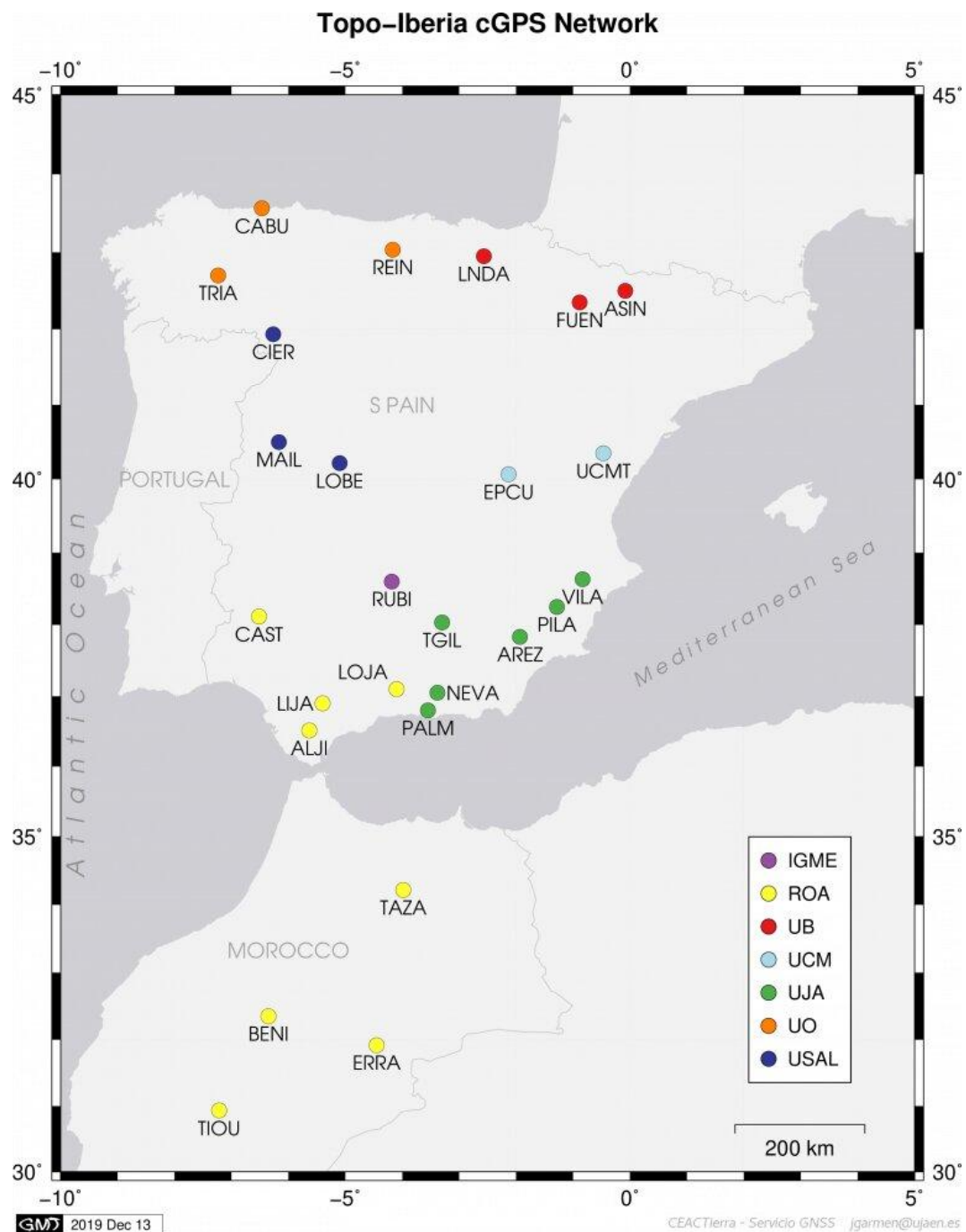


Figura 8. Red de observación geodésica del proyecto Topo-Iberia. Imagen obtenida de la web <https://ceactierra.ujaen.es/gnss-red-topo-iberia-uja/>.

La principal contribución geodésica al proyecto fue la implementación de la red CGPS (Figura 8), colocando una red de observación continua de datos GPS en sitios estratégicos. Para optimizar la configuración de la red, se usaron redes de

estaciones GPS públicas que ya existían en esta región y se colocaron 25 estaciones nuevas correspondientes a este proyecto.

En 2009, la nueva red se encontraba completamente operacional y se han venido realizando observaciones que recopilaban series temporales procesadas, incluyendo información continua desde entonces hasta ahora. Un período de tiempo suficientemente largo para producir resultados estadísticos significantes y para evitar problemas de correlación de parámetros.

Las soluciones de cada estación son alineadas con el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) para construir series temporales que más tarde den lugar a velocidades de los puntos. Para compilar información más completa del comportamiento de la región, los puntos alineados al anterior ITRF, se transforman a un Marco Europeo de Referencia (ETRF), definido por la EPN (EUREF Permanent GNSS Network). La transformación al marco ETRF implica la eliminación del movimiento de la Placa Europea.

### 3.2. Diseño

Las estaciones que hemos usado en nuestro trabajo pertenecen al proyecto Topo-Iberia. Se trata de cinco estaciones que se sitúan en la zona más al Suroeste de la Península Ibérica, y que por tanto pertenecen al sector occidental de la Cordillera Bética. La monumentación de todas ellas se realizó mediante pilares de hormigón. En la Tabla 1 podemos ver las principales características de cada una y en la Figura 9 aparecen representadas en un mapa:

| ID   | #  | Localización                 | Latitud (°) | Longitud (°) | Elevación (m) | Fecha de instalación |
|------|----|------------------------------|-------------|--------------|---------------|----------------------|
| ALJI | 1  | Sierra del Aljibe (Cádiz)    | 36,5299     | -5,6494      | 479           | 01/04/2008           |
| CAST | 6  | Castillo de Segura (Badajoz) | 38,1227     | -6,5321      | 783           | 09/03/2008           |
| LIJA | 11 | Sierra de Lijar (Cádiz)      | 36,9061     | -5,4038      | 1089          | 12/02/2008           |
| LOJA | 14 | Loja (Granada)               | 37,1073     | -4,1064      | 1340          | 15/04/2008           |
| RUBI | 20 | Cabezarrubias (Ciudad Real)  | 38,6094     | -4,1966      | 751           | 06/05/2008           |

Tabla 1. Nombre, coordenadas geodésicas y fecha de instalación de las estaciones usadas en el proyecto.

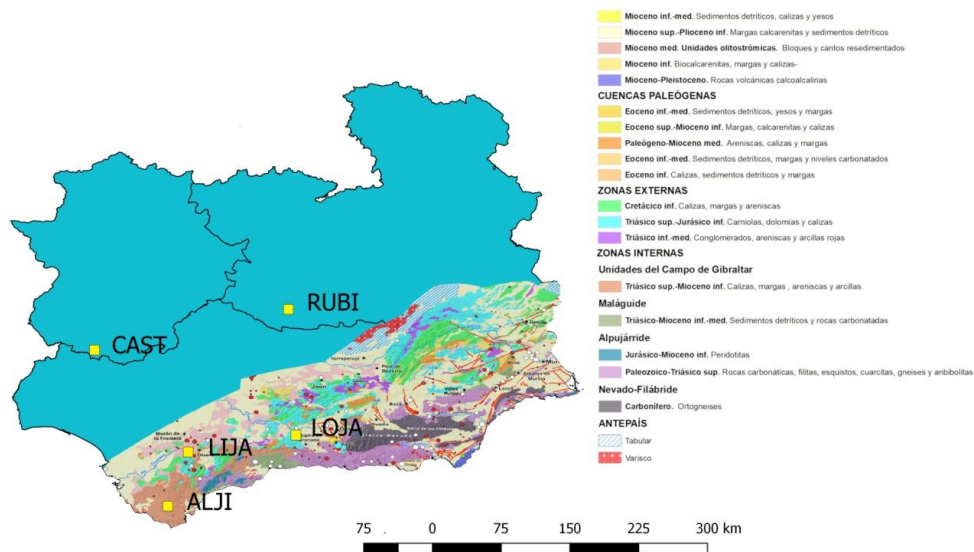


Figura 9. Ubicación de las estaciones que intervienen en este trabajo sobre un mapa geológico modificado a partir del de la web: [https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag\\_sismotectonicas/beticas.html](https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag_sismotectonicas/beticas.html).

Por motivos de seguridad, se ha evitado la inclusión de las reseñas de los vértices en este proyecto. A pesar de ello, se proporcionan descripciones de la zona, a las que se les ha agregado una foto que muestra sus inmediaciones.

### 3.2.1. Estación ALJI

La estación de ALJI está situada en la Sierra de Aljibe (Figura 10), encuadrada en el Parque Natural de Los Alcornocales, al sureste de la provincia de Cádiz. Pertenece a la Cordillera Penibética, y su pico de Aljibe alcanza los 1092m. Cercana a este vértice se encuentra la localidad de Alcalá de los Gazules.



Figura 10. Sierra de Aljibe (Cádiz) vista desde el Puerto de Ojén. Esta imagen ha sido extraída de la siguiente dirección web: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/ventana/albumFotografico.do>

El organismo responsable de esta estación GPS es el ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada).

### 3.2.2. Estación CAST

La estación de CAST está situada en el Castillo de Segura de León (Figura 11). Es un monumento del siglo XV, ubicado en la localidad de Segura de León (Badajoz).



Figura 11. Castillo de Segura de León. Imagen obtenida de <https://www.turismoextremadura.com/es/explora/Castillo-de-Segura-de-Leon>.

El organismo responsable de esta estación GPS es el ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada).

### 3.2.3. Estación LIJA

La estación de LIJA está situada en la Sierra de Lijar (Figura 12). Es de carácter rocoso, erosionado y poco arbolado. Está ubicada al noreste de la provincia de Cádiz, entre la Sierra de Grazalema y la campiña alta de Sevilla. Al sur de la Sierra de Lijar encontramos la localidad de Algodonales, y al norte, una pedanía de esta última, llamada La Muela.



Figura 12. Sierra de Lijar, a lo largo del Sendero Algodonales-Los Nacimientos. La imagen ha sido extraída de la página web: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/ventana/albumFotografico.do>

El organismo responsable de esta estación GPS es el ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada).

#### 3.2.4. Estación LOJA

La estación de LOJA está situada en la Sierra de Loja (Figura 13). Ésta constituye un espacio protegido ubicado al oeste de la provincia de Granada, próxima al límite provincial de Málaga, y forma parte de la Cordillera Subbética. Su topografía tiene el carácter quebrado y accidentado propio del karst. La propia localidad de Loja es probablemente la más cercana a la estación, localizada en la zona norte de la sierra.



Figura 13. Sierra de Loja vista desde el Mirador Polje de Zafarraya. La imagen se ha obtenido directamente de la web: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/servtc5/ventana/albumFotografico.do>

El organismo responsable de esta estación GPS es el ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada).

#### 3.2.5. Estación RUBI

La estación de RUBI está situada cerca de Cabezarrubias del Puerto (Figura 14), un municipio al sur de la provincia de Ciudad Real.



Figura 14. Cabezarrubias del Puerto. Imagen de <https://www.turismociudadreal.com/pueblos/cabezarrubias-del-puerto>

El organismo responsable de esta estación GPS es el IGME (Instituto Geológico y Minero de España).

## **4. METODOLOGÍA**

La utilización del GPS como herramienta de medida de las deformaciones del terreno permite la monitorización de áreas tectónicamente activas, y la detección de movimientos relativos, aún en el caso de que sean de pequeña magnitud (por debajo del cm/año), como suele suceder en la Península Ibérica.

La evaluación de tales movimientos permitirá abordar un objetivo fundamental en este proyecto: Determinar los valores actuales de los vectores de deformación de la corteza y consecuentemente investigar cuáles son las principales fuerzas que producen estas deformaciones. De este modo, con vista a aplicaciones futuras, se podrían identificar las áreas en las que una elevada acumulación de presión suponga un aumento del riesgo sísmico para la población y las infraestructuras civiles.

La detección y cuantificación de los movimientos más difícilmente registrables, requiere de un control lo más riguroso posible tanto de la toma de datos como de su análisis. El método de observación más adecuado en este caso es el despliegue de redes de equipos GPS.

Las desviaciones de la estación pueden separarse de los valores reales de los desplazamientos mediante el análisis de los valores diarios de las series temporales recogidas en los receptores de estaciones permanentes. El análisis de los datos debe efectuarse con un software de alta calidad.

### **4.1. El sistema GPS**

El término de GNSS (Global Navigation Satellite System) es el nombre genérico que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con sistemas de apoyo terrestre (Berné Valero et al., 2014).

Los sistemas de posicionamiento por satélite permiten determinar el tiempo y coordenadas geográficas de un punto con gran exactitud en cualquier parte del

mundo, las 24 horas del día y en todas las situaciones meteorológicas. A nivel general, con aplicaciones en Ciencias de la Tierra, las constelaciones de los satélites se ordenan en tres niveles, de acuerdo a la altura sobre la Tierra (Seeber, 2003):

- Satélites Geoestacionarios (GEO).
- Satélites de Órbita Media (MEO).
- Satélites de Órbita Baja (LEO).

La decisión más importante a la hora de diseñar el sistema GNSS ha sido establecer la altura, porque de acuerdo a ésta se necesita una determinada potencia de señal, una banda de frecuencias, una señal concreta y un número muy variable de satélites. Por varias razones se acordó que la altura debía ser de órbitas medias.

El principio de esta técnica está basado en la medición de las llamadas pseudodistancias. Partiendo de las coordenadas del satélite conocidas en un marco de referencia celeste se pueden determinar las coordenadas de la antena del usuario. Desde el punto de vista geométrico, tres medidas de pseudodistancia son suficientes. Sin embargo, una cuarta observación será necesaria, ya que el GPS trabaja con la técnica de determinación de distancia unidireccional.

El sistema de posicionamiento global (GPS) fue el primer sistema operativo. Se desarrolló en 1973 por el Ministerio de Defensa de los Estados Unidos "DoD", en colaboración con otros organismos como Defense Mapping Agency, actualmente Agencia Nacional Geoespacial (NGA); para proporcionar señales de posicionamiento, navegación e información de reloj, para uso tanto militar como civil en todo el mundo.

#### *4.1.1. Segmento espacial*

El segmento espacial está formado por una constelación de 24 satélites que transmiten señales de radio a los usuarios. La constelación NAVSTAR GPS se dio por completada el 8 de diciembre de 1993, con capacidad para el servicio de posicionamiento estándar (SPS). La situación real, debido a una mayor duración de funcionamiento que el previsto, es que el número de satélites activos es del orden de 30 / 31, esto supone que en cualquier punto de la Tierra y momento del día, se

dispone entre 5 y 11 satélites visibles en geometría favorable. Las principales características de la constelación son:

- 24 satélites ubicados en 6 planos orbitales geocéntricos denominados con las letras A, B, C, D, E y F (4 satélites por cada uno de los planos orbitales). Debido a su mayor duración de vida prevista el número de satélites ronda alrededor de 31.
- Un período orbital de los satélites de 11h 58m.
- Las órbitas son casi circulares con un radio desde el centro de masas de la Tierra, de unos 26560 km.
- Estos planos orbitales tienen una separación de  $60^\circ$  medidos a lo largo del ecuador con una inclinación con respecto al plano ecuatorial de  $55^\circ$ .

Los satélites tienen unas antenas emisoras de señal que trabajan en la banda L del espectro, y una antena emisora receptora para su control desde Tierra, que trabaja en la banda S.

#### *4.1.2. Segmento de Control*

El Segmento Control lo forman las instalaciones en tierra necesarias para dar soporte a la constelación GPS. Los elementos más importantes son la Estación de Control Maestra, las estaciones de monitoreo de banda L y las antenas de banda S. El Segmento Control gestiona y vigila la señal de banda L de navegación, actualiza los mensajes de navegación y resuelve las anomalías de los satélites. Además controla la salud de cada satélite, las tareas asociadas con maniobras para mantenimiento y recarga de baterías.

La función principal de la Estación de Control Maestra es la de generar y distribuir el mensaje de navegación. De forma más específica, la Estación de Control Maestra realiza las siguientes funciones:

- Monitorear y dar mantenimiento al estado de los satélites.
- Monitorear las órbitas de los satélites, estimar y predecir el reloj de los satélites y los parámetros de las efemérides.
- Generar los mensajes de navegación del GPS, dar mantenimiento al servicio tiempo GPS y su sincronización con el UTC (USNO).

- Monitorear la integridad del servicio de navegación.
- Verificar y registrar los datos de navegación enviados a los usuarios del GPS.
- Comandar las maniobras para mantener la órbita GPS y para la reposición de satélites debido a fallos de alguno de los satélites.

Las estaciones reciben la señal GPS, que sirve para procesar las órbitas de los satélites y estado de los relojes. Como las órbitas se ven afectadas por perturbaciones gravitacionales y efectos de radiación solar entre otras, se deben corregir cada cierto intervalo de tiempo y enviar esta información a los satélites. Esto se realiza a través de las antenas de Tierra vía radio por la banda S.

El segmento de control operacional actual incluye una estación de control principal, una estación de control maestra suplente, 12 antenas de mando y control y 16 sitios de monitoreo, su situación se muestra en la Figura 15:

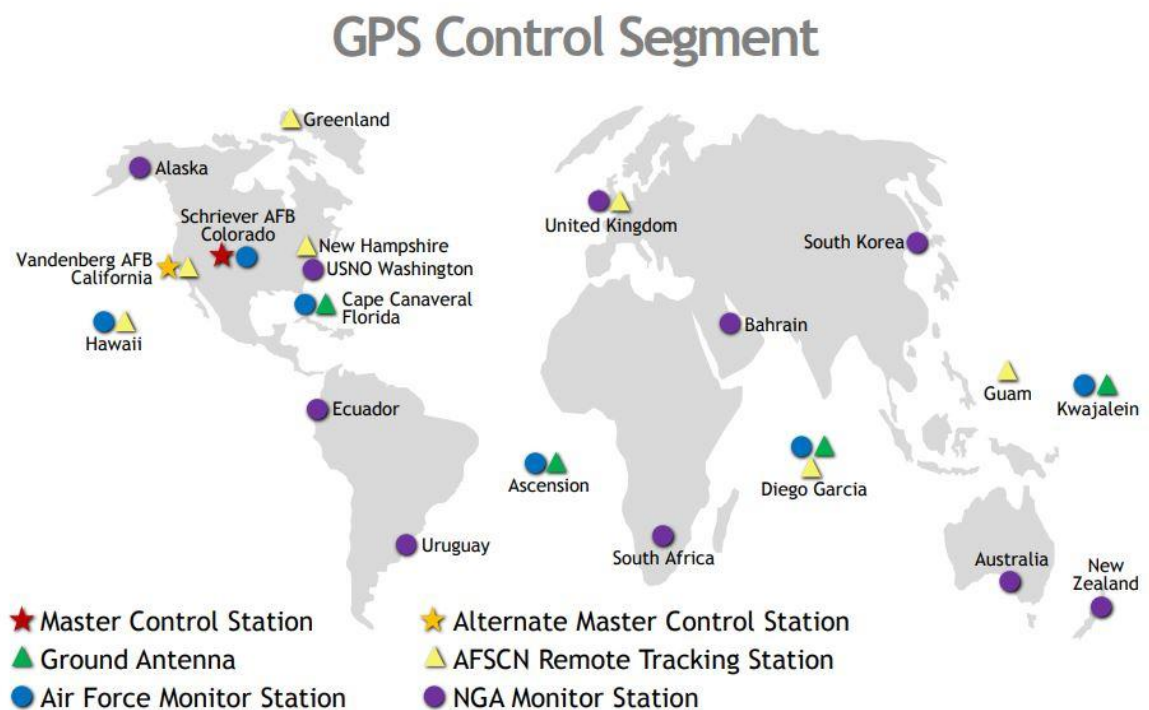


Figura 15. Ubicación de las instalaciones terrestres que conforman el segmento de control GPS. La imagen ha sido descargada de la web: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>

#### 4.1.3. Segmento de Usuario

Está constituido por todos los receptores GPS, desde el receptor más complejo en Geodesia hasta los chips instalados en un reloj o Smartphone. En el caso de

receptores topo-geodésicos, los elementos principales son la antena-sensor con preamplificador, un microprocesador con programas base y de procesado de datos, un oscilador de precisión media, memoria de almacenamiento de datos, interfaz de usuario, y a veces sistemas de recepción de señal de telefonía o radio. Además de los elementos accesorios como puesta en estación, puertos, cableados y otros accesorios.

En la antena se transforma la señal radioeléctrica que capta de cada satélite en señal eléctrica, y viceversa. La posición calculada está referida al centro de fase de la antena que no coincide normalmente con el centro físico del receptor, por ello será crucial aplicar la corrección al centro de fase de la antena.

#### **4.2. Método PPP**

Uno de los métodos para aumentar la precisión en el modo de posicionamiento simple es utilizar información precisa del reloj satelital y datos precisos de efemérides. Este método se conoce como Precise Point Positioning (PPP) y se introdujo originalmente para el análisis eficiente de datos GPS desde grandes redes (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Estos datos mejorados se obtienen prácticamente en tiempo real, a partir de una red global de estaciones GNSS y de instituciones que generan dichos datos y ponen a disposición del usuario. Para obtener estos datos, se requiere la disponibilidad de la órbita y el estado del reloj del satélite de referencia de forma precisa, en tiempo real, a través de una red de estaciones de referencia GNSS distribuidas por todo el mundo.

Con ello, eliminamos los sesgos específicos del satélite, que suponen fuentes significativas de error en posicionamiento GNSS. Trabajando con un receptor de doble frecuencia que permite eliminar la influencia de la ionosfera, la solución pasa a tener como únicos errores asociados, los sesgos específicos del receptor y la componente troposférica. Implementando técnicas de filtrado, como el filtrado de Kalman, son alcanzables incertidumbres subcentimétricas.

El modelo matemático básico de PPP, con observables de doble frecuencia, se define por la combinación iono-free de dos observaciones de código (4.1) o de fase (4.2):

$$Código \rightarrow \frac{R_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{R_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \varrho + c \Delta\delta + \Delta^{Trop} \quad (4.1)$$

$$Fase \rightarrow \frac{\lambda_1 \Phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 \Phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \varrho + c \Delta\delta + \Delta^{Trop} + \frac{\lambda_1 N_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4.2)$$

Las incógnitas a determinar son las posiciones de los puntos, contenidas en  $\varrho$ , el error del oscilador del receptor ( $\Delta\delta$ ), el efecto troposférico ( $\Delta^{Trop}$ ), y las ambigüedades. Para resolver estas incógnitas, son posibles varios métodos como por ejemplo, el ajuste mínimo cuadrático o el filtrado de Kalman extendido. Además, podemos encontrar diferentes estrategias para la modelización troposférica.

Con esta técnica, algunas de las ventajas que se contemplan pueden ser: que solo se requiera trabajar con un receptor GPS, que sus soluciones de posición estén referidas a un marco de referencia global, y que desaparezcan las limitaciones referidas a la longitud del vector o de la base. Como inconveniente se nos puede presentar los largos tiempos de convergencia necesarios para que la solución flotante de las ambigüedades de fase converja para alcanzar un posicionamiento a nivel centimétrico.

## 5. SISTEMAS Y MARCOS DE REFERENCIA

Un sistema de referencia define el origen y la orientación de los planos o ejes fundamentales del sistema, incluyendo los fundamentales modelos matemáticos y físicos subyacentes (Seeber, 2003). En los Sistemas de referencia convencionales, estos modelos constantes numéricos y algoritmos están especificados explícitamente.

Un marco de referencia supone la realización práctica de un sistema de referencia mediante observaciones. Consiste en un conjunto de puntos identificables (en el cielo o en la superficie de la Tierra) y se describe mediante un catálogo de posiciones y velocidades precisas en una época específica.

El establecimiento de los marcos de referencia terrestre no es una tarea fácil, ya que la corteza sufre continuamente deformaciones. Éstas suelen provenir de tectónica de placas, mareas terrestres, carga oceánica y atmosférica, o efectos regionales y locales.

En el ámbito continental, el efecto más significativo es el que proviene de la tectónica de placas global. Para mantener estable la orientación de los ejes de coordenadas en una Tierra dinámica, el parámetro de orientación de ITRF se define, por convención, de modo que no exista rotación del marco de referencia con respecto a la litosfera. En la práctica, el parámetro de orientación ITRF es alineado con el modelo de placa tectónica NNR-NUVEL-1A. De esta manera, podemos obtener realizaciones ITRS a nivel regional como pueden ser las correspondientes a ETRS89 (para Europa) o SIRGAS (para América del Sur).

### **5.1. Marcos de referencia ITRF**

El Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) es el sistema de referencia terrestre convencional establecido y mantenido por el IERS, y es el exclusivo para los fines científicos y prácticos actuales (Seeber, 2003).

La realización del ITRS, el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF), se forma a través de coordenadas cartesianas y velocidades lineales de un conjunto de puntos equipados con varios sistemas de observación geodésica. El resultado es publicado bajo la denominación ITRFxx, donde xx vienen a ser los dos últimos dígitos del año en el que se formó el marco de referencia correspondiente. La solución más reciente en la actualidad es ITRF2014.

Cada ITRF en particular se ensambla mediante la combinación de distintos resultados, que son obtenidos a partir de técnicas independientes. El uso de tantas técnicas diferentes como sea posible, conllevará una disminución significativa de los errores sistemáticos. Las técnicas de geodesia espacial que contribuyen a la construcción del ITRF a día de hoy son: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Global Navigation Satellite Systems (GNSS) y Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). Como ninguna de las cuatro técnicas geodésicas espaciales puede proporcionar, de

manera independiente, una referencia completa de los parámetros que definen el marco, se demuestra que ITRF es el marco de referencia más preciso disponible a día de hoy, reuniendo las fortalezas de las cuatro técnicas que contribuyen a su construcción y compensando las debilidades de las otras.

Las materializaciones de ITRF que vamos a introducir para este proyecto serán ITRF2008 e ITRF2014.

### 5.1.1. ITRF2008

ITRF2008 (Figura 16) es una versión refinada del ITRF basado en soluciones reprocesadas de VLBI, SLR, GNSS y DORIS. Los datos de entrada utilizados en su elaboración son series temporales de las posiciones de las estaciones y Parámetros de Orientación de la Tierra (EOP).

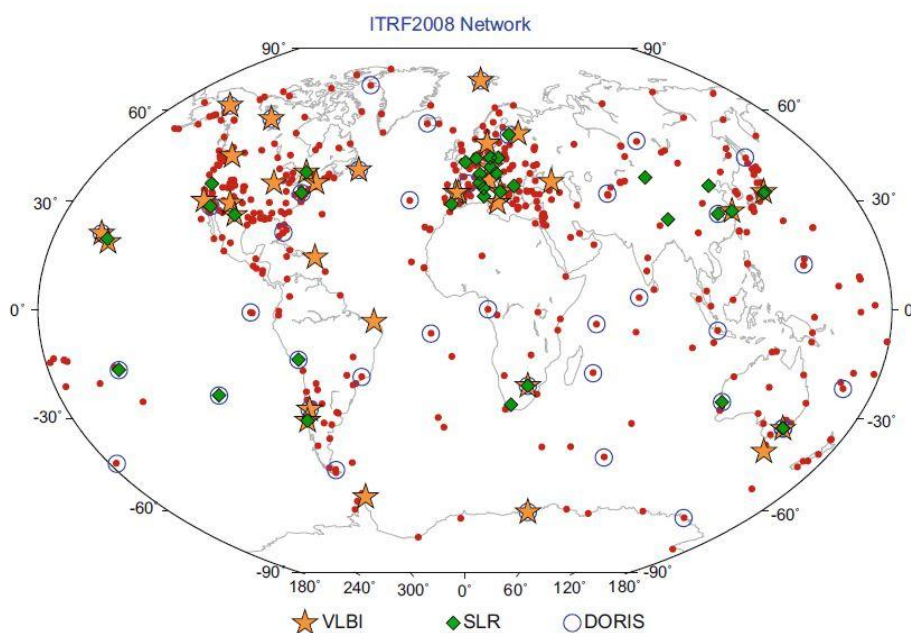


Figura 16. Red de estaciones GNSS, VLBI, SLR y DORIS pertenecientes a la materialización ITRF2008 (Altamimi et al., 2011)

El origen del ITRF2008 se define de tal manera que no contempla las traslaciones y sus velocidades con respecto al Centro de Masas de la Tierra (promediado por series temporales SLR). Su escala se define anulando el factor de escala y su velocidad con respecto al promedio de las soluciones de VLBI y SLR. La orientación de ITRF2008 y su velocidad, están alineados con el ITRF2005, utilizando 179 estaciones geodésicas.

### 5.1.2. ITRF2014

ITRF2014 (Figura 17) se genera con un modelado mejorado de los movimientos no lineales de las estaciones, incluyendo las señales temporales de posiciones de la estación y la deformación post-sísmica. Usando el historial de observación completo de VLBI, SLR, GNSS, y DORIS, los servicios internacionales correspondientes proporcionaron series temporales reprocesadas de las posiciones de las estaciones y los Parámetros de Orientación Terrestre (EOP). Se demuestra que ITRF2014 es superior a versiones anteriores de ITRF, ya que modela con precisión las desviaciones relativas de la estación conduciendo a un marco de referencia más sólido.

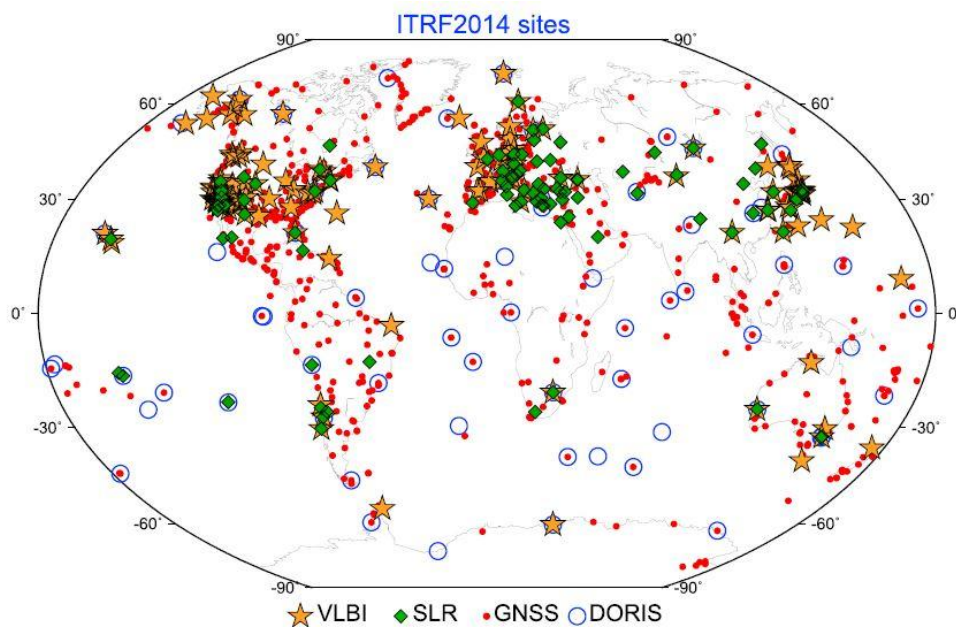


Figura 17. Red de estaciones GNSS, VLBI, SLR y DORIS pertenecientes a la materialización ITRF2014 (Altamimi et al., 2016).

El origen del ITRF2014 coincide con el Centro de Masas de la Tierra (según lo indicado por las observaciones SLR recopiladas en los dos satélites LAGEOS entre 1993 y 2015). La escala de ITRF2014 se define por el promedio aritmético de las escalas implícitas de las soluciones SLR y VLBI obtenidas a partir de sus respectivas series temporales.

Si bien los modelos de deformación post-sísmica se estimaron utilizando datos GNSS, los modelos paramétricos resultantes en zonas sísmicas se aplicaron a las series temporales de posición de la estación de las otras tres técnicas, mostrando un

nivel alto de consistencia que refuerza el vínculo entre técnicas dentro del marco ITRF2014.

## 5.2. Marcos de referencia ETRF

ETRF es la solución adoptada por EUREF (Subcomisión de marcos de referencia de IAG), coincidente con el ITRF en una época determinada y fijado a la parte estable de la placa euroasiática (Bruyninx et al., 2019). La primera materialización del Marco de Referencia Europeo se realizó sobre el sistema ETRS89. Éste fue adoptado en 1990 en Florencia, y se vincula al ITRS a través de una transformación de similitud. Para cada trama etiquetada como ITRFyy se puede definir una trama correspondiente en ETRS89 y etiquetarla como ETRFyy siguiendo la ecuación (5.1):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ETRF} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF} + \begin{bmatrix} 0 & -Rz & Ry \\ Rz & 0 & -Rx \\ -Ry & Rx & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF} \quad (5.1)$$

Donde los parámetros de transformación (traslaciones, rotaciones y factor de escala) ITRF a ETRF están a disposición pública. Las posiciones de las estaciones ITRFyy europeas (GNSS, VLBI, SLR y DORIS) y las velocidades se han ido transformando en sus correspondientes ETRFyy.

La red permanente EUREF (EPN) consta de más de 340 estaciones EPN, distribuidas por toda Europa. Proporcionan información GNSS de alta calidad archivada en centros de datos locales y regionales de manera diaria, por cada hora, por cada 15 minutos, o en tiempo real. Su principal objetivo es proporcionar acceso al ETRS89 poniendo a disposición del público los datos de seguimiento GNSS. Dado que es una densificación de la Red GNSS Internacional (IGS), presenta una completa armonización de estándares entre la red global y la red europea.

En la Figura 18 se muestran las estaciones EPN clasificadas según las observaciones que procesan. Los puntos grises se corresponden con estaciones GPS, los puntos negros se corresponden con estaciones de GPS + GLONASS, los triángulos blancos se corresponden con estaciones GPS + GLONASS + Galileo, y los triángulos grises se corresponden con estaciones GPS + GLONASS + Galileo + BeiDou.

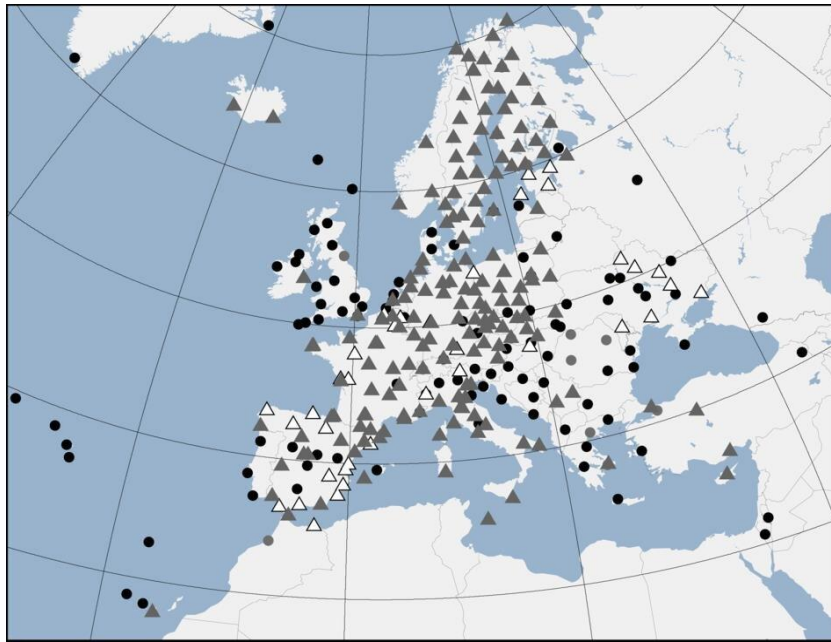


Figura 18. Estado de las estaciones EPN en Junio de 2019, clasificadas según las observaciones que procesan (Bruyninx et al., 2019).

#### 5.2.1. ETRF2014

De esta manera y paralelamente al ITRF, se han llevado a cabo cada uno de los Marcos de Referencia Europeos publicados hasta la fecha: ETRF89, ETRF90, ETRF91, ETRF92, ETRF93, ETRF94, ETRF96, ETRF97, ETRF2000, ETRF2005 y el presente ETRF2014.

Después del lanzamiento de ITRF2005, la Junta de Gobierno de EUREF (EUREF-GB), recomendó no usar el ETRF2005 y adoptar el ETRF2000 como un marco convencional del sistema ETRS89. Sin embargo, después del lanzamiento de ITRF2014, destacando las mejoras en precisión y estabilidad de los parámetros de origen y escala del ITRF2014 y la importancia de una realización mejorada de ETRS89 basada en el ITRF2014, se pusieron a disposición todos los parámetros definitorios del ETRF2014 con un origen coincidente con el de ITRF2014 y se proporcionaron la serie completa de parámetros de transformación entre las versiones ITRF y ETRF en una nota técnica actualizada (Altamimi, 2018).

## 6. PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

En este apartado vamos a desarrollar el método de trabajo que hemos llevado a cabo, partiendo de los ficheros de observación hasta conseguir las velocidades absolutas y residuales de las estaciones..

Una vez terminado el procesado de datos se llevarán a cabo las tareas de análisis, que consistirán en la obtención de velocidades a través de un programa específico.

Sin embargo, antes de realizar este proceso, llevaremos a cabo una transformación de coordenadas al sistema geodésico local. Las coordenadas XYZ están referidas al geocentro, por lo que con el nuevo sistema adoptado se nos proporcionará una mejor idea acerca del movimiento de las estaciones.

### **6.1. Procesado PPP Online**

Para cada estación se nos proporcionan en un principio alrededor de unos 50 ficheros de observación (59 para ALJI, 41 para CAST, 45 para LIJA, 53 para LOJA, y 54 para RUBI) de 24 horas en diferentes intervalos temporales comprendidos entre los años 2009 y 2018. Mediante esta fase de procesado se extraen las series temporales de coordenadas ITRF2014 a partir de los ficheros de observación en formato RINEX. Además, se le asociará información estadística a cada una de las componentes extraídas (desviación típica o covarianzas).

Gracias al enfoque implementado de Precise Point Positioning (PPP) podemos gozar de una amplia red de estaciones GPS que observan a diario los mismos satélites alrededor del mundo. De esta manera, el centro de análisis JPL determina posiciones precisas de satélites y correcciones de reloj desde una red de receptores distribuidos globalmente. Los ficheros diarios se emiten en el servidor JPL FTP junto con las órbitas de los satélites y la información de parámetros de orientación terrestre.

La principal ventaja de este enfoque, es la rapidez del análisis, ya que no necesita combinar líneas de base para diferentes estaciones incluidas en la solución. En resumen, sus ventajas son:

- Si una nueva estación necesita ser añadida en la solución después del primer análisis, no es necesario repetir el cálculo o ajuste de toda la red o subred.
- Los errores en el análisis de los ficheros información de una estación no afectan a los resultados de estaciones próximas analizadas.

Acumulando soluciones de posición diarias podremos crear series temporales para cada una de las estaciones en cuestión.

### 6.1.1. APPS (Automatic Precise Positioning Service)

El programa de procesado con el que hemos trabajado ha sido “APPS (Automatic Precise Positioning Service)”, el servicio de procesamiento online de GIPSY-OASIS versión 6.4. de JPL (Jet Propulsion Laboratory). APPS acepta archivos de medición GPS y aplica la tecnología de posicionamiento GPS avanzada para estimar la posición de los receptores, en nuestro caso, en modo estático.

La técnica de Precise Point Positioning (PPP) se implementa para procesar la medición de pseudodistancia y fase en archivos de formato RINEX (hasta su versión 2.11). Debemos tener en cuenta aspectos como la capacidad máxima de subida de archivos (5MB) y el hecho de que las coordenadas de salida vienen dadas en el marco ITRF2014.

El programa muestra una interfaz muy intuitiva, que ofrece unas funcionalidades por defecto para la pestaña “Instant Positioning”. Para cambiarlas es necesario darse de alta como usuario. Para nuestro procesado, modificamos tanto el ángulo de corte como el modo de ponderación de las observaciones, marcando las funcionalidades que se muestran en la Figura 19.

Figura 19. Interfaz y opciones marcadas para el procesado de las observaciones en APPS (Automatic Precise Positioning Service).

Una vez que las observaciones son procesadas, se nos ofrecen por pantalla diferentes opciones de ficheros de salida (Figura 20). La extensión .stacov contiene

las soluciones de posición y covarianza en el modo estático, y será precisamente la que nos interese en nuestra fase de análisis.

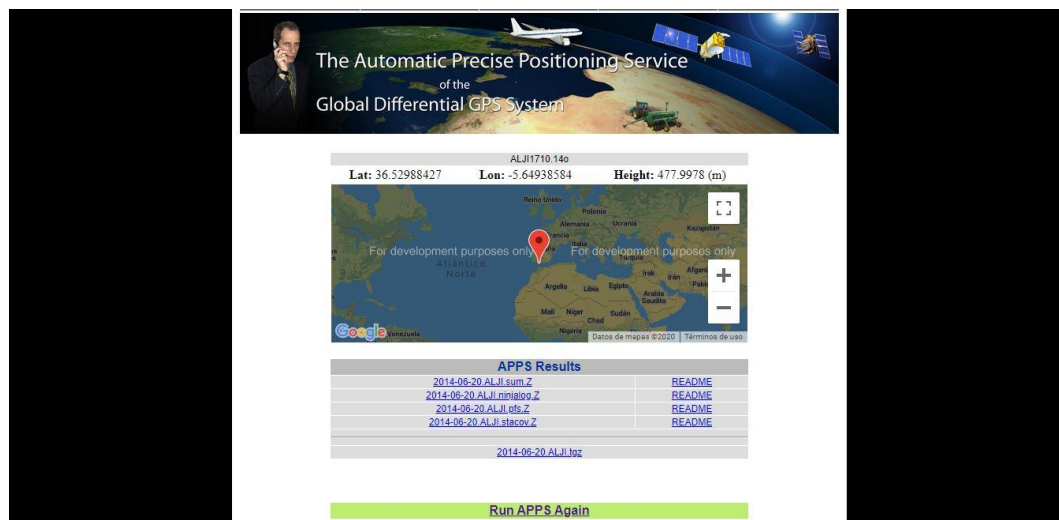


Figura 20. Resultados obtenidos tras el procesamiento de las observaciones en APPS (Automatic Precise Positioning Service).

### 6.1.2. Creación de ficheros con series temporales

Del apartado anterior, obtuvimos una larga lista de ficheros de extensión .stacov. Cada uno de ellos, obtenido tras el procesamiento de un fichero RINEX. Tal y como se muestra en la Figura 21, la información viene organizada de la siguiente manera dentro de los ficheros exportados:

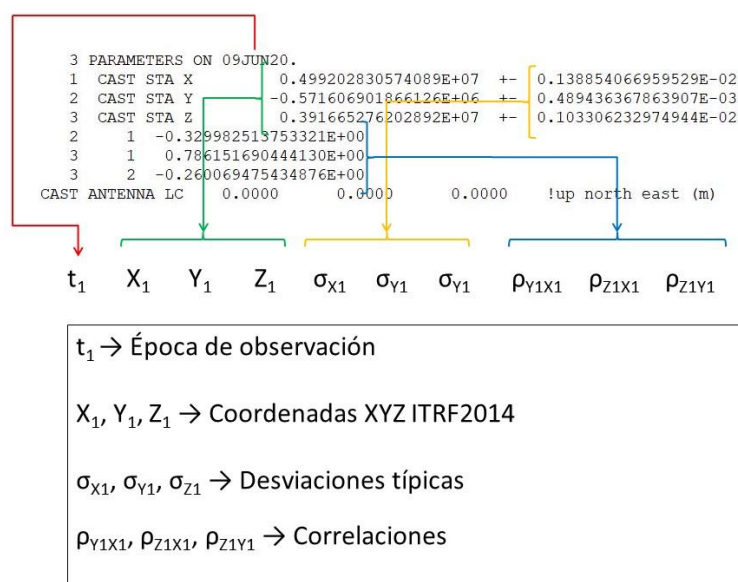


Figura 21. Estructura de los ficheros de extensión .stacov.

Para la creación de series temporales para cada una de las estaciones, usaremos un código de programación MATLAB. Mediante el programa 'Z\_Programa1.m':

1. Haremos que el sistema vaya leyendo las posiciones concretas en cada uno de los ficheros .stacov de una estación.
2. Se crearán 10 vectores columna (Epoca, CoordX, CoordY, CoordZ, SigmaXm SigmaY, SigmaZ, CorrelacionXY, Correlacion XZ, y CorrelacionYZ) que se irán construyendo a medida que asignemos los valores leídos según la posición que ocupaban en el fichero .stacov. Todos vendrán dados como cadenas de caracteres y será necesario transformarlos a tipo doble, para poder operar con ellos.
3. Una vez se hayan completado los 10 vectores columna con la información de todos los ficheros .stacov de esa estación, procedemos a exportar el archivo de series temporales que contendrá esta información dispuesta de la siguiente manera:

|          |          |          |          |               |               |               |               |               |               |
|----------|----------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $t_1$    | $X_1$    | $Y_1$    | $Z_1$    | $\sigma_{X1}$ | $\sigma_{Y1}$ | $\sigma_{Z1}$ | $\rho_{Y1X1}$ | $\rho_{Z1X1}$ | $\rho_{Z1Y1}$ |
| $t_2$    | $X_2$    | $Y_2$    | $Z_2$    | $\sigma_{X2}$ | $\sigma_{Y2}$ | $\sigma_{Z2}$ | $\rho_{Y2X2}$ | $\rho_{Z2X2}$ | $\rho_{Z2Y2}$ |
| $t_3$    | $X_3$    | $Y_3$    | $Z_3$    | $\sigma_{X3}$ | $\sigma_{Y3}$ | $\sigma_{Z3}$ | $\rho_{Y3X3}$ | $\rho_{Z3X3}$ | $\rho_{Z3Y3}$ |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$      | $\vdots$      | $\vdots$      | $\vdots$      | $\vdots$      | $\vdots$      |
| $t_m$    | $X_m$    | $Y_m$    | $Z_m$    | $\sigma_{Xm}$ | $\sigma_{Ym}$ | $\sigma_{Zm}$ | $\rho_{YmXm}$ | $\rho_{ZmXm}$ | $\rho_{ZmYm}$ |

$t \rightarrow$  Época de observación

$X, Y, Z \rightarrow$  Coordenadas XYZ ITRF2014

$\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z \rightarrow$  Desviaciones típicas

$\rho_{YX}, \rho_{ZX}, \rho_{ZY} \rightarrow$  Correlaciones

Figura 22. Estructura que presentan los archivos .txt, que contienen series temporales de coordenadas XYZ.

4. Finalizada la exportación del archivo, pasamos a la siguiente estación y repetimos el mismo procedimiento, obteniendo así cinco archivos.

Una vez finalizado todo el proceso, los nombres de los archivos exportados con las series temporales serán:

- XYZ\_ALJI.dat
- XYZ\_CAST.dat
- XYZ\_LIJA.dat
- XYZ\_LOJA.dat
- XYZ\_RUBI.dat

### 6.1.3. Construcción de las matrices varianza-covarianza

Para conocer las matrices varianza-covarianza debemos comenzar por el cálculo de las varianzas y las covarianzas entre coordenadas de cada uno de los puntos. En el caso de las varianzas, basta con elevar al cuadrado las desviaciones típicas de las coordenadas. Para las covarianzas, las fórmulas a seguir son (6.1), (6.2), y (6.3):

$$\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = \rho_{XY} \cdot \sigma_X \cdot \sigma_Y \quad (6.1)$$

$$\sigma_{XZ} = \sigma_{ZX} = \rho_{XZ} \cdot \sigma_X \cdot \sigma_Z \quad (6.2)$$

$$\sigma_{YZ} = \sigma_{ZY} = \rho_{YZ} \cdot \sigma_Y \cdot \sigma_Z \quad (6.3)$$

Por lo tanto, las coordenadas de cada punto tendrán asociada una matriz varianza-covarianza (6.4), en la que irán implícitas sus componentes de precisión. Se notará como  $(\Sigma_{XYZ})_i$  e irá construida de la siguiente forma:

$$\Sigma_{(XYZ)_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_i}^2 & \sigma_{XY_i} & \sigma_{XZ_i} \\ \sigma_{YX_i} & \sigma_{Y_i}^2 & \sigma_{YZ_i} \\ \sigma_{ZX_i} & \sigma_{ZY_i} & \sigma_{Z_i}^2 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

## 6.2. Transformación al Sistema Geodésico Local

Las coordenadas XYZ están referidas a un sistema geocéntrico. Estas coordenadas serán transformadas a un Sistema Geodésico Local (ENU). De la misma manera que en el caso anterior, vamos a llevar a cabo esta acción mediante MATLAB con 'Z\_Programa2.m'.

Las coordenadas de este sistema (conocidas como Este, Norte y Up) no son directamente observables y vienen referidas al primer registro realizado en las series temporales de cada estación. Es decir, las coordenadas ENU se calcularán a partir de los incrementos de coordenadas cartesianas con respecto a las del primer punto que aparece (6.5). Al trabajar con incrementos, la magnitud de estas coordenadas será mucho más pequeña y fácil de asimilar.

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = G \cdot \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Partiendo de (6.4) en la cual se desarrollaba el cálculo para las matrices varianza-covarianza de las coordenadas, hemos ideado un sistema para hacer lo propio que hicimos con las diferencias de coordenadas (6.8). Sin embargo, en este caso hay que tener en cuenta la ley de propagación de covarianzas (6.6) y (6.7):

$$\Sigma_{(\Delta X \Delta Y \Delta Z)_{ij}} = J \cdot \Sigma_{(XYZ)_{ij}} \cdot J^T \quad (6.6)$$

$$\Sigma_{(\Delta X \Delta Y \Delta Z)_{ij}} = J \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{X_i}^2 & \sigma_{XY_i} & \sigma_{XZ_i} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{YX_i} & \sigma_{Y_i}^2 & \sigma_{YZ_i} & 0 & 0 & 0 \\ \sigma_{ZX_i} & \sigma_{ZY_i} & \sigma_{Z_i}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{X_i}^2 & \sigma_{XY_i} & \sigma_{XZ_i} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{YX_i} & \sigma_{Y_i}^2 & \sigma_{YZ_i} \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{ZX_i} & \sigma_{ZY_i} & \sigma_{Z_i}^2 \end{bmatrix} \cdot J^T \quad (6.7)$$

$$\Sigma_{(\Delta X \Delta Y \Delta Z)_{ij}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X_{ij}}^2 & \sigma_{\Delta X_{ij} \Delta Y_{ij}} & \sigma_{\Delta X_{ij} \Delta Z_{ij}} \\ \sigma_{\Delta Y_{ij} \Delta X_{ij}} & \sigma_{\Delta Y_{ij}}^2 & \sigma_{\Delta Y_{ij} \Delta Z_{ij}} \\ \sigma_{\Delta Z_{ij} \Delta X_{ij}} & \sigma_{\Delta Z_{ij} \Delta Y_{ij}} & \sigma_{\Delta Z_{ij}}^2 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Siendo J el Jacobiano de la transformación. En este caso, J=G:

$$J = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Además de estos incrementos de coordenadas y sus correspondientes matrices varianza-covarianza, es necesario obtener las coordenadas geodésicas del primer registro. Para ello, tendremos en cuenta algunos parámetros del elipsoide GRS80 (Tabla 2) que nos ayudarán a llegar a los valores deseados (Moritz, 1980).

| Constante      | Valor            | Significado                          |
|----------------|------------------|--------------------------------------|
| a              | 6378.137 m       | Semieje mayor                        |
| e <sup>2</sup> | 0.00669438002290 | Cuadrado de la primera excentricidad |

Tabla 2. Semieje mayor y cuadrado de la primera excentricidad, característicos del elipsoide GRS80 (Moritz, 1980).

Mientras que el cálculo de la longitud ( $\lambda$ ) es directo (6.9), el cálculo de la latitud ( $\varphi$ ) y la altitud elipsoidal ( $h$ ) siguen un proceso iterativo: (6.10), (6.12) y (6.13), que transcurrirá mientras el valor de la variable  $d$  (diferencia entre el valor de la latitud y el de su anterior iteración) sea  $> 0.000000000000001$ . Durante este proceso también será necesario el cálculo iterativo del radio de curvatura del primer vertical (6.11).

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad (6.9)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left[ \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot (1 - e^2)^{-1} \right] \quad (6.10)$$

$$N_i = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi_{i-1}}} \quad (6.11)$$

$$h_i = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \varphi_{i-1}} \quad (6.12)$$

$$\varphi_i = \tan^{-1} \left[ \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \cdot \left( 1 - e^2 \cdot \frac{N_i}{N_i + h_i} \right)^{-1} \right] \quad (6.13)$$

### 6.2.1. Cálculo de coordenadas ENU

Con los parámetros anteriores calculados, procedemos a realizar la transformación del Sistema Cartesiano XYZ (ITRF2014) al Sistema Geodésico Local (ENU).

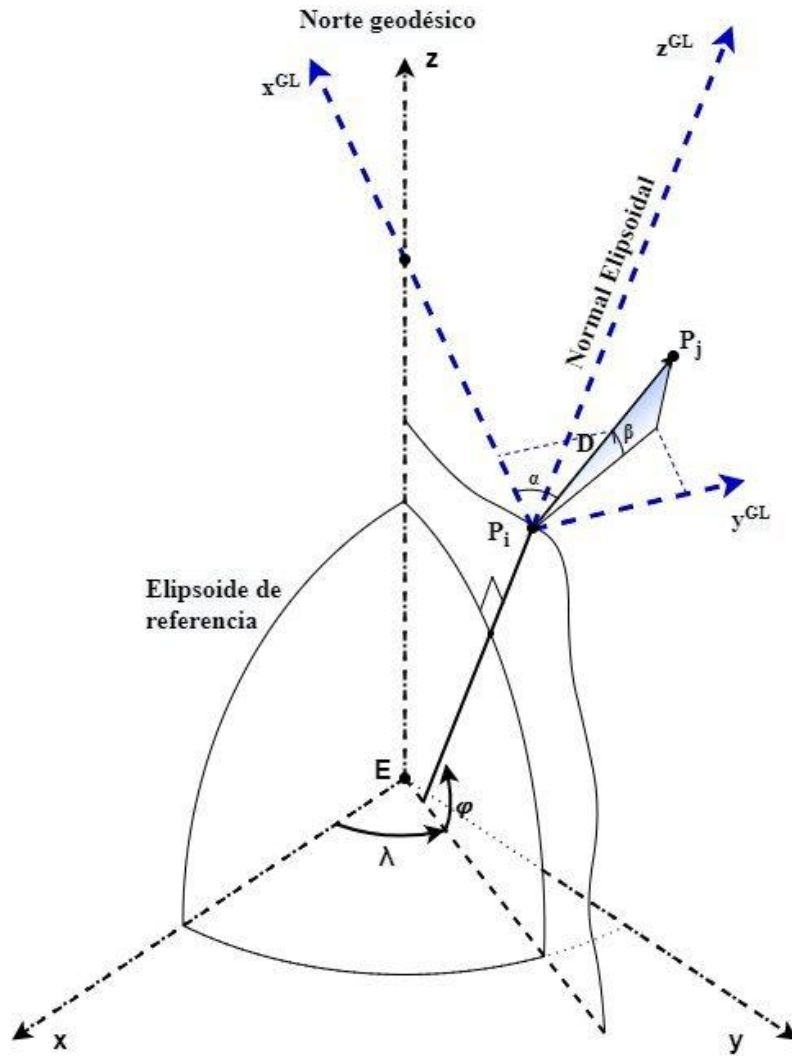


Figura 23. Relación que existe entre el Sistema Cartesiano XYZ y el Sistema Geodésico Local. Figura realizada con el programa de diagramado online draw.io.

Así se llega a (6.14), que implementaremos de manera matricial (6.16) en MATLAB; guardando en vectores columna la información obtenida en cada uno de los términos N, E, y U. “MatrizH” (6.15) será la que contenga las rotaciones del sistema, y “MatrizIncrementos” contendrá las diferencias de coordenadas con respecto al primer punto. Para el primer punto, los valores de coordenadas geodésicas locales serán nulos, ya que no existe diferencia de coordenadas.

$$\begin{cases} x_j^{GL} = -(X_j - X_i) \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 - (Y_j - Y_i) \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \lambda_1 + (Z_j - Z_i) \cdot \cos \varphi_1 \\ y_j^{GL} = -(X_j - X_i) \cdot \sin \lambda_1 + (Y_j - Y_i) \cdot \cos \lambda_1 \\ z_j^{GL} = (X_j - X_i) \cdot \cos \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 + (Y_j - Y_i) \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin \lambda_1 + (Z_j - Z_i) \cdot \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (6.14)$$

$$H = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 & -\sin \varphi_1 \cdot \sin \lambda_1 & \cos \varphi_1 \\ -\sin \lambda_1 & \cos \lambda_1 & 0 \\ \cos \varphi_1 \cdot \cos \lambda_1 & \cos \varphi_1 \cdot \sin \lambda_1 & \sin \varphi_1 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_j^{GL} \\ y_j^{GL} \\ z_j^{GL} \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

### 6.2.2. Matrices varianza-covarianza asociadas a las coordenadas ENU

Tras conocer las coordenadas ENU, construimos su correspondiente matriz varianza-covarianza mediante (6.17) y (6.18). De este modo, podremos conocer la precisión asociada de las componentes Norte, Este y Up:

$$\Sigma_{NEU} = H \cdot \Sigma_{(\Delta X \Delta Y \Delta Z)_{ij}} \cdot H^T \quad (6.17)$$

$$\Sigma_{NEU} = H \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X_{ij}}^2 & \sigma_{\Delta X_{ij} \Delta Y_{ij}} & \sigma_{\Delta X_{ij} \Delta Z_{ij}} \\ \sigma_{\Delta Y_{ij} \Delta X_{ij}} & \sigma_{\Delta Y_{ij}}^2 & \sigma_{\Delta Y_{ij} \Delta Z_{ij}} \\ \sigma_{\Delta Z_{ij} \Delta X_{ij}} & \sigma_{\Delta Z_{ij} \Delta Y_{ij}} & \sigma_{\Delta Z_{ij}}^2 \end{bmatrix} \cdot H^T = \begin{bmatrix} \sigma_N^2 & \sigma_{NE} & \sigma_{NU} \\ \sigma_{EN} & \sigma_E^2 & \sigma_{EU} \\ \sigma_{UN} & \sigma_{UE} & \sigma_U^2 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Para extraer las desviaciones típicas de las componentes Norte, Este y Up, basta con aplicar la raíz cuadrada a los elementos de la diagonal principal (6.19), (6.20), y (6.21).

$$\sigma_N^2 = \sqrt{\Sigma_{NEU(1,1)}} \quad (6.19)$$

$$\sigma_E^2 = \sqrt{\Sigma_{NEU(2,2)}} \quad (6.20)$$

$$\sigma_U^2 = \sqrt{\Sigma_{NEU(3,3)}} \quad (6.21)$$

De igual manera que con las coordenadas ITRF2014, vamos a exportar un archivo de series temporales con coordenadas ENU. Estarán ordenadas según la época de observación y se dispondrán como se indica en la Figura 24:

|          |          |          |          |               |               |               |
|----------|----------|----------|----------|---------------|---------------|---------------|
| $t_1$    | 0        | 0        | 0        | $\sigma_{N1}$ | $\sigma_{E1}$ | $\sigma_{U1}$ |
| $t_2$    | $N_2$    | $E_2$    | $U_2$    | $\sigma_{N2}$ | $\sigma_{E2}$ | $\sigma_{U2}$ |
| $t_3$    | $N_3$    | $E_3$    | $U_3$    | $\sigma_{N3}$ | $\sigma_{E3}$ | $\sigma_{U3}$ |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$      | $\vdots$      | $\vdots$      |
| $t_m$    | $N_m$    | $E_m$    | $U_m$    | $\sigma_{Nm}$ | $\sigma_{Em}$ | $\sigma_{Um}$ |

$t \rightarrow$  Época de observación

$N, E, U \rightarrow$  Coordenadas NEU

$\sigma_N, \sigma_E, \sigma_U \rightarrow$  Desviaciones típicas de coordenadas NEU

Figura 24. Estructura que presentan los archivos .txt que contienen series temporales de coordenadas en el sistema geodésico local.

### 6.3. Análisis de series temporales (SARI)

Los datos obtenidos hasta ahora se corresponden con series temporales de coordenadas tanto en el sistema local como para la serie XYZ. Sin embargo, a la hora de analizar los movimientos tectónicos de la zona, necesitamos de algún dato que nos ofrezca información de manera más práctica y ligada directamente con la componente temporal. Para ello vamos a trabajar con el software SARI.

Este software online consiste en un programa de análisis de series temporales de posicionamiento GNSS interactivo (Santamaría-Gómez, 2019). En él incluye funcionalidades como la de visualización de series temporales de manera gráfica, ajustar modelos matemáticos a las mismas, y extraer resultados como la velocidad de la estación por componentes (rates).

Está desarrollado por Álvaro Santamaría-Gómez y se encuentra en un entorno web, cuya dirección es: <https://alvarosg.shinyapps.io/sari>. Al visitar la página (Figura 25), aparecen hasta cinco pestañas en las que se despliegan las distintas acciones que desarrolla SARI:

- Input data and format: Consta de un menú para la importación de datos de manera remota desde cualquier ordenador del usuario.

- Plot controls: En esta pestaña nos permite representar gráficamente los datos previamente importados.
- Ancillary information: Aquí podemos añadir información como los ficheros de antena. En nuestro proyecto no haremos uso de este módulo.
- Fit controls: Para ajustar los datos a una función matemática podemos ver las diferentes opciones que se presentan aquí.
- Additional fit: Por último, se nos presenta varios estadísticos o informaciones adicionales que complementan la información visual y matemática.

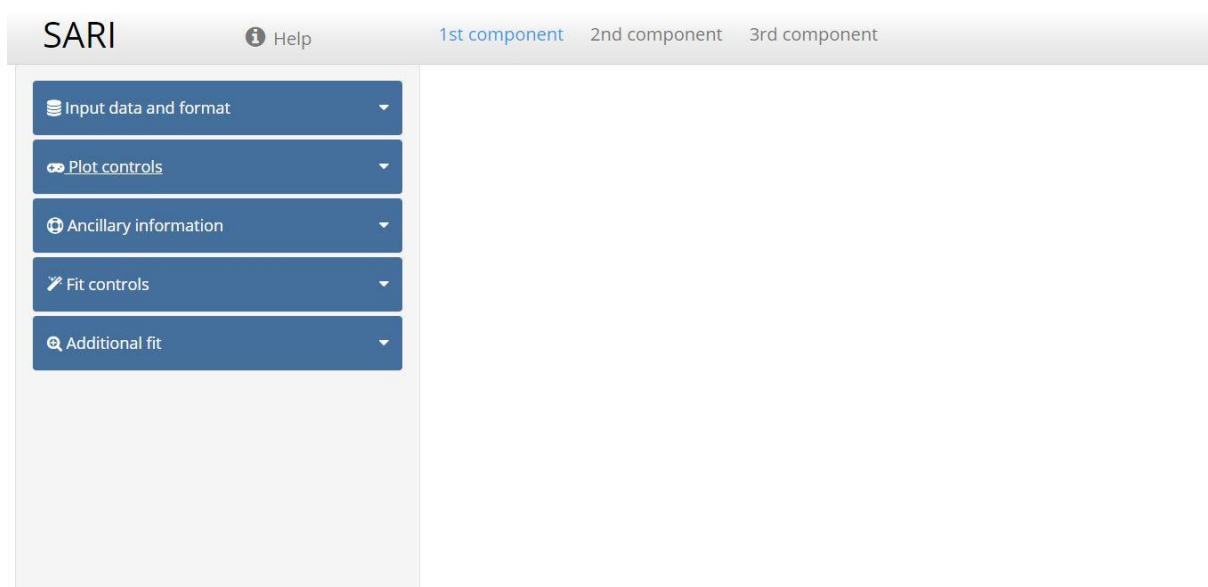


Figura 25. Interfaz de SARI, el programa de análisis de series temporales de coordenadas GPS.

### 6.3.1. Detección de cambios de antena

Antes de comenzar con SARI realizaremos una búsqueda de cambios de antena en cada una de las estaciones. Esto es, si en una estación se ha realizado un cambio de antena durante la observación, debemos tenerlo en cuenta para incorporarlo en esta fase de análisis.

Para la detección de offset de antena hemos creado 'Z\_Programa0.m' mediante MATLAB. Este programa nos permite extraer información de los ficheros RINEX referente a las antenas usadas en cada observación. El programa lee la posición concreta donde el archivo de observación nos informa sobre el tipo de antena y su código asociado, y lo almacena en un array. Finalmente se exportan cinco Hojas de cálculo en Excel (una por cada estación) que nos facilitarán la detección de un offset ayudándonos de la búsqueda por celdas. Los datos irán

asociados a la época de observación, para llevar a cabo una verificación ordenada en el tiempo.

En nuestro caso, hemos encontrado tan solo un cambio de antena, registrado en la estación ALJI en la época 2014.4671 como se muestra en la Figura 26:

|    | A         | B          | C           | D | E | F | G | H |
|----|-----------|------------|-------------|---|---|---|---|---|
| 20 | 2012,4713 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 21 | 2012,4740 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 22 | 2012,4768 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 23 | 2012,4795 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 24 | 2012,4822 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 25 | 2013,4671 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 26 | 2013,4699 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 27 | 2013,4726 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 28 | 2013,4753 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 29 | 2013,4781 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 30 | 2013,4808 | 00038150   | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 31 | 2014,4671 | 4736A38163 | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 32 | 2014,4699 | 4736A38163 | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 33 | 2014,4726 | 4736A38163 | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 34 | 2014,4753 | 4736A38163 | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |
| 35 | 2014,4781 | 4736A38163 | TRM29659.00 |   |   |   |   |   |

Figura 26. Offset de antena en la época de observación 2014.4671 encontrado en el fichero .xls de estación ALJI.

### 6.3.2. Estimación de velocidades absolutas

Para la importación de datos, se ha subido el archivo tal y como figuraban en los resultados de las coordenadas NEU. Esto debe ser así, de lo contrario el programa no es capaz de interpretarlo correctamente. A continuación, con el comando “Plot”, podemos ver representadas las coordenadas frente a los valores de época. En la parte superior, muestra tres casillas que presenta los resultados de las diferentes componentes (en nuestro caso Norte, Este y Up).

Sobre este producto, aplicamos un modelo lineal que se adapte a la tendencia de las coordenadas. A este ajuste, debemos facilitarle tanto la época de referencia (siempre asignándole la correspondiente a la primera observación), como todos los offset de antena (en caso de que proceda).

El programa trazará una recta roja que muestre la tendencia de las coordenadas (o varias líneas si existen cambios de antena) y mostrará un cuadro

gris bajo el gráfico que contendrá datos sobre el ajuste lineal realizado. De este cuadro gris, es muy importante extraer los valores de velocidad (Estimated rate) y su desviación típica (Std. Error rate), ya que será la tendencia que muestren las coordenadas a lo largo del período de observación. En la Tabla 3 se muestran los resultados de las velocidades absolutas (expresadas en mm/año) y sus correspondientes errores en cada componente, para cada una de las cinco estaciones.

| ESTACIÓN | Velocidades absolutas  |       |       | Incertidumbres         |       |       |
|----------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
|          | (mm yr <sup>-1</sup> ) |       |       | (mm yr <sup>-1</sup> ) |       |       |
|          | N                      | E     | U     | N                      | E     | U     |
| ALJI     | 16.84                  | 16.35 | -8.85 | ±0.33                  | ±0.50 | ±1.94 |
| CAST     | 16.98                  | 17.71 | -0.52 | ±0.10                  | ±0.12 | ±0.50 |
| LIJA     | 17.43                  | 17.26 | -0.18 | ±0.14                  | ±0.12 | ±0.37 |
| LOJA     | 16.01                  | 17.63 | 0.31  | ±0.10                  | ±0.10 | ±0.33 |
| RUBI     | 16.81                  | 18.69 | 0.07  | ±0.07                  | ±0.06 | ±0.27 |

Tabla 3. Velocidades absolutas y sus correspondientes incertidumbres, obtenidas a partir de series temporales de coordenadas NEU.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas en las estaciones ALJI (Figura 26, Figura 27 y Figura 28), CAST (Figura 29, Figura 30 y Figura 31), LIJA (Figura 32, Figura 33 y Figura 34), LOJA (Figura 35, Figura 36 y Figura 37), y RUBI (Figura 38, Figura 39 y Figura 40). Muestran cada una de las series temporales y sus correspondientes rectas de regresión lineal. El eje de abscisas se corresponde con el tiempo en años, mientras que el de ordenadas representa las coordenadas ENU. Los tramos en gris representan el rango de las observaciones:

Estación ALJI:

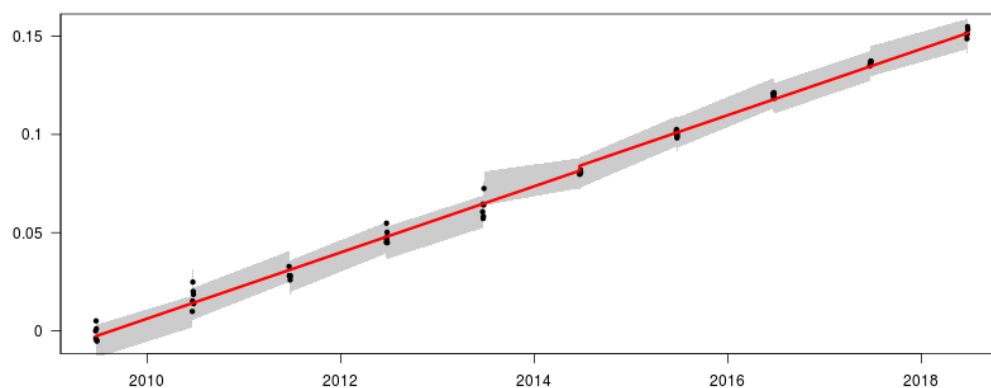


Figura 27. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Norte en la estación ALJI.

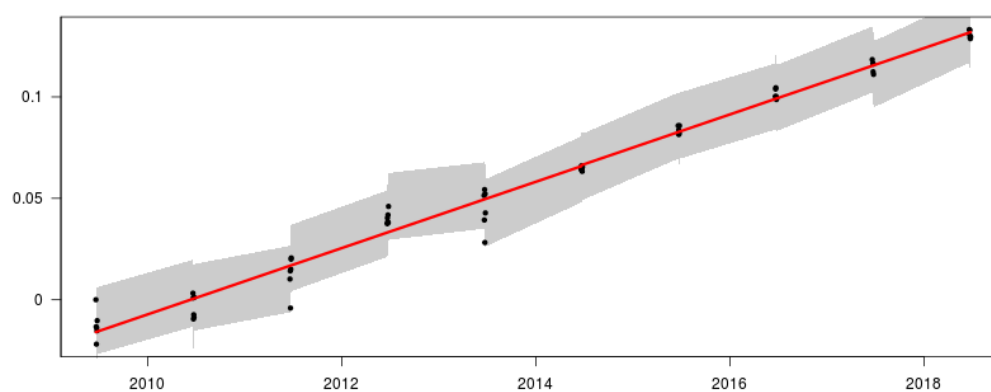


Figura 28. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Este en la estación ALJI..

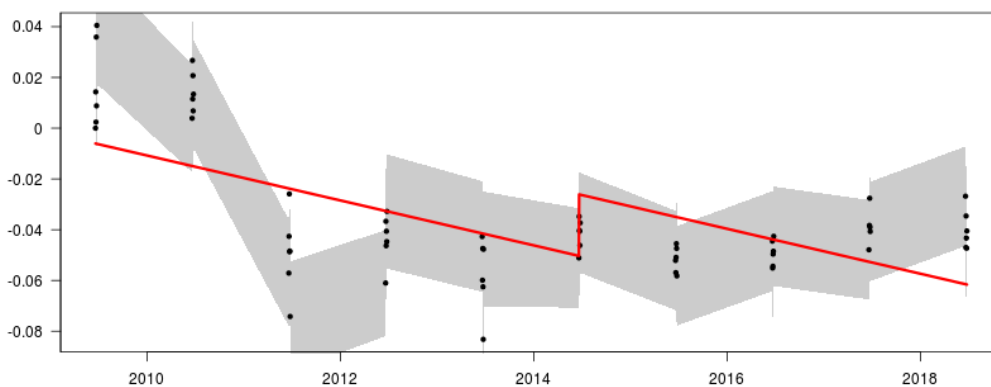


Figura 29. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Vertical en la estación ALJI.

Estación CAST:

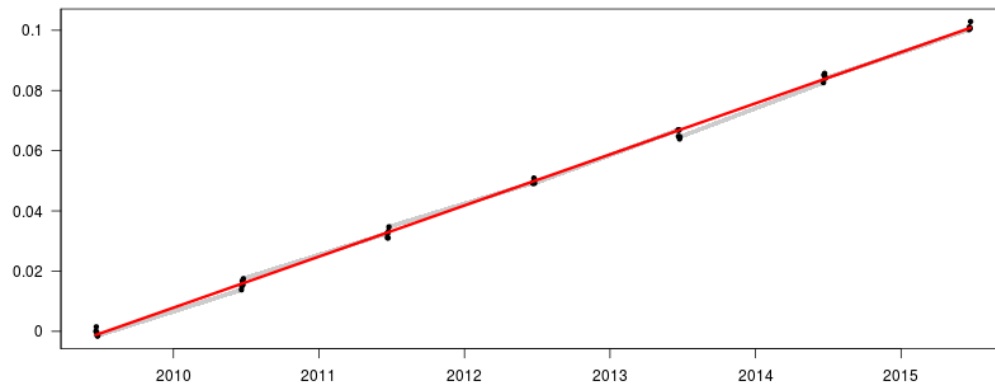


Figura 30. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Norte en la estación CAST.

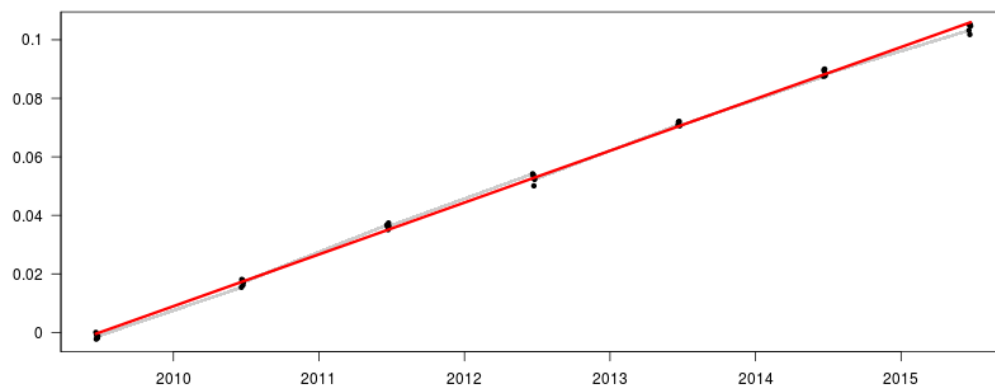


Figura 31. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Este en la estación CAST.

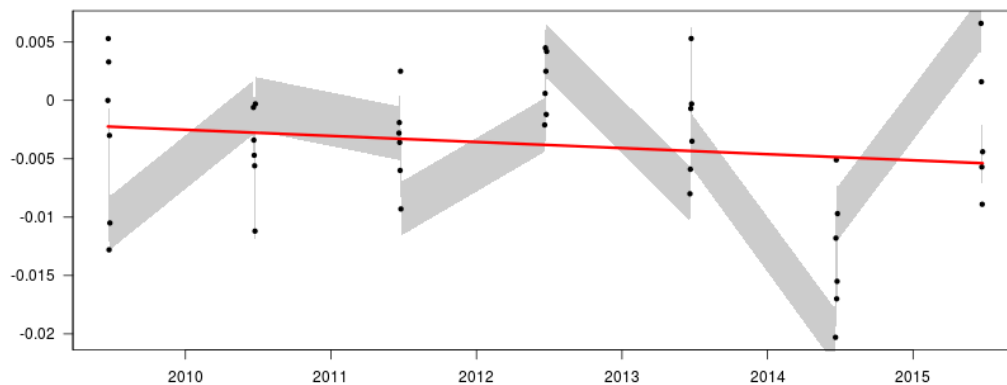


Figura 32. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Vertical en la estación CAST.

Estación LIJA:

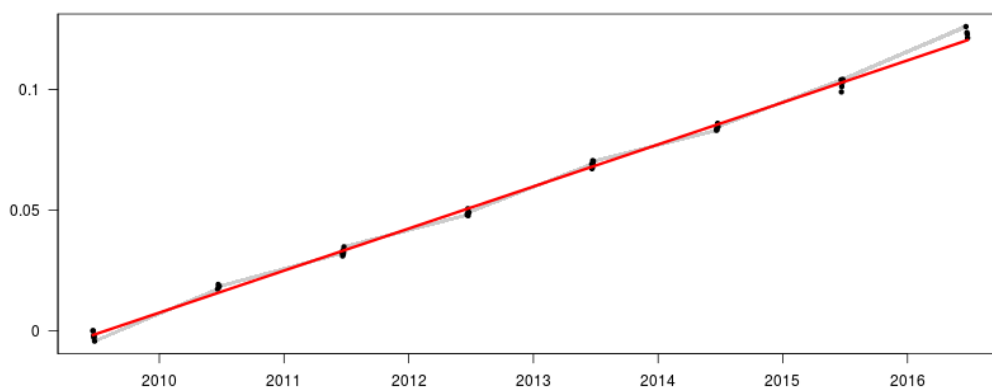


Figura 33. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Norte en la estación LIJA.

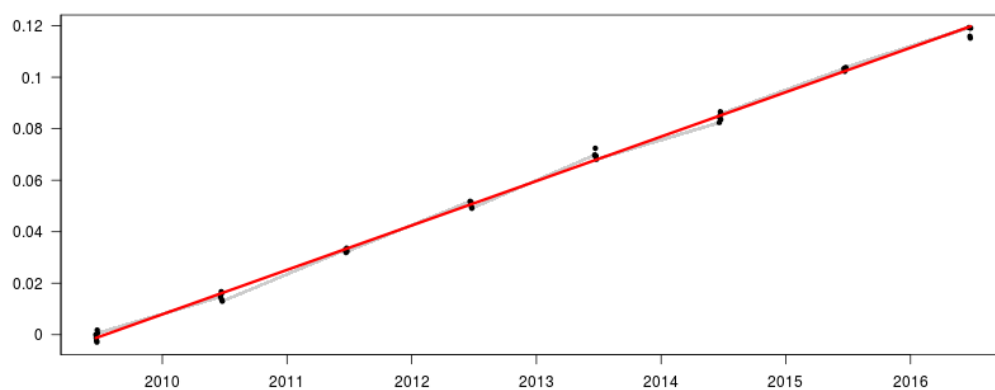


Figura 34. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Este en la estación LIJA.

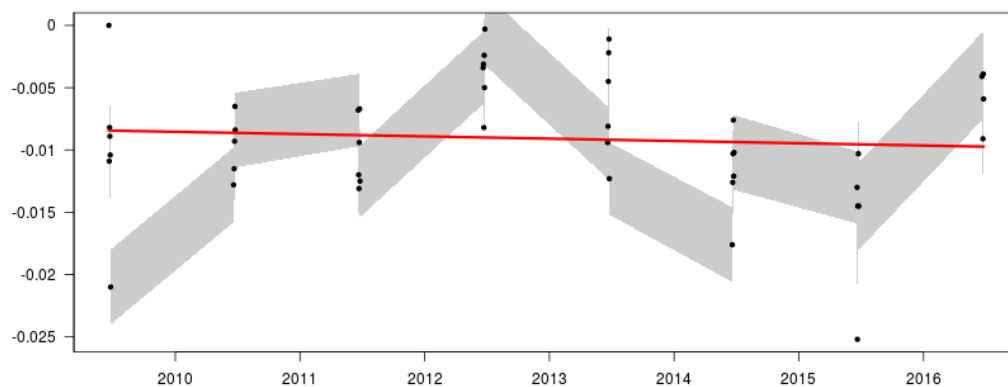


Figura 35. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Vertical en la estación LIJA.

Estación LOJA:

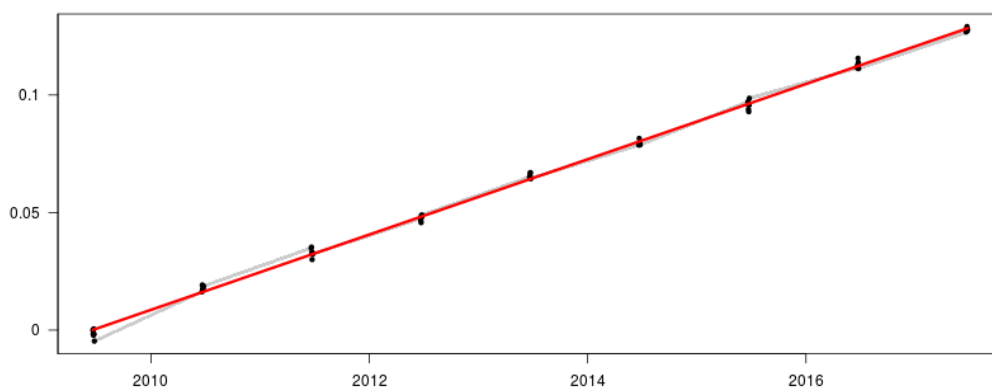


Figura 36. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Norte en la estación LOJA.

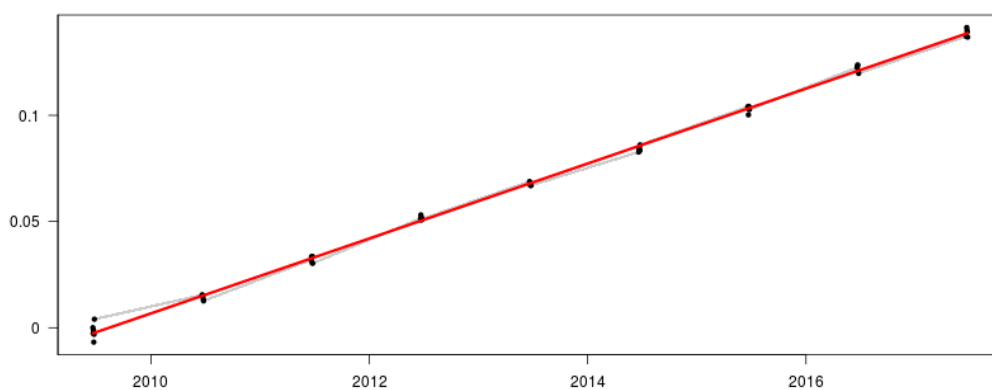


Figura 37. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Este en la estación LOJA.

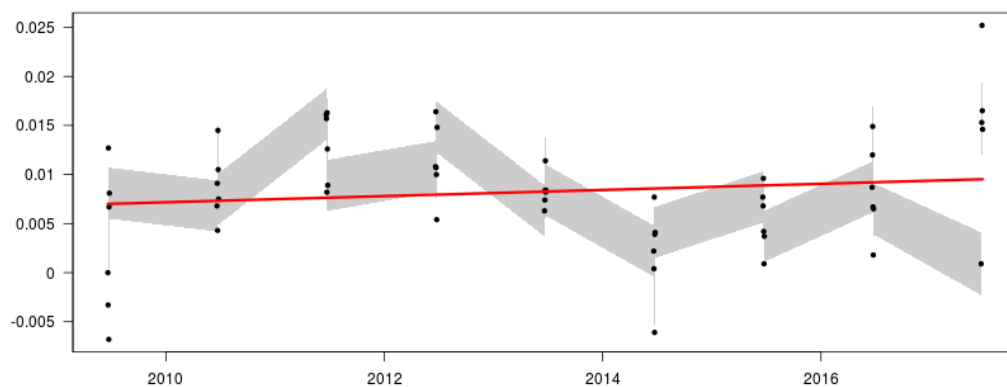


Figura 38. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Vertical en la estación LOJA.

Estación RUBI:

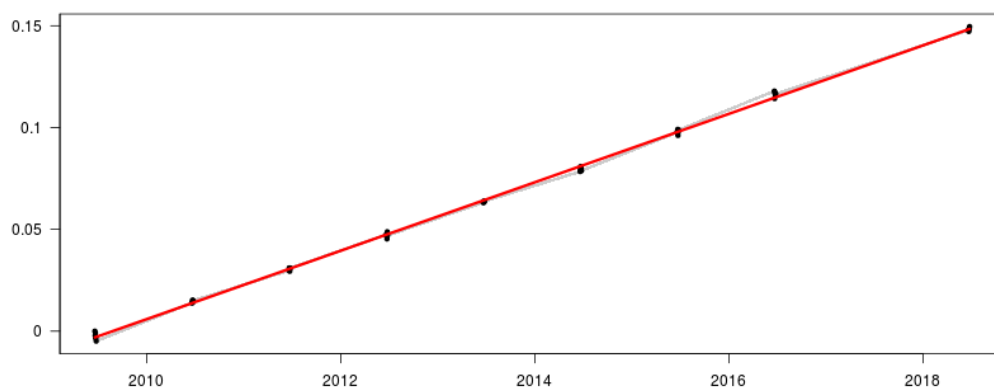


Figura 39. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Norte en la estación RUBI.

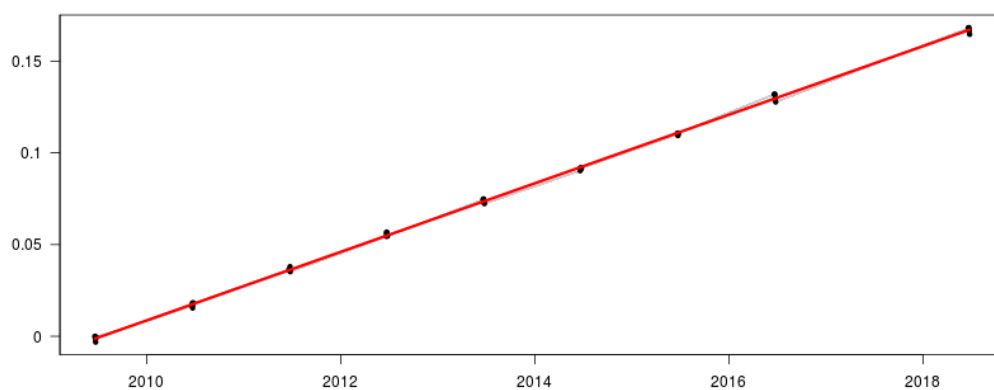


Figura 40. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Este en la estación RUBI.

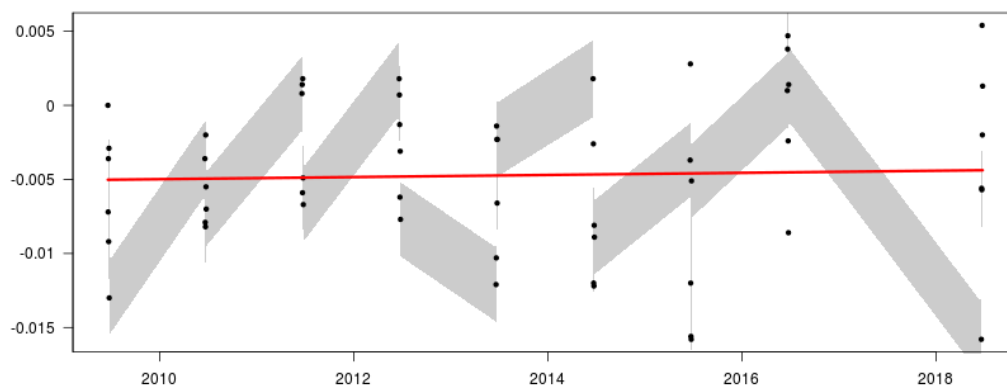


Figura 41. Recta de regresión lineal de la serie temporal de la componente Vertical en la estación RUBI.

### 6.3.3. Obtención de velocidades residuales

El marco ITRF está basado en una combinación de posiciones de estaciones y velocidades proporcionadas por técnicas geodésicas espaciales y permite la determinación de velocidades absolutas precisas de las principales placas tectónicas. En cada una de sus materializaciones, se incluye un Modelo de Movimiento de Placa. Gracias a esta cuantificación, existen implementaciones de marcos de referencia continentales como ETRF, donde el polo de rotación de la placa a menudo forma parte de sus definiciones.

En nuestro caso, nos interesa el valor de la velocidad angular euroasiática para la materialización ITRF2014 (Altamimi et al., 2017), que se dispone en la Tabla 4:

|            |                |
|------------|----------------|
| $\omega_X$ | -0.085 mas/año |
| $\omega_Y$ | -0.531 mas/año |
| $\omega_Z$ | 0.770 mas/año  |

Tabla 4. Velocidad angular de la placa euroasiática en el Modelo de Movimiento de Placa de la materialización ITRF2014

Si eliminásemos el efecto producido por el movimiento de la placa a las velocidades absolutas dispuestas en la Tabla 3, obtendríamos las velocidades residuales. Por lo tanto, los resultados quedarían afectados únicamente por los procesos intraplaca. Esta operación, llevada a la práctica, es conseguida a través de (6.22).

$$\begin{bmatrix} V_{Nr} \\ V_{Er} \\ V_{Ur} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{N_0} \\ V_{E_0} \\ V_{U_0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\sin \varphi \cdot \cos \lambda & -\sin \varphi \cdot \sin \lambda & \cos \varphi \\ \cos \varphi \cdot \cos \lambda & \cos \varphi \cdot \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & Z & -Y \\ -Z & 0 & X \\ Y & -X & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Donde las componentes XYZ se corresponden con las coordenadas ITRF2014 del primer punto de cada una de las estaciones; y  $(\varphi, \lambda)$  se corresponden con sus coordenadas geodésicas correspondientes. Una vez más, se desarrollará en MATLAB, mediante 'Z\_Programa3.m' y los resultados alcanzados, se exportarán en un fichero txt. En este documento, exponemos los resultados en la Tabla 5.

| ESTACIÓN | Velocidades residuales |       |       |
|----------|------------------------|-------|-------|
|          | (mm yr <sup>-1</sup> ) |       |       |
|          | N                      | E     | U     |
| ALJI     | 0.26                   | -3.40 | -8.9  |
| CAST     | 0.39                   | -1.50 | -0.57 |
| LIJA     | 0.85                   | -2.44 | -0.23 |
| LOJA     | -0.54                  | -2.25 | -0.36 |
| RUBI     | 0.26                   | -0.82 | 0.02  |

Tabla 5. Velocidades residuales de las estaciones del proyecto contenidos en el archivo .txt exportado. Este proceso se ha llevado a cabo con la ayuda del “Z\_Programa3.m” desarrollado en el Anexo I.

#### 6.4. Comparativa con los resultados de CGPS

Para hacer el análisis algo más exhaustivo, llevaremos a cabo una comparación entre las velocidades de deformación absolutas, obtenidas por medio de datos episódicos tomados anualmente; y las velocidades del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), obtenidas a través de mediciones GPS realizadas de manera continua, hasta el año 2013.

Para realizar esta comparativa debemos llevar a cabo una transformación entre marcos, ya que los resultados de las velocidades de referencia (ROA) vienen dadas en ITRF2008, mientras que las que hemos obtenidos nosotros están en ITRF2014. El procedimiento a realizar comenzará transformando nuestras coordenadas al marco ITRF2008, para después obtener sus velocidades y compararlas con las velocidades de referencia.

##### 6.4.1. Procesado y análisis del ROA

Las series analizadas por ROA presentan una colección hasta 26 estaciones CGPS (medición continua de GPS) del proyecto Topolberia. Desde finales de 2008, la red Topoiiberia se encontraba completamente operativa, y fue a partir de ahí cuando se comenzaron a procesar series temporales de manera continua durante un período de tiempo de 4 años. Este período se consideró suficientemente largo para obtener resultados estadísticamente significativos y para evitar problemas de correlación de parámetros.

La principal característica que debemos tener en cuenta es que se nos ofrecen velocidades horizontales (mm/año) dadas en el marco ITRF2008. Este procesado se realizó con el software GIPSY-OASIS, y fue llevado a cabo en el Observatorio Naval de San Fernando.

La mayor ventaja del procesado de datos continuos es la rapidez del análisis, ya que no necesita combinar líneas de base para las diferentes estaciones incluidas en la solución y suele tardar menos de un minuto en analizar cada fichero de estación. En caso de tener que añadir una nueva estación a la solución habiendo realizado ya el primer análisis, no sería necesario repetir el cálculo de toda la red. Esto es importante, sobre todo tratándose de estas observaciones, que estarán continuamente renovándose. Respecto a errores del análisis de los ficheros de información de una estación, no afectarán a los resultados de estaciones próximas analizadas (Real instituto y Observatorio de la Armada, 2017).

Acumulando soluciones de posicionales diarias, se generaron series temporales para cada una de las coordenadas en cuestión, que a su vez generarán velocidades de deformación, tal y como se ha procedido en este trabajo. En este caso, las velocidades se obtuvieron tras un análisis de series temporales con el paquete Create and Analyze Time Series (CATS). Los resultados que se obtuvieron se presentan en la Tabla 6. Se tuvieron en cuenta los efectos de estación y los saltos de antena para obtener resultados precisos.

|      | VELOCIDADES    |               |
|------|----------------|---------------|
|      | Norte (mm/año) | Este (mm/año) |
| ALJI | 16.09          | 15.77         |
| CAST | 16.73          | 17.68         |
| LIJA | 16.57          | 16.90         |
| LOJA | 16.99          | 16.82         |
| RUBI | 16.18          | 18.46         |

Tabla 6. Velocidades absolutas obtenidas por el procesado ROA en las estaciones de nuestro proyecto.

#### 6.4.2. Diferencias obtenidas

Para obtener las diferencias entre los dos conjuntos de coordenadas, comenzaremos transformando nuestras coordenadas a ITRF2008 mediante

'Z\_Programa4.m'. Además, en este programa volveremos incorporar la transformación al sistema geodésico local implementada ya en 'Z\_Programa2.m'.

En lo referente a la transformación entre marcos de referencia, nos vamos a apoyar en el documento que se proporciona en la web del ITRF (<http://itrf.ensg.ign.fr/>), referente a los parámetros de transformación de ITRF2014 a anteriores ITRF. Estos parámetros vienen dispuestos en la Tabla 7, y son los correspondientes al vector de traslación, el factor de escala, y la matriz de rotación. Sus velocidades vienen dispuestas junto a ellos en la columna Rates.

|          | Parámetros |              | Rates |
|----------|------------|--------------|-------|
| Tx (mm)  | 1.6        | Tx (mm/año)  | 0.00  |
| Ty (mm)  | 1.9        | Ty (mm/año)  | 0.00  |
| Tz (mm)  | 2.4        | Tz (mm/año)  | -0.1  |
| D (ppb)  | -0.02      | D (ppb/año)  | 0.03  |
| Rx (mas) | 0          | Rx (mas/año) | 0     |
| Ry (mas) | 0          | Ry (mas/año) | 0     |
| Rz (mas) | 0          | Rz (mas/año) | 0     |

Tabla 7. Parámetros de transformación de ITRF2014 a ITRF2008 calculados para la época 2010.0, ofrecidos por el organismo ITRF a través de su web: <http://itrf.ensg.ign.fr/>.

Estos parámetros se han derivado de los ya fueron publicados en las Notas Técnicas de IERS y en los Informes anuales. Los parámetros de transformación deben usarse según lo dispuesto en (6.23).

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

En esta ecuación, el vector (X, Y, Z) son las coordenadas dadas en ITRF2014, y el vector (Xs, Ys, Zs) son las coordenadas dadas en el marco deseado. Los demás componentes son el vector de traslación (Tx, Ty, Tz) y la matriz 3x3, que incorpora los parámetros de rotación (Rx, Ry, Rz) y el factor de escala (D).

Algo a tener muy en cuenta, es la época de observación, ya que los parámetros que se ofrecen vienen dados en la época 2010.0. En caso de que no sea la época

de referencia de nuestras coordenadas, debemos trasladar los parámetros de transformación a la época deseada mediante (6.21).

$$P(t) = P(2010.0) + \dot{P} \cdot (t - 2010.0) \quad (6.24)$$

Donde  $P(t)$  será el parámetro en la época deseada, y  $\dot{P}$  será la velocidad asociada al parámetro. Además, seremos cautos respecto a las unidades con las que introduzcamos cada uno de los valores en (6.20), ya que los valores de coordenadas vendrán dados en metros.

Obtenidas las coordenadas ITRF2008, realizaremos la transformación al Sistema Geodésico Local (ENU) y obtendremos las velocidades horizontales (correspondientes a las componentes Norte y Este) a través de SARI, tal y como hicimos en su momento con las coordenadas ITRF2014. A partir de estas velocidades, hallaremos las diferencias con respecto a las velocidades de referencia (ROA). Éstas vienen dispuestas en la Tabla 8.

|      | VELOCIDADES PROYECTO |               | DIFERENCIAS    |               |
|------|----------------------|---------------|----------------|---------------|
|      | Norte (mm/año)       | Este (mm/año) | Norte (mm/año) | Este (mm/año) |
| ALJI | 16.77                | 16.01         | 0.68           | 0.24          |
| CAST | 16.98                | 17.70         | 0.25           | 0.02          |
| LIJA | 17.49                | 17.19         | 0.92           | 0.29          |
| LOJA | 16.00                | 17.63         | -0.99          | 0.81          |
| RUBI | 16.81                | 18.68         | 0.63           | 0.22          |

Tabla 8. Diferencias de coordenadas Norte y Este, entre las velocidades absolutas obtenidas en este proyecto y las obtenidas por el ROA con datos de observación continua.

Las diferencias obtenidas entre resultados de observaciones continuas de GPS y datos episódicos son poco significativos, ya que en ningún caso llega a superar el milímetro de diferencia.

En las estaciones LOJA y LIJA se obtienen los valores máximos (0.92 y -0.99 respectivamente). Curiosamente ambas son las más cercanas a la depresión del Guadalquivir, por lo que podemos achacar a esa zona un desplazamiento menos continuo y más irregular.

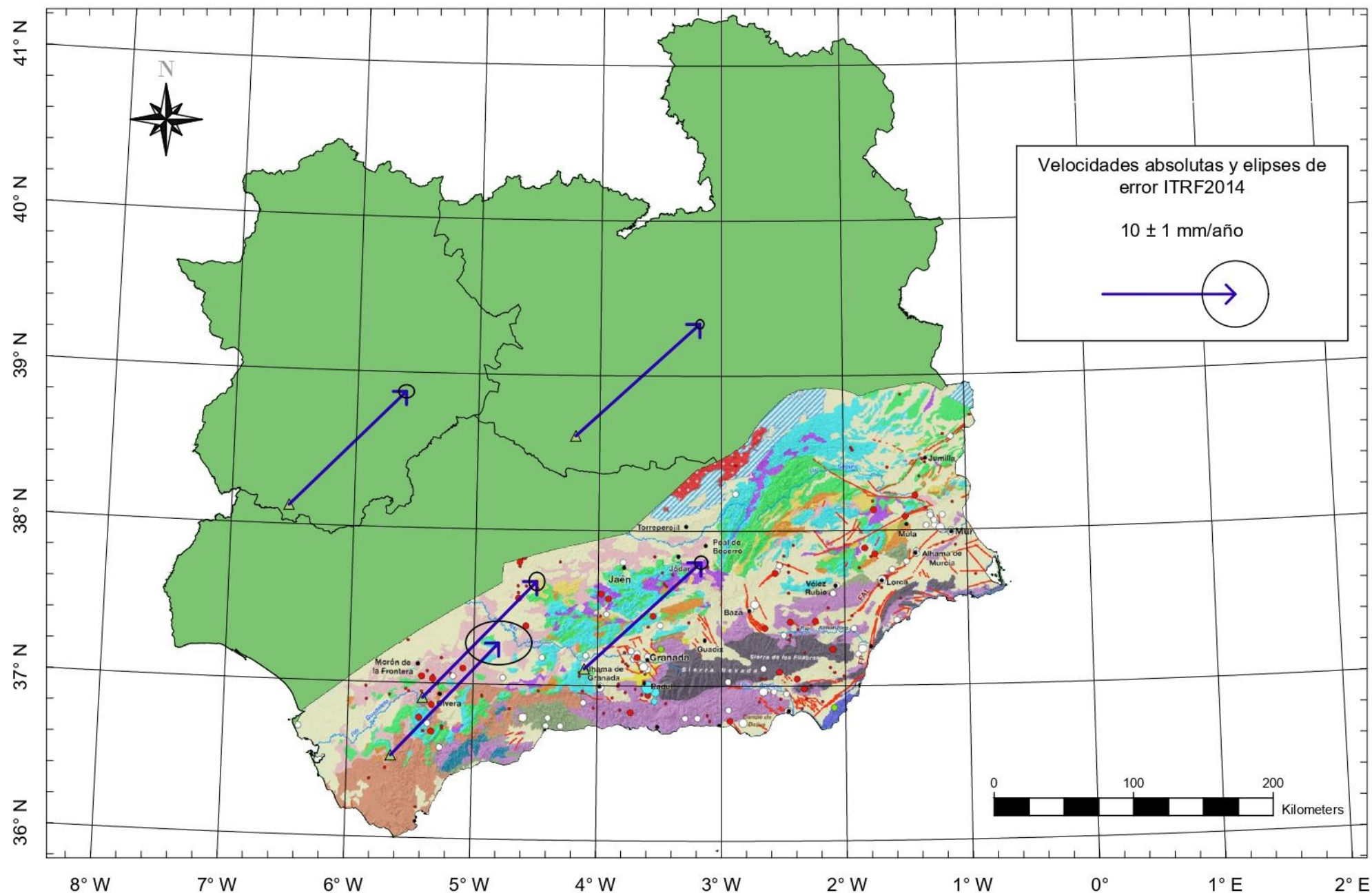
## **6.5. Interpretación de los resultados obtenidos**

*6.5.1. Mapa de velocidades absolutas (ITRF2014). (Figura 42).*

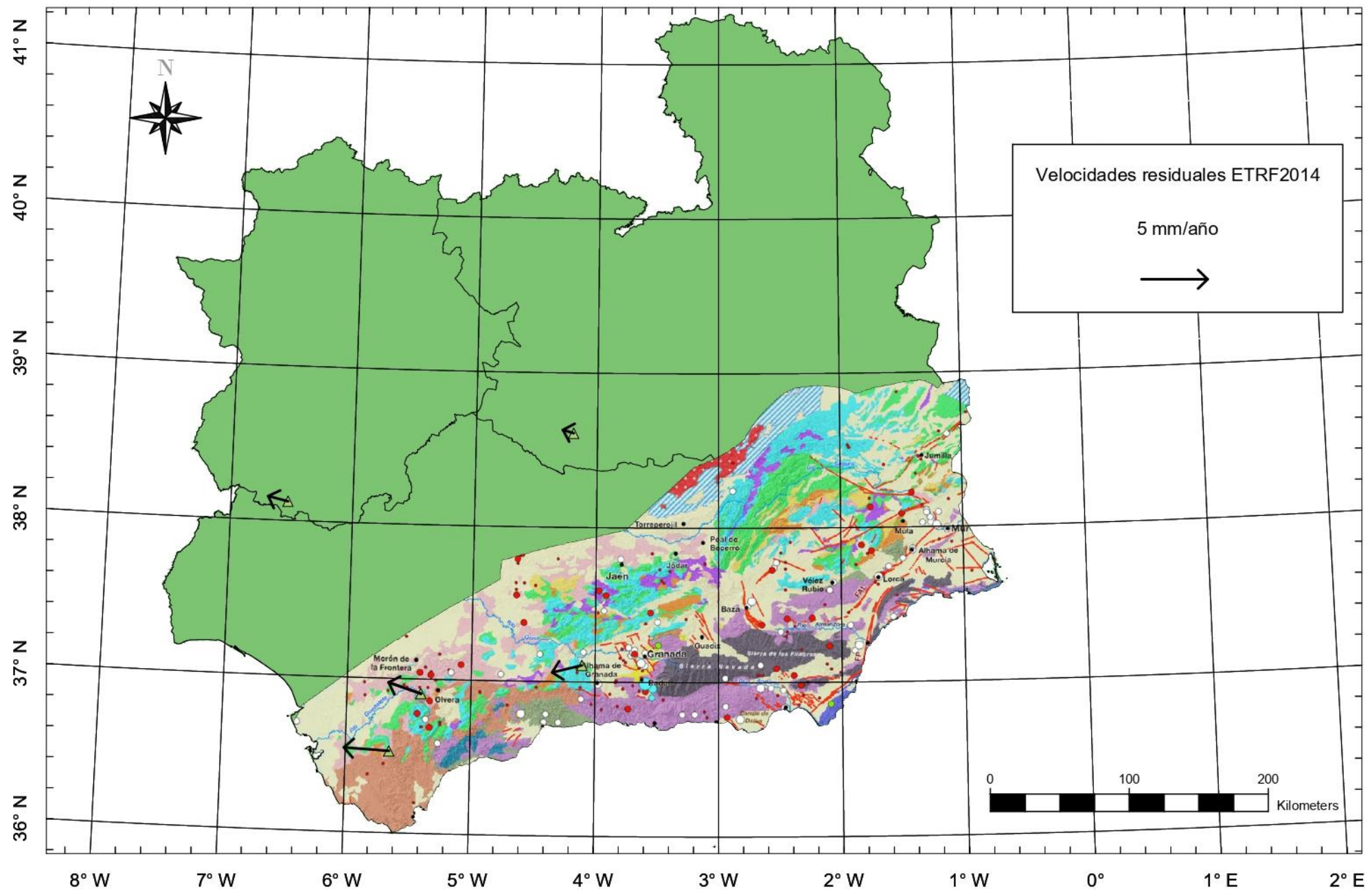
*6.5.2. Mapa de velocidades residuales (ETRF2014). (Figura 43).*

*6.5.3. Mapa de velocidades absolutas (ITRF2008). (Figura 44).*

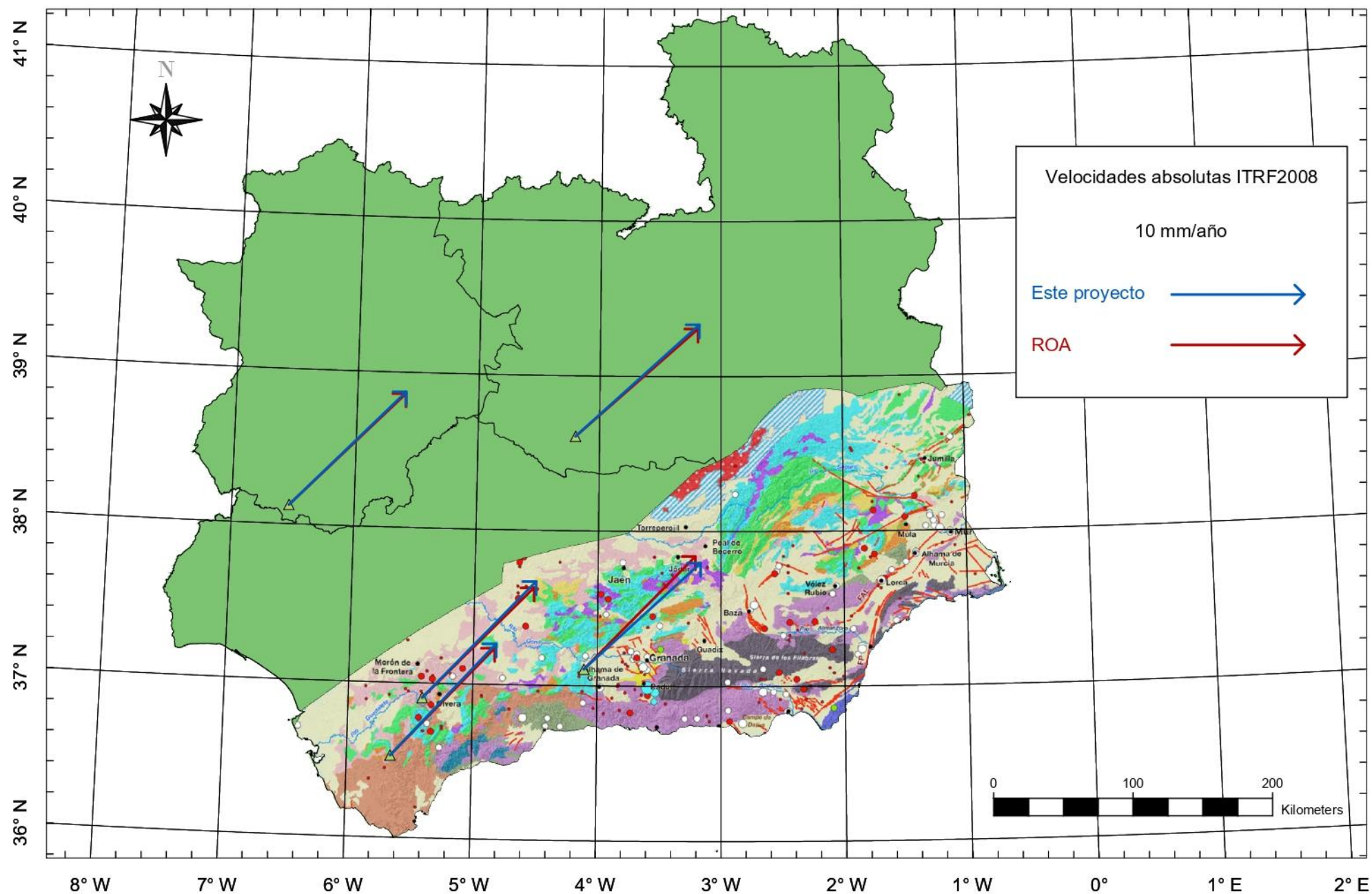
# MAPA DE VELOCIDADES ABSOLUTAS ITRF2014



# MAPA DE VELOCIDADES RESIDUALES



# MAPA DE VELOCIDADES ABSOLUTAS ITRF2008



## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para enfocar la obtención de unas conclusiones determinantes que describan el movimiento de las estaciones de nuestro proyecto a lo largo del tiempo, es crucial tener en cuenta las estructuras geológicas que intervienen tanto en las Cordilleras Béticas como alrededor de ellas. A modo de visión general, se observa que nos situamos en el límite de placas. Nuestras estaciones están todas ellas situadas en la primera, y dividiéndose ésta en dos estructuras montañosas: el Macizo Ibérico (CAST y RUBI) y las Cordilleras Béticas (ALJI, LIJA y LOJA); y a su vez, las Cordilleras Béticas poseen varias subdivisiones: Mientras que las estaciones de ALJI y LIJA se encuadran dentro de la Cordillera Penibética, la estación de LOJA está en la Cordillera Subbética. Aunque sea algo evidente, es necesario prestar atención a la longitud ( $\lambda$ ) de las estaciones. Esto nos indicará si se encuentran en una zona más occidental o más oriental.

Prestaremos especial atención a las componentes planimétricas de las velocidades. La componente vertical ha sido determinada, pero su estudio no tendrá tanto interés, ya que sus valores suelen llevar asociadas incertidumbres demasiado altas en este tipo de series episódicas. Por ello, usaremos las representaciones cartográficas bidimensionales obtenidas en el apartado 6.5., que nos ayudarán a obtener unas buenas conclusiones. En caso de que no se llegase a ninguna idea convincente mediante la visualización de un campo vectorial, siempre podremos acudir a: Tabla 3, Tabla 5, Tabla 6, y Tabla 8.

Las velocidades absolutas obtenidas en el marco ITRF2014 y reproducidas mediante la Figura 42. ofrecen una clara uniformidad, es decir, todas ellas están representadas con vectores de longitudes y direcciones muy similares. Esto es debido a que estas velocidades contienen fundamentalmente el movimiento de la placa Euroasiática en esta zona. Cuando acudimos a la Tabla 3, tan solo confirmamos que estas velocidades absolutas no presentan ni diferencia numérica, ni relación entre ellas. La mayor diferencia que presentan estas velocidades entre el máximo y el mínimo de sus componentes planimétricas es de 1.6 mm/año.

Por el contrario, si nos fijamos en las incertidumbres asociadas, si que obtenemos información más consistente. Las elipses representadas crecen a

medida que acercamos al sur, y especialmente al oeste. Por lo general, los valores de incertidumbre no presentan resultados desmesurados, en torno a los  $\pm 0.1$  mm/año en planimetría, y en torno a los  $\pm 0.3-0.5$  mm/año en altimetría. Sin embargo, la estación de ALJI es una excepción, habiéndose llegado incertidumbres del orden de  $\pm 0.33$  mm/año para la componente N,  $\pm 0.5$  mm/año para la componente E y  $\pm 1.94$  mm/año para la componente U. Tras varias comprobaciones y repetidos análisis del proceso llevado a cabo, no se encontró ninguna evidencia que explicase estas cifras. Al revisar estudios semejantes, hemos comprobado que esta estación suele presentar siempre valores de incertidumbre similares. Mencionado esto, probablemente este hecho esté relacionado con problemas de asentamiento del monumento de la señal.

Las velocidades residuales son realmente útiles para estudiar el efecto de los procesos intraplaca. Es decir, elimina por completo la tectónica entre placas. En la Figura 43 se aprecia una clara diferencia entre las magnitudes de los vectores obtenidos en las estaciones del Macizo Ibérico, y los obtenidos en las Cordilleras Béticas. Esto quiere decir que en las estaciones situadas al sur van a darse movimientos con algo de significancia. No supondrán motivo de alarma, pero a la larga, su tendencia será motivo de estudio para estabilización de laderas, control de seísmos, o detección de cualquier otro riesgo medioambiental. Es necesario recalcar que numéricamente estamos hablando de que en CAST tan solo existe un desplazamiento planimétrico de 1.5 mm/año y en RUBI inferior al mm/año. En las estaciones de LIJA y LOJA existen unos valores algo más altos en torno a los 2-2.5 mm/año de desplazamiento planimétrico. En ALJI se alcanza el máximo sorprendiendo los -3.40 mm/año de la componente E, reforzando la idea expuesta anteriormente relacionada con los problemas de asentamiento y no con la tectónica de placas.

Atendiendo a la dirección de los vectores, dependiendo de la subdivisión de las Cordilleras Béticas en la que se encuentren las estaciones, tendrán diferente orientación. Por ejemplo, podemos contemplar que mientras que en la parte más occidental (Cordillera Penibética), los vectores tienen dirección ONO; en la Cordillera Subbética, representada por la estación de LOJA, el vector tiene una dirección OSO.

Por último, vamos a comprobar la calidad de este estudio mediante la comparación con datos de observación continua. Gráficamente, se ha representado en la Figura 44. En ella se ven representados dos vectores de velocidades absolutas, por cada estación: Uno azul, que corresponde a la velocidad obtenida en este proyecto, y uno rojo, que corresponde a la velocidad obtenida por el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA). Ésta última, al obtenerse mediante observación continua durante al menos cuatro años, será considerada de referencia. En este proyecto se han utilizado datos episódicos hasta 2018, mientras que en el caso del ROA, se trata de datos continuos hasta el año 2013. En la figura podemos observar que en la mayoría de las estaciones apenas existe diferencia. Tan solo en LOJA, podemos ver una pequeña diferencia evidente, que si acudimos a la Tabla 8 comprobamos que se trata de  $-0.99$  mm/año en la componente N y  $0.81$  mm/año en la componente E. Por lo tanto, si tuviésemos que realizar un seguimiento geodésico más persistente elegiríamos la estación de LOJA, al ser la estación que más diferencia presenta con respecto a los datos de observación continua.

## 8. PRESUPUESTO

En este capítulo se lleva a cabo la realización de un presupuesto para el trabajo realizado. Supondremos que este estudio sobre la estimación de velocidades de deformación en un perfil de la Cordillera Bética ha sido encargado a una empresa, y desarrollado por un Ingeniero en Geomática y Topografía.

El estudio engloba solamente la parte de trabajo de gabinete debido a que no se ha necesitado trabajo de campo para la obtención de datos, si no que han sido cedidos por el interesado de este estudio. Se va a desarrollar en un período de 68 horas distribuidas en las tareas de: Estudio previo (8), procesado (10), cálculos (15), análisis (5), y redacción (30). Las 4 primeras serán los subcapítulos que compondrán el Capítulo 1 y la redacción estará asignada al Capítulo 2.

El trabajo de gabinete reúne todos los gastos que se ocasionan al realizar los cálculos y la elaboración de la memoria. En este sentido, debemos tener en cuenta tanto los honorarios por la realización del trabajo, como la compra del hardware y software necesarios.

## 8.1. Justificación de precios

### 8.1.1. Honorarios por la realización del trabajo de gabinete

Según el calendario laboral aprobado por la Junta de Andalucía para esta comunidad autónoma en el año 2020 hay un total de 248 días laborales (no se contarán ni domingos, ni sábados, ni días festivos; a los cuales se les suma otros 2 días festivos de carácter local que cada municipio debe proponer). Teniendo en cuenta que la jornada laboral es de 8 horas, se tienen un total de 1984 horas anuales laborales establecidas.

Como se ha indicado antes, el trabajo de gabinete será realizado por un único ingeniero, contratado por la empresa interesada. En ella cobraría un salario aproximado de 21897 € anuales (información salarial hipotética, obtenida a través de un promedio del salario para empleos de Topógrafo en 7 empresas españolas diferentes). Al tratarse de un titulado superior, cobrará un 30% más que el salario aproximado (28466 €). Con toda esta información ya se puede proceder al cálculo del coste horario (8.1):

$$\text{Coste Horario} = \frac{\text{Salario anual}}{\text{Horas anuales establecidas}} = \frac{28466 \text{ €/año}}{1984 \text{ h/año}} = 14.35 \text{ €/h} \quad (8.1)$$

El coste horario del ingeniero sería de 14.35 €/hora.

### 8.1.2. Gastos en licencias del software

Con vistas de futuro, pagaremos licencias anuales de cada uno de los software utilizados, aunque para el cálculo del presupuesto nos interese el coste horario de cada una de ellas. Tanto el coste total de cada licencia como el coste por hora vendrán dados en la Tabla 9:

| GASTOS EN LICENCIAS |          |                                    |                        |
|---------------------|----------|------------------------------------|------------------------|
| PROGRAMA            | CAPÍTULO | COSTE DE LA LICENCIA ANUAL (€/año) | COSTE HORARIO (€/hora) |
| MATLAB              | C1       | 800                                | 0,40                   |
| AUTOCAD             | C1       | 509                                | 0,26                   |
| MICROSOFT OFFICE    | C2       | 50,4                               | 0,03                   |

Tabla 9. Coste total/anual y coste horario que se corresponden con el gasto efectuado en licencias de software.

### 8.1.3. Gastos en hardware

Se considera que para realizar el trabajo es necesario un ordenador (con un precio estimado de 750€) con el que realizar las operaciones de estudio previo,

procesado, cálculo, análisis y redacción. De la misma manera que en el caso anterior, vamos a realizar el cálculo del coste horario (Tabla 10), que es el que nos interesará para realizar el presupuesto.

| GASTOS EN HARDWARE |           |                 |                        |
|--------------------|-----------|-----------------|------------------------|
| HARDWARE           | CAPÍTULOS | COSTE TOTAL (€) | COSTE HORARIO (€/hora) |
| COMPUTADORA        | C1 Y C2   | 750,00          | 0,38                   |

Tabla 10. Coste total y coste horario que se corresponden con el gasto efectuado en hardware.

## 8.2. Presupuesto de Ejecución Material

### 8.2.1. Capítulo 1

En este capítulo, como ya se adelantó anteriormente, se van a encuadrar los subcapítulos de estudio previo (8 horas), procesado (10 horas), cálculo (15 horas), y análisis (5 horas). En total suman un total de 38 horas para este capítulo. En todas ellas se precisará de un operario titulado en ingeniería geomática y topográfica que trabajará con un ordenador. La fase de cálculo la realizará desde MATLAB, y para la parte de análisis se necesitará contar con una licencia de Autocad. En la Tabla 11 se desglosan los costes parciales de cada uno de los elementos y el coste total del Capítulo 1:

| CAPÍTULO 1: ESTUDIO PREVIO, PROCESADO, CÁLCULOS Y ANÁLISIS |                     |        |   |                  |
|------------------------------------------------------------|---------------------|--------|---|------------------|
|                                                            | PRECIO UNITARIO (€) | UNIDAD |   | PRECIO TOTAL (€) |
| INGENIERO EN GEOMÁTICA                                     | 14,35               | 38     | h | 545,22           |
| COMPUTADORA                                                | 0,38                | 38     | h | 14,36            |
| LICENCIA MATLAB                                            | 0,40                | 15     | h | 6,05             |
| LICENCIA AUTOCAD                                           | 0,26                | 5      | h | 1,28             |
|                                                            |                     |        |   | 566,91           |

Tabla 11. Desglose del Capítulo 1: "Estudio, procesado, cálculos y análisis".

### 8.2.2. Capítulo 2

Este capítulo consiste únicamente en la redacción del proyecto y constará de 30 horas. En ellas, el operario volverá a trabajar en el ordenador, que esta vez precisará de Microsoft Office. En la Tabla 12 se desglosan los costes parciales de cada uno de los elementos y el coste total del Capítulo 2:

| CAPÍTULO 2: REDACCIÓN DEL PROYECTO |                     |        |   |                  |
|------------------------------------|---------------------|--------|---|------------------|
|                                    | PRECIO UNITARIO (€) | UNIDAD |   | PRECIO TOTAL (€) |
| INGENIERO EN GEOMÁTICA             | 14,35               | 30     | h | 430,43           |
| COMPUTADORA                        | 0,38                | 30     | h | 11,34            |
| LICENCIA MICROSOFT OFFICE          | 0,03                | 30     | h | 0,76             |
|                                    |                     |        |   | 442,54           |

Tabla 12. Desglose del Capítulo 2: "Redacción del proyecto".

El Presupuesto de Ejecución Material (PEM) (8.2) será la suma de ambos capítulos:

$$PEM = C1 + C2 = 566.91\text{€} + 442.54\text{€} = 1009.45\text{€} \quad (8.2)$$

El Presupuesto de Ejecución Material del presente proyecto asciende a la cantidad de mil nueve con cuarenta y cinco céntimos.

### 8.3. Presupuesto Total

El presupuesto total (8.4) que cuesta el proyecto se calcula aplicándole el Impuesto de Valor Añadido (IVA), cuyo valor es el 21%, al Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC).

Para obtener el PEC (8.3), se suman los valores del Presupuesto de Ejecución Material (PEM), los Gastos Generales (GG) y el Beneficio Industrial (BI). Para los GG y el BI se considerarán respectivamente un 20% y un 6% del PEM:

$$PEC = PEM + GG + BI = 1009.45\text{€} + 201.89\text{€} + 60.57\text{€} = 1271.91\text{€} \quad (8.3)$$

$$Presupuesto\ Total = PEC + IVA = 1271.91\text{€} + 267.10 = 1539.01\text{€} \quad (8.4)$$

El Presupuesto Total del presente proyecto asciende a la cantidad de mil quinientos treinta y nueve con un céntimo.

## 9. REFERENCIAS

Altamimi, Z. (2018). EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems EUREF.

Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. (2011). ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457–473.

Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., & Collilieux, X. (2017). ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209(3), 1906–1912.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131.

Berné Valero, J. L., Anquera Julián, A. B., & Garrido Villén, N. (2014). GNSS. GPS: Fundamentos y aplicaciones en geomática. Universitat Politècnica de València.

Bruyninx, C., Legrand, J., Fabian, A., & Pottiaux, E. (2019). GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*, 23(4), 1–14.

Gárate, J., Martín-Dávila, J., Khazaradze, G., Echeverría, A., Asensio, E., Gil, A. J., de Lacy, M. C., Armenteros, J. A., Ruiz, A. M., Gallastegui, J., Álvarez-Lobato, F., Ayala, C., Rodríguez-Caderot, G., Galindo-Zaldívar, J., Rimi, A., & Harnafi, M. (2015). Topo-Iberia project: CGPS crustal velocity field in the Iberian Peninsula and Morocco. *GPS Solutions*, 19(2), 287–295.

González-Castillo, L., Galindo-Zaldívar, J., de Lacy, M. C., Borque, M. J., Martínez-Moreno, F. J., García-Armenteros, J. A., & Gil, A. J. (2015). Active rollback in the Gibraltar Arc: Evidences from CGPS data in the western Betic Cordillera. *Tectonophysics*, 663, 310–321.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Walse, E. (2008). GNSS — Global Navigation Satellite Systems. In *GNSS — Global Navigation Satellite Systems*. Springer Vienna.

Lonergan, L., & White, N. (1997). Origin of the Betic-Rif mountain belt. *Tectonics*, 16(3), 504–522.

Morency, C. (2004). Numerical simulations of the mantle lithosphere delamination. *Journal of Geophysical Research*, 109(B3).

Moritz, H. (1980). Geodetic reference system 1980. *Bulletin Géodésique*, 54(3), 395–405.

Platt, J. P., & Vissers, R. L. M. (1989). Extensional collapse of thickened continental lithosphere: a working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar arc. *Geology*, 17(6), 540–543.

Real instituto y Observatorio de la Armada. (2017). Investigaciones científicas desarrolladas por el Real instituto y Observatorio de la Armada. Año 2015.

Santamaría-Gómez, A. (2019). SARI: interactive GNSS position time series analysis software. *GPS Solutions*, 23(2), 1–6.

Seber, D., Barazangi, M., Ibenbrahim, A., & Demnati, A. (1996). Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alborean Sea and Rif-Betic mountains. *Nature*, 379, 785–290.

Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy. In *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter.

Vera Torres, J. A., Gallegos Díaz, J. A., & Roca Roca, A. (1983). *Geologia* (Edelvives).

**Sitios web:**

[https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag\\_sismotectonicas/bet\\_oeste.html](https://www.ign.es/web/resources/sismologia/tproximos/sismotectonica/pag_sismotectonicas/bet_oeste.html)

<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

<https://apps.gdgps.net/>

<http://itrf.ensg.ign.fr/>

## ANEXO I: Arreglos con programación MATLAB

## Z\_Programa0.m

```
% ESTE PROGRAMA NOS AYUDA EN LA TAREA DE DETECCIÓN DE LOS OFFSET
% DE ANTENA, EXPORTANDO ESTA INFORMACIÓN DE LOS ARCHIVOS RINEX
% A UNA HOJA EXCEL.

% Para ejecutar el programa debemos asegurarnos que los archivos
% rinex de cada día poseen extensión .txt y están contenidos
% en las carpetas correspondientes a cada una de las estaciones.

% Las carpetas de cada una de las estaciones deben estar en el mismo
% directorio que Z_Programa0.

% En primer lugar el programa selecciona la estación en la trabajará

MyFolderInfo=dir

j=3

for j=3:(length(MyFolderInfo)-1)

    cd (MyFolderInfo(j).name)

    ds = tabularTextDatastore (cd)

    i=0

    % Cuando se encuentra dentro del directorio de la carpeta de la
    % estación seleccionada, comienza a leer los archivos rinex.

    for i=1:length(ds.Files)

        Ficheros(i,1)=ds.Files(i)

        fileID = fopen(Ficheros{i});
        C = textscan(fileID,'%s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s %s');
        fclose(fileID);
        whos C

        % Debemos transformar los valores de fecha a números reales para
        % expresar la época correctamente

        day=str2double(C{3}{21})
        month=str2double(C{2}{21})
        year=str2double(C{1}{21})

        if mod(year,4)==0
            switch month
                case 1
                    epoch=year
                        +((day-0.5)/366)
                case 2
                    epoch=year+((31
                        +day-0.5)/366)
                case 3
                    epoch=year+((31+29
```

```

        +day-0.5)/366)
    case 4
        epoch=year+((31+29+31
        +day-0.5)/366)
    case 5
        epoch=year+((31+29+31+30
        +day-0.5)/366)
    case 6
        epoch=year+((31+29+31+30+31
        +day-0.5)/366)
    case 7
        epoch=year+((31+29+31+30+31+30
        +day-0.5)/366)
    case 8
        epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31
        +day-0.5)/366)
    case 9
        epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31
        +day-0.5)/366)
    case 10
        epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31+30
        +day-0.5)/366)
    case 11
        epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31+30+31
        +day-0.5)/366)
    case 12
        epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31+30+31+30
        +day-0.5)/366)
    end
else
    switch month
    case 1
        epoch=year
        +((day-0.5)/365)
    case 2
        epoch=year+((31
        +day-0.5)/365)
    case 3
        epoch=year+((31+28
        +day-0.5)/365)
    case 4
        epoch=year+((31+28+31
        +day-0.5)/365)
    case 5
        epoch=year+((31+28+31+30
        +day-0.5)/365)
    case 6
        epoch=year+((31+28+31+30+31
        +day-0.5)/365)
    case 7
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30
        +day-0.5)/365)
    case 8
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31
        +day-0.5)/365)
    case 9
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31
        +day-0.5)/365)
    case 10
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31+30
        +day-0.5)/365)

```

```

        case 11
            epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31+30+31
            +day-0.5)/365)
        case 12
            epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31+30+31+30
            +day-0.5)/365)
        end
    end

    %    Asociados a la época de observación, extraeremos los datos del
    %    tipo y el código que lleva asociados la antena en cada
    %    observación, que se irán rellenando a lo largo de varios
    %    vectores.

    Resultados{1,1}{i,1}=epoch
    Resultados{1,2}{i,1}=C{1}{12}
    Resultados{1,3}{i,1}=C{2}{12}
    Resultados{1,4}{i,1}=C{1}{13}
    Resultados{1,5}{i,1}=C{2}{13}

    i=i+1

end

%    Se crea una matriz con los vectores anteriores y se exporta una hoja
%    excel por cada estación.

Matriz(:,1)=(Resultados{1,1})
Matriz(:,2)=(Resultados{1,2})
Matriz(:,3)=(Resultados{1,4})
Matriz(:,4)=(Resultados{1,3})
Matriz(:,5)=(Resultados{1,5})

writecell(Matriz,strcat(strcat('Antenas_',MyFolderInfo(j).name),'.xls'))

cd ../

clearvars -except j    i    ds    MyFolderInfo

j=j+1

end

```

**Z\_Programa1.m**

```

%      CON ESTE PROGRAMA SE VAN A CREAR SERIES TEMPORALES A PARTIR
%      DE ARCHIVOS .STACOV CON DATOS PROCESADOS.

%      Para ejecutar el programa debemos asegurarnos que los archivos
%      procesados de cada día poseen extensión .txt y están contenidos
%      en las carpetas correspondientes a cada una de las estaciones.

%      Las carpetas de cada una de las estaciones deben estar en el mismo
%      directorio que Z_Programa1.

%      En primer lugar el programa selecciona la estación en la trabajará

MyFolderInfo=dir

j=3

for j=3:(length(MyFolderInfo)-1)

    cd (MyFolderInfo(j).name)

    ds = tabularTextDatastore (cd)

    i=0

    %      Cuando se encuentra dentro del directorio de la carpeta de la
    %      estación seleccionada, comienza a leer los archivos procesados.

    for i=1:length(ds.Files)

        Ficheros(i,1)=ds.Files(i)

        fileID = fopen(Ficheros{i});
        C = textscan(fileID,'%s %s %s %s %s %s %s %s %s %s');
        fclose(fileID);
        whos C

        %      Debemos transformar los valores de fecha a números reales para
        %      expresar la época correctamente

        Resultados{1,1}{i,1}=C{4}{1}
        day=str2double(extractAfter(Resultados{1}{i},5))
        mes=extractBefore(extractAfter(Resultados{1}{i},2),4)
        switch mes
            case 'JAN'
                mes='01'
            case 'FEB'
                mes='02'
            case 'MAR'
                mes='03'
            case 'APR'
                mes='04'
            case 'MAY'
                mes='05'
            case 'JUN'
                mes='06'
            case 'JUL'
                mes='07'

```

```

        case 'AUG'
            mes='08'
        case 'SEP'
            mes='09'
        case 'OCT'
            mes='10'
        case 'NOV'
            mes='11'
        case 'DEC'
            mes='12'
    end
    month=str2double(mes)
    year=str2double(strcat('20',extractBefore(Resultados{1}{i},3)))

    if mod(year,4)==0
        switch month
            case 1
                epoch=year
                +((day-0.5)/366)
            case 2
                epoch=year+((31
                +day-0.5)/366)
            case 3
                epoch=year+((31+29
                +day-0.5)/366)
            case 4
                epoch=year+((31+29+31
                +day-0.5)/366)
            case 5
                epoch=year+((31+29+31+30
                +day-0.5)/366)
            case 6
                epoch=year+((31+29+31+30+31
                +day-0.5)/366)
            case 7
                epoch=year+((31+29+31+30+31+30
                +day-0.5)/366)
            case 8
                epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31
                +day-0.5)/366)
            case 9
                epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31
                +day-0.5)/366)
            case 10
                epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31+30
                +day-0.5)/366)
            case 11
                epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31+30+31
                +day-0.5)/366)
            case 12
                epoch=year+((31+29+31+30+31+30+31+31+30+31+30
                +day-0.5)/366)
        end
    else
        switch month
            case 1
                epoch=year
                +((day-0.5)/365)
            case 2
                epoch=year+((31
                +day-0.5)/365)

```

```

    case 3
        epoch=year+((31+28
        +day-0.5)/365)
    case 4
        epoch=year+((31+28+31
        +day-0.5)/365)
    case 5
        epoch=year+((31+28+31+30
        +day-0.5)/365)
    case 6
        epoch=year+((31+28+31+30+31
        +day-0.5)/365)
    case 7
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30
        +day-0.5)/365)
    case 8
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31
        +day-0.5)/365)
    case 9
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31
        +day-0.5)/365)
    case 10
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31+30
        +day-0.5)/365)
    case 11
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31+30+31
        +day-0.5)/365)
    case 12
        epoch=year+((31+28+31+30+31+30+31+31+30+31+30
        +day-0.5)/365)
    end
end

% Dependiendo de la posición que ocupen los elementos en el
% fichero de texto, se irán almacenando en distintos vectores
% columna correspondientes a la época, las coordenadas, las
% precisiones, y los coeficientes de correlación.

Resultados{1,1}{i,1}=epoch
Resultados{1,2}{i,1}=str2double(C{5}{2})
Resultados{1,3}{i,1}=str2double(C{5}{3})
Resultados{1,4}{i,1}=str2double(C{5}{4})
Resultados{1,5}{i,1}=str2double(C{7}{2})
Resultados{1,6}{i,1}=str2double(C{7}{3})
Resultados{1,7}{i,1}=str2double(C{7}{4})
Resultados{1,8}{i,1}=str2double(C{3}{5})
Resultados{1,9}{i,1}=str2double(C{3}{6})
Resultados{1,10}{i,1}=str2double(C{3}{7})

% Se calcularán además las varianzas y las covarianzas

Resultados{1,11}{i,1}=(Resultados{1,5}{i,1})^2

Resultados{1,12}{i,1}=(Resultados{1,6}{i,1})^2

Resultados{1,13}{i,1}=(Resultados{1,7}{i,1})^2

Resultados{1,14}{i,1}=(Resultados{1,8}{i,1})
    *(Resultados{1,5}{i,1})
    *(Resultados{1,6}{i,1})

```

```

Resultados{1,15}{i,1}=(Resultados{1,9}{i,1})
                        *(Resultados{1,5}{i,1})
                        *(Resultados{1,7}{i,1})

Resultados{1,16}{i,1}=(Resultados{1,10}{i,1})
                        *(Resultados{1,6}{i,1})
                        *(Resultados{1,7}{i,1})

i=i+1

end

Epoca=cell2mat (Resultados{1,1})
CoordX=cell2mat (Resultados{1,2})
CoordY=cell2mat (Resultados{1,3})
CoordZ=cell2mat (Resultados{1,4})
SigmaX=cell2mat (Resultados{1,5})
SigmaY=cell2mat (Resultados{1,6})
SigmaZ=cell2mat (Resultados{1,7})
CorrelacionXY=cell2mat (Resultados{1,8})
CorrelacionXZ=cell2mat (Resultados{1,9})
CorrelacionYZ=cell2mat (Resultados{1,10})

VarX=cell2mat (Resultados{1,11})
VarY=cell2mat (Resultados{1,12})
VarZ=cell2mat (Resultados{1,13})
CovXY=cell2mat (Resultados{1,14})
CovXZ=cell2mat (Resultados{1,15})
CovYZ=cell2mat (Resultados{1,16})

%      Finalmente se crearán dos matrices: La primera contendrá
%      los valores leídos de los archivos procesados, y la segunda
%      incorpora los valores de varianza y covarianza que nos servirán
%      para continuar con el Z_Programa2. Ambas se exportarán
%      en el mismo directorio que se han leído los archivos
%      procesados.

matriz=[Epoca CoordX CoordY CoordZ SigmaX SigmaY SigmaZ
        CorrelacionXY CorrelacionXZ CorrelacionYZ]

matrizampliada=[Epoca CoordX CoordY CoordZ SigmaX SigmaY SigmaZ
                VarX VarY VarZ CovXY CovXZ CovYZ]

writematrix
    (matriz,strcat(strcat('XYZ_',
        MyFolderInfo(j).name),'.dat'),'Delimiter','\t')

writematrix
    (matrizampliada,strcat(strcat('XYZ_COMPLETA_',
        MyFolderInfo(j).name),'.dat'),'Delimiter','\t')

cd ../

clearvars -except j      i      ds      MyFolderInfo

j=j+1

end

```

**Z\_Programa2.m**

```

%     ESTE PROGRAMA PERMITE LA OBTENCIÓN DE UNAS COORDENADAS EN EL
%     SISTEMA GEODÉSICO LOCAL A PARTIR DE COORDENADAS CARTESIANAS
%     GEOCÉNTRICAS.

%     Para ejecutar el programa debemos asegurarnos que los archivos
%     obtenidos de Z_Programa1 están en el mismo directorio que
%     Z_Programa2.

MyFolderInfo=dir

VarCov=zeros(6)

%     Se define la matriz Jacobiana, que será necesaria para el cálculo de
%     las matrices varianza-covarianza.

MatrizJacobiana=[-1 0 0 1 0 0; 0 -1 0 0 1 0; 0 0 -1 0 0 1]

ds = tabularTextDatastore (cd)

%     De la misma manera, se definirán varias variables que serán
%     necesarias para el cálculo de coordenadas geodésicas, como
%     por ejemplo el semieje mayor (a), o el cuadrado de la primera
%     excentricidad (e2).

i=1
j=3
a=6378137
e2=0.00669438
d=1

%     Al trabajar en otro directorio será necesario volver a leer
%     los archivos de cada estación.

for j=3:(length(MyFolderInfo)-1)

    Ficheros(j,1)=ds.Files(j-2)

    fileID = fopen(Ficheros{j});
    C = textscan(fileID,'%n %n %n %n %n %n %n %n %n %n %n %n %n');
    fclose(fileID);
    whos C

    Epoca= round(C{1},4)
    CoordX= C{2}
    CoordY= C{3}
    CoordZ= C{4}
    SigmaX= C{5}
    SigmaY= C{6}
    SigmaZ= C{7}
    VarX= C{8}
    VarY= C{9}
    VarZ= C{10}
    CovXY= C{11}
    CovXZ= C{12}
    CovYZ= C{13}

    matrizampliada=[Epoca CoordX CoordY CoordZ SigmaX SigmaY SigmaZ
                    VarX VarY VarZ CovXY CovXZ CovYZ]

```

```

X1=matrizampliada(1,2)
Y1=matrizampliada(1,3)
Z1=matrizampliada(1,4)

%      Se calcularán las coordenadas geodésicas del primer
%      punto, necesarias para la transformación al sistema
%      geodésico local de todas las demás. Se realizarán
%      iteraciones para el cálculo de la latitud hasta que
%      la diferencia entre el valor obtenidos y el de su
%      anterior iteración sea < 0.000000000000001.

fi=atan((Z1/(sqrt(X1^2+Y1^2)))*((1-e2)^(-1)))

while d>0.000000000000001
    fi0=fi
    N=((a)/sqrt(1-e2*(sin(fi)^2)))
    h=((sqrt(X1^2+Y1^2))/(cos(fi)))-N
    fi=atan((Z1/(sqrt(X1^2+Y1^2)))*((1-e2*((N)/(N+h)))^(-1)))
    d=abs(fi-fi0)
end

lambda=atan(Y1/X1)

%      La matriz H contendrá las rotaciones del sistema.

MatrizH=
[(-sin(fi)*cos(lambda)) (-sin(fi)*sin(lambda)) cos(fi);
(-sin(lambda)) cos(lambda) 0;
cos(fi)*cos(lambda) cos(fi)*sin(lambda) sin(fi)]

%      Conforme matlab vaya leyendo las filas de cada fichero de
%      estación, se irán rellenando paralelamente dos matrices:
%      Una 6x1 que contenga las coordenadas del primer punto y
%      del punto correspondiente, y otra 6x6 que contenga las
%      varianzas y covarianzas tanto del primer punto como
%      del punto correspondiente.

for i=1:size(matrizampliada,1)

    Coordinadasij=[matrizampliada(1,2);
                    matrizampliada(1,3);
                    matrizampliada(1,4);
                    matrizampliada(i,2);
                    matrizampliada(i,3);
                    matrizampliada(i,4)]

    VarCov11=matrizampliada(1,8)
    VarCov12=matrizampliada(1,11)
    VarCov13=matrizampliada(1,12)
    VarCov21=matrizampliada(1,11)
    VarCov22=matrizampliada(1,9)
    VarCov23=matrizampliada(1,13)
    VarCov31=matrizampliada(1,12)
    VarCov32=matrizampliada(1,13)
    VarCov33=matrizampliada(1,10)

    VarCov44=matrizampliada(i,8)
    VarCov45=matrizampliada(i,11)
    VarCov46=matrizampliada(i,12)
    VarCov54=matrizampliada(i,11)
    VarCov55=matrizampliada(i,9)

```

```

VarCov56=matrizampliada(i,13)
VarCov64=matrizampliada(i,12)
VarCov65=matrizampliada(i,13)
VarCov66=matrizampliada(i,10)

VarCov(1,1)=VarCov11
VarCov(1,2)=VarCov12
VarCov(1,3)=VarCov13
VarCov(2,1)=VarCov21
VarCov(2,2)=VarCov22
VarCov(2,3)=VarCov23
VarCov(3,1)=VarCov31
VarCov(3,2)=VarCov32
VarCov(3,3)=VarCov33

VarCov(4,4)=VarCov44
VarCov(4,5)=VarCov45
VarCov(4,6)=VarCov46
VarCov(5,4)=VarCov54
VarCov(5,5)=VarCov55
VarCov(5,6)=VarCov56
VarCov(6,4)=VarCov64
VarCov(6,5)=VarCov65
VarCov(6,6)=VarCov66

MatrizIncrementos=MatrizJacobiana*Coordenadasij
MatrizVarCov=MatrizJacobiana*VarCov*MatrizJacobiana'

%      Con la matriz H (matriz de las rotaciones del
%      sistema) y las diferencias de coordenadas
%      obtenidas a través de la matriz 6x1 calculamos
%      el vector de coordenadas ENU.

NEU=MatrizH*MatrizIncrementos

%      Con la matriz H (matriz de las rotaciones del
%      sistema) y la matriz 6x6, calculamos la matriz
%      varianza-covarianza asociada a las coordenadas
%      ENU. En la diagonal de esta matriz encontramos
%      los cuadrados de las precisiones asociadas a
%      Norte, Este, y Up.

MatrizVarCovNEU=MatrizH*MatrizVarCov*MatrizH'

North(i,1)=round(NEU(1),4)
East(i,1)=round(NEU(2),4)
Up(i,1)=round(NEU(3),4)
SigmaN(i,1)=round(sqrt(MatrizVarCovNEU(1,1)),4)
SigmaE(i,1)=round(sqrt(MatrizVarCovNEU(2,2)),4)
SigmaU(i,1)=round(sqrt(MatrizVarCovNEU(3,3)),4)

i=i+1

end

%      Por último agrupamos los vectores obtenidos (coordenadas
%      NEU y sus precisiones) en la matriz solución de la
%      estación correspondiente. Se exporta en el mismo
%      directorio y se repite el mismo proceso para el resto
%      de estaciones.

```

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

```
MatrizSolucion=[Epoca   North East   Up  
                SigmaN   SigmaE       SigmaU]  
  
writematrix (MatrizSolucion, strcat('NEU_',  
                                     MyFolderInfo(j).name), 'Delimiter', '\t')  
  
clearvars -except j      i      ds      MyFolderInfo      a      e2  
                        d      MatrizJacobiana      VarCov  
  
j=j+1  
  
end
```

**Z\_Programa3.m**

```

%      GRACIAS A ESTE PROGRAMA, PODEMOS REALIZAR EL CÁLCULO DE VELOCIDADES
%      RESIDUALES A PARTIR DE UNAS VELOCIDADES ABSOLUTAS.

%      En primer lugar, crearemos una carpeta que contenga un archivo .txt
%      con las las velocidades absolutas. Esta carpeta se encontrará en el
%      mismo directorio que los archivos de coordenadas de cada uno de los
%      puntos de las estaciones y nuestro programa Z_Programa3.m.

%      Debemos incluir los valores de velocidad correspondientes al
%      movimiento de la placa euroasiática para la materialización ITRF2014
%      (OmegaX, OmegaY, OmegaZ).

%      Además, volvemos a incluir las constantes a (semieje mayor) y e2 (el
%      cuadrado de la primera excentricidad).

MyFolderInfo=dir

ds = tabularTextDatastore (cd)

OmegaX=-0.085
OmegaY=-0.531
OmegaZ=0.77

Ome garadX=((OmegaX*pi)/(3600*180*1000))
Ome garadY=((OmegaY*pi)/(3600*180*1000))
Ome garadZ=((OmegaZ*pi)/(3600*180*1000))

Vang=[Ome garadX; Ome garadY; Ome garadZ]

j=4
a=6378137
e2=0.00669438
d=1

%      El programa comienza leyendo el archivo correspondiente a las
%      velocidades absolutas de las estaciones, calculadas mediante
%      un programa externo.

cd (MyFolderInfo(3).name)

ds2 = tabularTextDatastore (cd)

Ficheros(1,1)=ds2.Files(1)

fileID = fopen(Ficheros{1});
C2 = textscan(fileID,'%s %n %n %n %n %n %n %s');
fclose(fileID);
whos C2

VNorte= C2{2}*0.001
VEste= C2{3}*0.001
VUp= C2{4}*0.001

cd ../

%      Cuando termine de leer los valores de velocidades, cambia de
%      directorio para comenzar a leer los archivos de coordenadas.

```

```

for j=4:(length(MyFolderInfo)-1)

    Ficheros(j,1)=ds.Files(j-3)

    fileID = fopen(Ficheros{j});
    C = textscan(fileID,'%s %n %n %n %n %n %n %n %n %n %n %n %n');
    fclose(fileID);
    whos C

    Epoca= C{1}
    CoordX= C{2}
    CoordY= C{3}
    CoordZ= C{4}
    SigmaX= C{5}
    SigmaY= C{6}
    SigmaZ= C{7}
    VarX= C{8}
    VarY= C{9}
    VarZ= C{10}
    CovXY= C{11}
    CovXZ= C{12}
    CovYZ= C{13}

    matrizcoordenadas=[CoordX CoordY CoordZ]

    X1=matrizcoordenadas(1,1)
    Y1=matrizcoordenadas(1,2)
    Z1=matrizcoordenadas(1,3)

    %      Se calcularán las coordenadas geodésicas del
    %      primer punto, necesarias para la transformación
    %      al sistema geodésico local de todas las demás.
    %      Se realizarán iteraciones para el cálculo de
    %      la latitud hasta que la diferencia entre el
    %      valor obtenidos y el de su anterior iteración
    %      sea < 0.000000000000001.

    fi=atan((Z1/(sqrt(X1^2+Y1^2)))*((1-e2)^(-1)))

    while d>0.000000000000001
        fi0=fi
        N=((a)/sqrt(1-e2*(sin(fi)^2)))
        h=((sqrt(X1^2+Y1^2))/(cos(fi)))-N
        fi=atan((Z1/(sqrt(X1^2+Y1^2)))*((1-e2*((N)/(N+h)))^(-1)))
        d=abs(fi-fi0)
    end

    lambda=atan(Y1/X1)

    %      La matriz H contendrá las rotaciones del sistema,
    %      el vector V0 contendrá las velocidades absolutas
    %      correspondientes al punto en cuestión, y la MatrizXYZ
    %      contendrá las coordenadas ITRF2014 del primer punto.

    MatrizH=[(-sin(lambda)) cos(lambda) 0;
              (-sin(fi)*cos(lambda)) (-sin(fi)*sin(lambda)) cos(fi);
              cos(fi)*cos(lambda) cos(fi)*sin(lambda) sin(fi)]

    V0=[VEste(j-3); VNorte(j-3); VUp(j-3)]

    MatrizXYZ=[0 Z1 -Y1; -Z1 0 X1; Y1 -X1 0]

```

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

```
%      En el vector VneuR finalmente se obtienen las velocidades
%      residuales para cada estación. Tras la exportación, y se
%      pasa a trabajar con la siguiente estación.

VneuR=[V0-MatrizH*MatrizXYZ*Vang]*1000

VneuR=round(VneuR,2)

Resultados(:,j-3)=VneuR

writematrix (Resultados,'Velocidades Residuales',
            'Delimiter','\t')

clearvars -except ds      MyFolderInfo      Vang j      a      e
                        d      VNorte      VEste VUp      Resultados

j=j+1

end
```

**Z\_Programa4.m**

```

%      EL PROGRAMA NOS PERMITE REALIZAR LA TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS
%      ITRF2014 A UNAS EN EL MARCO DE REFERENCIA ITRF2008.

%      Para ejecutar el programa debemos asegurarnos que los archivos
%      de coordenadas ITRF2014 y el Z_Programa4.m están en la misma carpeta.

%      Esta carpeta compartirá directorio con el archivo de texto:
%      "Parámetros ITRF2008.txt" que contiene los parámetros de
%      transformación a ITR2008.

%      Volvemos a incluir las constantes a (semieje mayor) y e2 (el cuadrado
%      de la primera excentricidad) y la matriz Jacobiana.

MyFolderInfo=dir

cd ../

ds = tabularTextDatastore (cd)

MatrizJacobiana=[-1 0 0 1 0 0; 0 -1 0 0 1 0; 0 0 -1 0 0 1]

j=3
a=6378137
e2=0.00669438

%      El programa lee correctamente el archivo de los parámetros de
%      transformación y asigna el factor de escala, los elementos del
%      vector de traslación, y los elementos de la matriz de rotación.

fileID = fopen(ds.Files{1});
C2 = textscan(fileID,'%n %n %n %n %n %n %n');
fclose(fileID);
whos C2

Tx= C2{1}
Ty= C2{2}
Tz= C2{3}
EscalaD= C2{4}
Rx= C2{5}
Ry= C2{6}
Rz= C2{7}

T11=((Tx(1)*10^-3)+((Tx(2)*10^-3)*(2009.4671-2010)))
T21=((Ty(1)*10^-3)+((Ty(2)*10^-3)*(2009.4671-2010)))
T31=((Tz(1)*10^-3)+((Tz(2)*10^-3)*(2009.4671-2010)))

DiagR=((EscalaD(1)*10^-9)+((EscalaD(2)*10^-9)*(2009.4671-2010)))

R23=((deg2rad(Rx(1)/1000)/3600)
      +((deg2rad(Rx(2)/1000)/3600)*(2009.4671-2010)))
R13=((deg2rad(Ry(1)/1000)/3600)
      +((deg2rad(Ry(2)/1000)/3600)*(2009.4671-2010)))
R12=((deg2rad(Rz(1)/1000)/3600)
      +((deg2rad(Rz(2)/1000)/3600)*(2009.4671-2010)))

Traslac=[T11;T21;T31]

Rotac=[DiagR      -R12  R13; R12      DiagR -R23; -R13  R23      DiagR]

```

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

```
%      A continuación comenzaremos a leer los archivos de coordenadas
%      ITRF2014 e iremos aplicándole la transformación a ITRF2008 con
%      operaciones con los elementos de rotación, factor de escala y
%      traslación, extraídos anteriormente.

MyFolderInfo=dir

cd (MyFolderInfo(3).name)

MyFolderInfo=dir

ds = tabularTextDatastore (cd)

    for j=3:(length(MyFolderInfo)-1)

        i=1

        Ficheros(j,1)=ds.Files(j-2)

        fileID = fopen(Ficheros{j});
        C = textscan(fileID,'%n %n %n %n %n %n %n %n %n %n');
        fclose(fileID);
        whos C

        Epoca= round(C{1},4)
        CoordX= C{2}
        CoordY= C{3}
        CoordZ= C{4}
        SigmaX= C{5}
        SigmaY= C{6}
        SigmaZ= C{7}
        CovXY= C{8}
        CovXZ= C{9}
        CovYZ= C{10}

        for k=1:length(CoordX)

            ITRF2014XYZ=[round(CoordX(k),4);
                           round(CoordY(k),4);
                           round(CoordZ(k),4)]

            ITRF2008XYZ=ITRF2014XYZ+Traslac+Rotac*ITRF2014XYZ

            X08(k,1)=ITRF2008XYZ(1)
            Y08(k,1)=ITRF2008XYZ(2)
            Z08(k,1)=ITRF2008XYZ(3)

            k=k+1

        end

        %      Conseguidas las coordenadas en el marco de referencia
        %      ITRF2008, reutilizamos partes del código de Z_Programa2.m
        %      para obtener nuevamente las coordenadas en el sistema
        %      geodésico local (Norte, Este y Up).

        CoordITRF2008=[Epoca      X08      Y08      Z08]

        X1=CoordITRF2008(1,2)
        Y1=CoordITRF2008(1,3)
        Z1=CoordITRF2008(1,4)
```

```

%      Se calcularán las coordenadas geodésicas del primer
%      punto, necesarias para la transformación al sistema
%      geodésico local de todas las demás. Se realizarán
%      iteraciones para el cálculo de la latitud hasta que
%      la diferencia entre el valor obtenidos y el de su
%      anterior iteración sea < 0.000000000000001.

fi=atan((Z1/(sqrt(X1^2+Y1^2)))*(1-e2)^(-1)))

d=1

while d>0.000000000000001
    fi0=fi
    N=((a)/sqrt(1-e2*(sin(fi)^2)))
    h=((sqrt(X1^2+Y1^2))/(cos(fi)))-N
    fi=atan((Z1/(sqrt(X1^2+Y1^2)))*(1-e2*((N)/(N+h)))^(-1)))
    d=abs(fi-fi0)
end

lambda=atan(Y1/X1)

%      La matriz H contendrá las rotaciones del sistema.

MatrizH=
    [(-sin(fi)*cos(lambda)) (-sin(fi)*sin(lambda)) cos(fi);
    (-sin(lambda)) cos(lambda) 0;
    cos(fi)*cos(lambda) cos(fi)*sin(lambda) sin(fi)]

%      En este caso, a diferencia del Z_Programa2.m no
%      calcularemos las precisiones asociadas a las
%      coordenadas. Por lo tanto únicamente realizamos
%      el cálculo de la matriz incrementos de coordenadas
%      con respecto al primer punto.

for i=1:size(CoordITRF2008,1)

    Coordinadasij=[X1;
                    Y1;
                    Z1;
                    CoordITRF2008(i,2);
                    CoordITRF2008(i,3);
                    CoordITRF2008(i,4)]

    MatrizIncrementos=MatrizJacobiana*Coordinadasij

    %      Con la matriz H (matriz de las rotaciones del
    %      sistema) y las diferencias de coordenadas
    %      obtenidas a través de la matriz incrementos
    %      calculamos el vector de coordenadas NEU.

    NEU=MatrizH*MatrizIncrementos

    North(i,1)=round(NEU(1),4)
    East(i,1)=round(NEU(2),4)
    Up(i,1)=round(NEU(3),4)

    i=i+1

end

```

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

```
%      Por último agrupamos las coordenadas NEU en la matriz
%      solución de la estación correspondiente. Se exporta
%      en el mismo directorio y se repite el mismo proceso
%      para el resto de estaciones.

MatrizSolucion=[Epoca   North East   Up]

writematrix
    (MatrizSolucion,strcat('NEU_',MyFolderInfo(j).name),
    'Delimiter','\t')

clearvars -except j      i      ds      MyFolderInfo      a      e2
                        d      MatrizJacobiana      Traslac      Rotac

j=j+1

end
```

**ANEXO II: Tablas de coordenadas****Estación ALJI**

| ÉPOCA     | COORDENADAS ITRF2014 (XYZ) |              |              | COORDENADAS LOCALES (NEU) |          |         |
|-----------|----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------|---------|
|           | X [m]                      | Y [m]        | Z [m]        | Norte [m]                 | Este [m] | Up [m]  |
| 2009.4671 | 5106678.3658               | -505158.6273 | 3775884.3706 | 0.0000                    | 0.0000   | 0.0000  |
| 2009.4699 | 5106678.3782               | -505158.6419 | 3775884.3762 | -0.0037                   | -0.0133  | 0.0143  |
| 2009.4726 | 5106678.3625               | -505158.6490 | 3775884.3762 | 0.0051                    | -0.0219  | 0.0024  |
| 2009.4753 | 5106678.3925               | -505158.6438 | 3775884.3929 | 0.0011                    | -0.0138  | 0.0359  |
| 2009.4781 | 5106678.3742               | -505158.6435 | 3775884.3722 | -0.0047                   | -0.0153  | 0.0088  |
| 2009.4808 | 5106678.4003               | -505158.6411 | 3775884.3906 | -0.0052                   | -0.0103  | 0.0405  |
| 2010.4671 | 5106678.3634               | -505158.6239 | 3775884.3809 | 0.0099                    | 0.0032   | 0.0039  |
| 2010.4699 | 5106678.3783               | -505158.6276 | 3775884.3988 | 0.0152                    | 0.0009   | 0.0267  |
| 2010.4726 | 5106678.3593               | -505158.6362 | 3775884.3975 | 0.0249                    | -0.0095  | 0.0115  |
| 2010.4753 | 5106678.3698               | -505158.6351 | 3775884.3991 | 0.0201                    | -0.0074  | 0.0207  |
| 2010.4781 | 5106678.3594               | -505158.6354 | 3775884.3896 | 0.0186                    | -0.0087  | 0.0068  |
| 2010.4808 | 5106678.3684               | -505158.6263 | 3775884.3898 | 0.0139                    | 0.0012   | 0.0134  |
| 2011.4671 | 5106678.3018               | -505158.6107 | 3775884.3630 | 0.0328                    | 0.0102   | -0.0571 |
| 2011.4699 | 5106678.3165               | -505158.6082 | 3775884.3679 | 0.0281                    | 0.0142   | -0.0426 |
| 2011.4726 | 5106678.3281               | -505158.6277 | 3775884.3778 | 0.0281                    | -0.0041  | -0.0259 |
| 2011.4753 | 5106678.3117               | -505158.6069 | 3775884.3642 | 0.0281                    | 0.0150   | -0.0487 |
| 2011.4781 | 5106678.3137               | -505158.6020 | 3775884.3627 | 0.0260                    | 0.0200   | -0.0484 |
| 2011.4808 | 5106678.2921               | -505158.5993 | 3775884.3489 | 0.0279                    | 0.0206   | -0.0742 |
| 2012.4686 | 5106678.2927               | -505158.5824 | 3775884.3724 | 0.0474                    | 0.0375   | -0.0610 |
| 2012.4713 | 5106678.3138               | -505158.5816 | 3775884.3851 | 0.0451                    | 0.0403   | -0.0367 |
| 2012.4740 | 5106678.3001               | -505158.5822 | 3775884.3872 | 0.0548                    | 0.0384   | -0.0463 |
| 2012.4768 | 5106678.3100               | -505158.5798 | 3775884.3838 | 0.0464                    | 0.0418   | -0.0406 |
| 2012.4795 | 5106678.3041               | -505158.5830 | 3775884.3844 | 0.0502                    | 0.0380   | -0.0447 |
| 2012.4822 | 5106678.3176               | -505158.5763 | 3775884.3872 | 0.0449                    | 0.0460   | -0.0328 |
| 2013.4671 | 5106678.3009               | -505158.5693 | 3775884.3939 | 0.0606                    | 0.0514   | -0.0427 |
| 2013.4699 | 5106678.2836               | -505158.5797 | 3775884.3868 | 0.0645                    | 0.0393   | -0.0599 |
| 2013.4726 | 5106678.2994               | -505158.5662 | 3775884.3884 | 0.0572                    | 0.0543   | -0.0474 |
| 2013.4753 | 5106678.2841               | -505158.5909 | 3775884.3803 | 0.0583                    | 0.0282   | -0.0625 |
| 2013.4781 | 5106678.2665               | -505158.5650 | 3775884.3726 | 0.0641                    | 0.0522   | -0.0832 |
| 2013.4808 | 5106678.2889               | -505158.5767 | 3775884.4005 | 0.0725                    | 0.0428   | -0.0477 |
| 2014.4671 | 5106678.2838               | -505158.5547 | 3775884.4047 | 0.0803                    | 0.0642   | -0.0511 |
| 2014.4699 | 5106678.2973               | -505158.5546 | 3775884.4140 | 0.0797                    | 0.0656   | -0.0348 |
| 2014.4726 | 5106678.2927               | -505158.5536 | 3775884.4109 | 0.0800                    | 0.0661   | -0.0403 |
| 2014.4753 | 5106678.2922               | -505158.5552 | 3775884.4110 | 0.0803                    | 0.0645   | -0.0406 |
| 2014.4781 | 5106678.2866               | -505158.5558 | 3775884.4090 | 0.0820                    | 0.0633   | -0.0462 |
| 2014.4808 | 5106678.2947               | -505158.5544 | 3775884.4133 | 0.0807                    | 0.0655   | -0.0373 |
| 2015.4671 | 5106678.2724               | -505158.5318 | 3775884.4212 | 0.1015                    | 0.0858   | -0.0521 |
| 2015.4699 | 5106678.2677               | -505158.5355 | 3775884.4192 | 0.1025                    | 0.0817   | -0.0569 |
| 2015.4726 | 5106678.2742               | -505158.5342 | 3775884.4207 | 0.0999                    | 0.0837   | -0.0509 |

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

|           |              |              |              |        |        |         |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------|--------|---------|
| 2015.4753 | 5106678.2793 | -505158.5369 | 3775884.4225 | 0.0982 | 0.0815 | -0.0455 |
| 2015.4781 | 5106678.2773 | -505158.5358 | 3775884.4221 | 0.0991 | 0.0823 | -0.0474 |
| 2015.4808 | 5106678.2680 | -505158.5314 | 3775884.4170 | 0.1009 | 0.0858 | -0.0582 |
| 2016.4686 | 5106678.2686 | -505158.5170 | 3775884.4413 | 0.1209 | 0.1002 | -0.0445 |
| 2016.4713 | 5106678.2611 | -505158.5126 | 3775884.4340 | 0.1197 | 0.1039 | -0.0551 |
| 2016.4740 | 5106678.2622 | -505158.5121 | 3775884.4338 | 0.1189 | 0.1045 | -0.0544 |
| 2016.4768 | 5106678.2642 | -505158.5165 | 3775884.4386 | 0.1213 | 0.1002 | -0.0496 |
| 2016.4795 | 5106678.2652 | -505158.5182 | 3775884.4389 | 0.1209 | 0.0987 | -0.0485 |
| 2016.4822 | 5106678.2714 | -505158.5181 | 3775884.4404 | 0.1184 | 0.0994 | -0.0426 |
| 2017.4671 | 5106678.2593 | -505158.4978 | 3775884.4504 | 0.1348 | 0.1184 | -0.0479 |
| 2017.4726 | 5106678.2664 | -505158.5003 | 3775884.4568 | 0.1356 | 0.1166 | -0.0383 |
| 2017.4753 | 5106678.2742 | -505158.5053 | 3775884.4637 | 0.1362 | 0.1124 | -0.0276 |
| 2017.4781 | 5106678.2648 | -505158.5005 | 3775884.4577 | 0.1372 | 0.1162 | -0.0390 |
| 2017.4808 | 5106678.2630 | -505158.5055 | 3775884.4567 | 0.1373 | 0.1111 | -0.0407 |
| 2018.4671 | 5106678.2681 | -505158.4838 | 3775884.4760 | 0.1510 | 0.1332 | -0.0268 |
| 2018.4699 | 5106678.2516 | -505158.4847 | 3775884.4640 | 0.1510 | 0.1307 | -0.0470 |
| 2018.4726 | 5106678.2632 | -505158.4836 | 3775884.4696 | 0.1487 | 0.1329 | -0.0346 |
| 2018.4753 | 5106678.2545 | -505158.4864 | 3775884.4663 | 0.1511 | 0.1292 | -0.0433 |
| 2018.4781 | 5106678.2489 | -505158.4864 | 3775884.4670 | 0.1549 | 0.1287 | -0.0473 |
| 2018.4808 | 5106678.2554 | -505158.4861 | 3775884.4698 | 0.1534 | 0.1296 | -0.0405 |

Tabla 13. Coordenadas asociadas a la época de observación, en el marco ITRF2014 y en el sistema geodésico local para la estación ALJI.

**Estación CAST**

| ÉPOCA     | COORDENADAS ITRF2014 (XYZ) |              |              | COORDENADAS LOCALES (NEU) |          |         |
|-----------|----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------|---------|
|           | X [m]                      | Y [m]        | Z [m]        | Norte [m]                 | Este [m] | Up [m]  |
| 2009,4671 | 4992028,3057               | -571606,9019 | 3916652,7620 | 0                         | 0        | 0       |
| 2009,4699 | 4992028,3087               | -571606,9045 | 3916652,7665 | 0,0015                    | -0,0023  | 0,0053  |
| 2009,4726 | 4992028,3083               | -571606,9032 | 3916652,7639 | -0,0002                   | -0,001   | 0,0033  |
| 2009,4753 | 4992028,2964               | -571606,9027 | 3916652,7531 | -0,0013                   | -0,0019  | -0,0128 |
| 2009,4781 | 4992028,3042               | -571606,9036 | 3916652,7589 | -0,0016                   | -0,0019  | -0,003  |
| 2009,4808 | 4992028,2983               | -571606,9023 | 3916652,7545 | -0,0014                   | -0,0013  | -0,0105 |
| 2010,4671 | 4992028,2985               | -571606,8855 | 3916652,7725 | 0,0138                    | 0,0154   | -0,0006 |
| 2010,4699 | 4992028,2960               | -571606,8825 | 3916652,7716 | 0,0149                    | 0,0181   | -0,0034 |
| 2010,4726 | 4992028,2939               | -571606,8826 | 3916652,7723 | 0,0167                    | 0,0178   | -0,0047 |
| 2010,4753 | 4992028,2931               | -571606,8825 | 3916652,7717 | 0,0167                    | 0,0178   | -0,0056 |
| 2010,4781 | 4992028,2893               | -571606,8837 | 3916652,7673 | 0,0155                    | 0,0162   | -0,0112 |
| 2010,4808 | 4992028,2967               | -571606,8836 | 3916652,7756 | 0,0175                    | 0,0172   | -0,0003 |
| 2011,4671 | 4992028,2878               | -571606,8629 | 3916652,7859 | 0,0325                    | 0,0367   | -0,0028 |
| 2011,4699 | 4992028,2894               | -571606,8631 | 3916652,7853 | 0,0311                    | 0,0366   | -0,0019 |
| 2011,4726 | 4992028,2871               | -571606,8635 | 3916652,7853 | 0,0325                    | 0,036    | -0,0036 |
| 2011,4753 | 4992028,2860               | -571606,8643 | 3916652,7827 | 0,031                     | 0,0351   | -0,006  |
| 2011,4781 | 4992028,2915               | -571606,8626 | 3916652,7898 | 0,0333                    | 0,0374   | 0,0025  |
| 2011,4808 | 4992028,2813               | -571606,8625 | 3916652,7836 | 0,0347                    | 0,0363   | -0,0093 |
| 2012,4686 | 4992028,2801               | -571606,8444 | 3916652,7995 | 0,0493                    | 0,0542   | -0,0021 |
| 2012,4713 | 4992028,2822               | -571606,8451 | 3916652,8010 | 0,0491                    | 0,0537   | 0,0006  |
| 2012,4740 | 4992028,2849               | -571606,8453 | 3916652,8039 | 0,0497                    | 0,0538   | 0,0045  |
| 2012,4768 | 4992028,2822               | -571606,8487 | 3916652,8036 | 0,0509                    | 0,0501   | 0,0025  |
| 2012,4795 | 4992028,2797               | -571606,8460 | 3916652,8012 | 0,0507                    | 0,0525   | -0,0012 |
| 2012,4822 | 4992028,2848               | -571606,8468 | 3916652,8033 | 0,0492                    | 0,0523   | 0,0042  |
| 2013,4671 | 4992028,2665               | -571606,8260 | 3916652,8097 | 0,0669                    | 0,0709   | -0,008  |
| 2013,4699 | 4992028,2696               | -571606,8253 | 3916652,8094 | 0,0648                    | 0,0719   | -0,0059 |
| 2013,4726 | 4992028,2725               | -571606,8256 | 3916652,8141 | 0,0668                    | 0,0719   | -0,0007 |
| 2013,4753 | 4992028,2770               | -571606,8260 | 3916652,8179 | 0,0669                    | 0,0721   | 0,0053  |
| 2013,4781 | 4992028,2744               | -571606,8271 | 3916652,8121 | 0,0639                    | 0,0707   | -0,0003 |
| 2013,4808 | 4992028,2714               | -571606,8268 | 3916652,8107 | 0,0646                    | 0,0707   | -0,0035 |
| 2014,4671 | 4992028,2492               | -571606,8073 | 3916652,8145 | 0,0826                    | 0,0875   | -0,0203 |
| 2014,4699 | 4992028,2545               | -571606,8057 | 3916652,8217 | 0,0851                    | 0,0897   | -0,0118 |
| 2014,4726 | 4992028,2595               | -571606,8067 | 3916652,8261 | 0,0854                    | 0,0893   | -0,0051 |
| 2014,4753 | 4992028,2502               | -571606,8049 | 3916652,8190 | 0,0857                    | 0,09     | -0,017  |
| 2014,4781 | 4992028,2518               | -571606,8074 | 3916652,8189 | 0,0845                    | 0,0877   | -0,0155 |
| 2014,4808 | 4992028,2566               | -571606,8074 | 3916652,8222 | 0,0841                    | 0,0883   | -0,0097 |
| 2015,4671 | 4992028,2612               | -571606,7928 | 3916652,8449 | 0,1002                    | 0,1032   | 0,0066  |
| 2015,4699 | 4992028,2570               | -571606,7906 | 3916652,8426 | 0,1011                    | 0,105    | 0,0016  |
| 2015,4726 | 4992028,2511               | -571606,7931 | 3916652,8378 | 0,1008                    | 0,1018   | -0,0057 |
| 2015,4753 | 4992028,2491               | -571606,7895 | 3916652,8357 | 0,1006                    | 0,1052   | -0,0089 |
| 2015,4781 | 4992028,2511               | -571606,7903 | 3916652,8403 | 0,1029                    | 0,1047   | -0,0044 |

Tabla 14. Coordenadas asociadas a la época de observación, en el marco ITRF2014 y en el sistema geodésico local para la estación CAST.

**Estación LIJA**

|           | COORDENADAS ITRF2014 (XYZ) |              |              | COORDENADAS LOCALES (NEU) |          |         |
|-----------|----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------|---------|
| ÉPOCA     | X [m]                      | Y [m]        | Z [m]        | Norte [m]                 | Este [m] | Up [m]  |
| 2009,4671 | 5084357,6955               | -480952,8794 | 3809683,9828 | 0,0000                    | 0,0000   | 0,0000  |
| 2009,4699 | 5084357,6867               | -480952,8797 | 3809683,9763 | 0,0000                    | -0,0012  | -0,0109 |
| 2009,4726 | 5084357,6899               | -480952,8811 | 3809683,9763 | -0,0020                   | -0,0023  | -0,0082 |
| 2009,4753 | 5084357,6899               | -480952,8817 | 3809683,9752 | -0,0029                   | -0,0029  | -0,0089 |
| 2009,4781 | 5084357,6889               | -480952,8769 | 3809683,9746 | -0,0024                   | 0,0018   | -0,0104 |
| 2009,4808 | 5084357,6814               | -480952,8774 | 3809683,9667 | -0,0043                   | 0,0006   | -0,0210 |
| 2010,4671 | 5084357,6764               | -480952,8628 | 3809683,9889 | 0,0173                    | 0,0147   | -0,0128 |
| 2010,4726 | 5084357,6765               | -480952,8608 | 3809683,9912 | 0,0192                    | 0,0167   | -0,0115 |
| 2010,4753 | 5084357,6786               | -480952,8640 | 3809683,9916 | 0,0181                    | 0,0137   | -0,0093 |
| 2010,4781 | 5084357,6808               | -480952,8617 | 3809683,9936 | 0,0184                    | 0,0162   | -0,0065 |
| 2010,4808 | 5084357,6790               | -480952,8647 | 3809683,9925 | 0,0184                    | 0,0130   | -0,0084 |
| 2011,4671 | 5084357,6739               | -480952,8444 | 3809684,0044 | 0,0322                    | 0,0329   | -0,0068 |
| 2011,4699 | 5084357,6705               | -480952,8439 | 3809684,0004 | 0,0310                    | 0,0329   | -0,0120 |
| 2011,4726 | 5084357,6682               | -480952,8448 | 3809684,0015 | 0,0333                    | 0,0319   | -0,0131 |
| 2011,4753 | 5084357,6722               | -480952,8441 | 3809684,0024 | 0,0316                    | 0,0329   | -0,0094 |
| 2011,4781 | 5084357,6739               | -480952,8436 | 3809684,0048 | 0,0325                    | 0,0336   | -0,0067 |
| 2011,4808 | 5084357,6678               | -480952,8443 | 3809684,0031 | 0,0348                    | 0,0323   | -0,0125 |
| 2012,4686 | 5084357,6690               | -480952,8248 | 3809684,0191 | 0,0480                    | 0,0518   | -0,0034 |
| 2012,4713 | 5084357,6688               | -480952,8252 | 3809684,0199 | 0,0487                    | 0,0514   | -0,0031 |
| 2012,4740 | 5084357,6636               | -480952,8247 | 3809684,0183 | 0,0506                    | 0,0514   | -0,0082 |
| 2012,4768 | 5084357,6699               | -480952,8255 | 3809684,0195 | 0,0477                    | 0,0513   | -0,0024 |
| 2012,4795 | 5084357,6669               | -480952,8269 | 3809684,0189 | 0,0489                    | 0,0496   | -0,0050 |
| 2012,4822 | 5084357,6705               | -480952,8277 | 3809684,0219 | 0,0491                    | 0,0491   | -0,0003 |
| 2013,4671 | 5084357,6533               | -480952,8053 | 3809684,0323 | 0,0691                    | 0,0698   | -0,0094 |
| 2013,4699 | 5084357,6554               | -480952,8055 | 3809684,0317 | 0,0672                    | 0,0697   | -0,0081 |
| 2013,4726 | 5084357,6583               | -480952,8031 | 3809684,0342 | 0,0676                    | 0,0724   | -0,0045 |
| 2013,4753 | 5084357,6581               | -480952,8063 | 3809684,0379 | 0,0705                    | 0,0692   | -0,0022 |
| 2013,4781 | 5084357,6598               | -480952,8063 | 3809684,0375 | 0,0692                    | 0,0694   | -0,0011 |
| 2013,4808 | 5084357,6501               | -480952,8067 | 3809684,0316 | 0,0703                    | 0,0681   | -0,0123 |
| 2014,4671 | 5084357,6396               | -480952,7914 | 3809684,0387 | 0,0831                    | 0,0824   | -0,0176 |
| 2014,4699 | 5084357,6433               | -480952,7898 | 3809684,0423 | 0,0839                    | 0,0843   | -0,0126 |
| 2014,4726 | 5084357,6456               | -480952,7891 | 3809684,0432 | 0,0833                    | 0,0852   | -0,0103 |
| 2014,4753 | 5084357,6468               | -480952,7878 | 3809684,0461 | 0,0849                    | 0,0866   | -0,0076 |
| 2014,4781 | 5084357,6423               | -480952,7904 | 3809684,0443 | 0,0860                    | 0,0836   | -0,0121 |
| 2014,4808 | 5084357,6449               | -480952,7885 | 3809684,0443 | 0,0846                    | 0,0858   | -0,0102 |
| 2015,4671 | 5084357,6327               | -480952,7696 | 3809684,0581 | 0,1040                    | 0,1034   | -0,0130 |
| 2015,4699 | 5084357,6260               | -480952,7693 | 3809684,0468 | 0,0990                    | 0,1031   | -0,0252 |
| 2015,4726 | 5084357,6331               | -480952,7707 | 3809684,0550 | 0,1012                    | 0,1023   | -0,0145 |
| 2015,4781 | 5084357,6355               | -480952,7701 | 3809684,0589 | 0,1029                    | 0,1031   | -0,0103 |
| 2015,4808 | 5084357,6314               | -480952,7691 | 3809684,0574 | 0,1042                    | 0,1038   | -0,0145 |
| 2016,4686 | 5084357,6281               | -480952,7531 | 3809684,0811 | 0,1261                    | 0,1193   | -0,0041 |

# ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

|           |              |              |              |         |        |         |
|-----------|--------------|--------------|--------------|---------|--------|---------|
| 2016,4740 | 5084358,2122 | -480952,7823 | 3809684,0602 | -0,2415 | 0,1453 | 0,4505  |
| 2016,4768 | 5084357,6253 | -480952,7564 | 3809684,0761 | 0,1236  | 0,1159 | -0,0091 |
| 2016,4795 | 5084357,6297 | -480952,7575 | 3809684,0787 | 0,1229  | 0,1152 | -0,0039 |
| 2016,4822 | 5084357,6294 | -480952,7535 | 3809684,0763 | 0,1214  | 0,1191 | -0,0059 |

Tabla 15. Coordenadas asociadas a la época de observación, en el marco ITRF2014 y en el sistema geodésico local para la estación LIJA.

**Estación LOJA**

|           | COORDENADAS ITRF2014 (XYZ) |              |              | COORDENADAS LOCALES (NEU) |          |         |
|-----------|----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------|---------|
| ÉPOCA     | X [m]                      | Y [m]        | Z [m]        | Norte [m]                 | Este [m] | Up [m]  |
| 2009,4671 | 5080810,6440               | -364763,0666 | 3827701,7933 | 0,0000                    | 0,0000   | 0,0000  |
| 2009,4699 | 5080810,6421               | -364763,0690 | 3827701,7900 | -0,0016                   | -0,0026  | -0,0033 |
| 2009,4726 | 5080810,6554               | -364763,0684 | 3827701,7992 | -0,0022                   | -0,0011  | 0,0127  |
| 2009,4753 | 5080810,6377               | -364763,0729 | 3827701,7895 | 0,0005                    | -0,0068  | -0,0068 |
| 2009,4781 | 5080810,6501               | -364763,0701 | 3827701,7960 | -0,0017                   | -0,0031  | 0,0067  |
| 2009,4808 | 5080810,6535               | -364763,0632 | 3827701,7944 | -0,0047                   | 0,0040   | 0,0081  |
| 2010,4671 | 5080810,6406               | -364763,0509 | 3827701,8104 | 0,0163                    | 0,0154   | 0,0068  |
| 2010,4699 | 5080810,6407               | -364763,0511 | 3827701,8141 | 0,0192                    | 0,0152   | 0,0091  |
| 2010,4726 | 5080810,6381               | -364763,0508 | 3827701,8096 | 0,0173                    | 0,0153   | 0,0043  |
| 2010,4753 | 5080810,6457               | -364763,0518 | 3827701,8165 | 0,0181                    | 0,0148   | 0,0145  |
| 2010,4781 | 5080810,6429               | -364763,0531 | 3827701,8134 | 0,0173                    | 0,0134   | 0,0105  |
| 2010,4808 | 5080810,6396               | -364763,0536 | 3827701,8127 | 0,0187                    | 0,0126   | 0,0075  |
| 2011,4671 | 5080810,6381               | -364763,0340 | 3827701,8309 | 0,0349                    | 0,0320   | 0,0161  |
| 2011,4699 | 5080810,6376               | -364763,0326 | 3827701,8309 | 0,0353                    | 0,0334   | 0,0157  |
| 2011,4726 | 5080810,6330               | -364763,0324 | 3827701,8245 | 0,0330                    | 0,0333   | 0,0082  |
| 2011,4753 | 5080810,6411               | -364763,0357 | 3827701,8270 | 0,0300                    | 0,0306   | 0,0163  |
| 2011,4781 | 5080810,6365               | -364763,0324 | 3827701,8272 | 0,0330                    | 0,0336   | 0,0126  |
| 2011,4808 | 5080810,6338               | -364763,0355 | 3827701,8243 | 0,0323                    | 0,0303   | 0,0089  |
| 2012,4686 | 5080810,6277               | -364763,0138 | 3827701,8377 | 0,0475                    | 0,0514   | 0,0108  |
| 2012,4713 | 5080810,6329               | -364763,0125 | 3827701,8401 | 0,0464                    | 0,0531   | 0,0164  |
| 2012,4740 | 5080810,6286               | -364763,0146 | 3827701,8362 | 0,0457                    | 0,0507   | 0,0107  |
| 2012,4768 | 5080810,6262               | -364763,0132 | 3827701,8382 | 0,0488                    | 0,0520   | 0,0100  |
| 2012,4795 | 5080810,6231               | -364763,0140 | 3827701,8348 | 0,0480                    | 0,0509   | 0,0054  |
| 2012,4822 | 5080810,6300               | -364763,0142 | 3827701,8412 | 0,0489                    | 0,0512   | 0,0148  |
| 2013,4671 | 5080810,6147               | -364762,9954 | 3827701,8490 | 0,0651                    | 0,0688   | 0,0063  |
| 2013,4699 | 5080810,6154               | -364762,9958 | 3827701,8499 | 0,0654                    | 0,0685   | 0,0074  |
| 2013,4726 | 5080810,6154               | -364762,9963 | 3827701,8515 | 0,0666                    | 0,0681   | 0,0084  |
| 2013,4753 | 5080810,6175               | -364762,9975 | 3827701,8536 | 0,0670                    | 0,0670   | 0,0114  |
| 2013,4781 | 5080810,6165               | -364762,9973 | 3827701,8496 | 0,0644                    | 0,0671   | 0,0082  |
| 2013,4808 | 5080810,6166               | -364762,9974 | 3827701,8498 | 0,0646                    | 0,0670   | 0,0084  |
| 2014,4671 | 5080810,6043               | -364762,9808 | 3827701,8573 | 0,0787                    | 0,0827   | 0,0022  |
| 2014,4699 | 5080810,6026               | -364762,9791 | 3827701,8567 | 0,0793                    | 0,0843   | 0,0004  |
| 2014,4726 | 5080810,6071               | -364762,9787 | 3827701,8629 | 0,0815                    | 0,0850   | 0,0077  |
| 2014,4753 | 5080810,5973               | -364762,9797 | 3827701,8529 | 0,0794                    | 0,0833   | -0,0061 |
| 2014,4781 | 5080810,6052               | -364762,9801 | 3827701,8589 | 0,0794                    | 0,0835   | 0,0039  |
| 2014,4808 | 5080810,6060               | -364762,9775 | 3827701,8586 | 0,0788                    | 0,0861   | 0,0041  |
| 2015,4671 | 5080810,5991               | -364762,9590 | 3827701,8753 | 0,0971                    | 0,1040   | 0,0077  |
| 2015,4699 | 5080810,5990               | -364762,9597 | 3827701,8739 | 0,0959                    | 0,1033   | 0,0068  |
| 2015,4726 | 5080810,6022               | -364762,9631 | 3827701,8739 | 0,0939                    | 0,1002   | 0,0096  |
| 2015,4753 | 5080810,5988               | -364762,9589 | 3827701,8699 | 0,0929                    | 0,1042   | 0,0042  |
| 2015,4781 | 5080810,5945               | -364762,9589 | 3827701,8702 | 0,0957                    | 0,1038   | 0,0009  |

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

|           |              |              |              |        |        |        |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|
| 2015,4808 | 5080810,5949 | -364762,9600 | 3827701,8742 | 0,0986 | 0,1027 | 0,0037 |
| 2016,4686 | 5080810,5925 | -364762,9401 | 3827701,8875 | 0,1115 | 0,1225 | 0,0087 |
| 2016,4713 | 5080810,5946 | -364762,9394 | 3827701,8902 | 0,1125 | 0,1233 | 0,0120 |
| 2016,4740 | 5080810,5970 | -364762,9391 | 3827701,8919 | 0,1124 | 0,1237 | 0,0149 |
| 2016,4768 | 5080810,5884 | -364762,9414 | 3827701,8895 | 0,1156 | 0,1209 | 0,0067 |
| 2016,4795 | 5080810,5856 | -364762,9415 | 3827701,8850 | 0,1137 | 0,1205 | 0,0018 |
| 2016,4822 | 5080810,5908 | -364762,9427 | 3827701,8859 | 0,1112 | 0,1197 | 0,0065 |
| 2017,4671 | 5080810,5782 | -364762,9242 | 3827701,8949 | 0,1268 | 0,1372 | 0,0009 |
| 2017,4726 | 5080810,5891 | -364762,9210 | 3827701,9048 | 0,1283 | 0,1413 | 0,0153 |
| 2017,4753 | 5080810,5964 | -364762,9228 | 3827701,9114 | 0,1291 | 0,1399 | 0,0252 |
| 2017,4781 | 5080810,5905 | -364762,9231 | 3827701,9047 | 0,1273 | 0,1393 | 0,0165 |
| 2017,4808 | 5080810,5885 | -364762,9254 | 3827701,9040 | 0,1278 | 0,1368 | 0,0146 |

Tabla 16. Coordenadas asociadas a la época de observación, en el marco ITRF2014 y en el sistema geodésico local para la estación LOJA.

**Estación RUBI**

| ESTACIÓN DE RUBI |                            |              |              |                           |          |         |
|------------------|----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------|---------|
|                  | COORDENADAS ITRF2014 (XYZ) |              |              | COORDENADAS LOCALES (NEU) |          |         |
| ÉPOCA            | X [m]                      | Y [m]        | Z [m]        | Norte [m]                 | Este [m] | Up [m]  |
| 2009,4671        | 4977708,8185               | -365240,5407 | 3958989,6800 | 0,0000                    | 0,0000   | 0,0000  |
| 2009,4699        | 4977708,8143               | -365240,5409 | 3958989,6738 | -0,0022                   | -0,0005  | -0,0072 |
| 2009,4726        | 4977708,8161               | -365240,5422 | 3958989,6772 | -0,0008                   | -0,0017  | -0,0036 |
| 2009,4753        | 4977708,8133               | -365240,5436 | 3958989,6715 | -0,0035                   | -0,0032  | -0,0092 |
| 2009,4781        | 4977708,8180               | -365240,5413 | 3958989,6759 | -0,0029                   | -0,0006  | -0,0029 |
| 2009,4808        | 4977708,8114               | -365240,5407 | 3958989,6681 | -0,0049                   | -0,0005  | -0,0130 |
| 2010,4671        | 4977708,8083               | -365240,5234 | 3958989,6886 | 0,0139                    | 0,0165   | -0,0036 |
| 2010,4699        | 4977708,8050               | -365240,5218 | 3958989,6859 | 0,0139                    | 0,0179   | -0,0079 |
| 2010,4726        | 4977708,8039               | -365240,5227 | 3958989,6867 | 0,0152                    | 0,0169   | -0,0082 |
| 2010,4753        | 4977708,8093               | -365240,5246 | 3958989,6899 | 0,0142                    | 0,0154   | -0,0020 |
| 2010,4781        | 4977708,8062               | -365240,5215 | 3958989,6883 | 0,0150                    | 0,0183   | -0,0055 |
| 2010,4808        | 4977708,8051               | -365240,5218 | 3958989,6873 | 0,0150                    | 0,0179   | -0,0070 |
| 2011,4671        | 4977708,8033               | -365240,5031 | 3958989,7037 | 0,0298                    | 0,0364   | 0,0008  |
| 2011,4699        | 4977708,8030               | -365240,5034 | 3958989,7051 | 0,0310                    | 0,0361   | 0,0014  |
| 2011,4726        | 4977708,7973               | -365240,5032 | 3958989,7005 | 0,0310                    | 0,0359   | -0,0059 |
| 2011,4753        | 4977708,8043               | -365240,5035 | 3958989,7041 | 0,0294                    | 0,0360   | 0,0018  |
| 2011,4781        | 4977708,7984               | -365240,5011 | 3958989,7009 | 0,0307                    | 0,0380   | -0,0049 |
| 2011,4808        | 4977708,7966               | -365240,5038 | 3958989,7001 | 0,0310                    | 0,0352   | -0,0067 |
| 2012,4686        | 4977708,7944               | -365240,4843 | 3958989,7181 | 0,0474                    | 0,0545   | 0,0018  |
| 2012,4713        | 4977708,7940               | -365240,4826 | 3958989,7171 | 0,0469                    | 0,0562   | 0,0007  |
| 2012,4740        | 4977708,7923               | -365240,4819 | 3958989,7161 | 0,0473                    | 0,0568   | -0,0013 |
| 2012,4768        | 4977708,7897               | -365240,4820 | 3958989,7115 | 0,0453                    | 0,0564   | -0,0062 |
| 2012,4795        | 4977708,7898               | -365240,4834 | 3958989,7162 | 0,0488                    | 0,0551   | -0,0031 |
| 2012,4822        | 4977708,7873               | -365240,4837 | 3958989,7120 | 0,0470                    | 0,0546   | -0,0077 |
| 2013,4671        | 4977708,7752               | -365240,4628 | 3958989,7218 | 0,0632                    | 0,0745   | -0,0121 |
| 2013,4699        | 4977708,7765               | -365240,4628 | 3958989,7231 | 0,0634                    | 0,0746   | -0,0103 |
| 2013,4726        | 4977708,7832               | -365240,4630 | 3958989,7290 | 0,0638                    | 0,0749   | -0,0014 |
| 2013,4753        | 4977708,7828               | -365240,4651 | 3958989,7280 | 0,0632                    | 0,0729   | -0,0023 |
| 2013,4781        | 4977708,7792               | -365240,4639 | 3958989,7256 | 0,0636                    | 0,0737   | -0,0066 |
| 2013,4808        | 4977708,7824               | -365240,4656 | 3958989,7284 | 0,0638                    | 0,0723   | -0,0023 |
| 2014,4671        | 4977708,7777               | -365240,4473 | 3958989,7423 | 0,0784                    | 0,0902   | 0,0018  |
| 2014,4699        | 4977708,7738               | -365240,4456 | 3958989,7404 | 0,0794                    | 0,0916   | -0,0026 |
| 2014,4726        | 4977708,7655               | -365240,4449 | 3958989,7357 | 0,0809                    | 0,0917   | -0,0120 |
| 2014,4753        | 4977708,7662               | -365240,4448 | 3958989,7347 | 0,0798                    | 0,0919   | -0,0122 |
| 2014,4781        | 4977708,7692               | -365240,4455 | 3958989,7373 | 0,0799                    | 0,0913   | -0,0081 |
| 2014,4808        | 4977708,7693               | -365240,4452 | 3958989,7360 | 0,0788                    | 0,0917   | -0,0089 |
| 2015,4671        | 4977708,7630               | -365240,4263 | 3958989,7539 | 0,0976                    | 0,1101   | -0,0037 |
| 2015,4699        | 4977708,7677               | -365240,4260 | 3958989,7584 | 0,0981                    | 0,1107   | 0,0028  |
| 2015,4726        | 4977708,7556               | -365240,4254 | 3958989,7499 | 0,0991                    | 0,1104   | -0,0120 |
| 2015,4753        | 4977708,7546               | -365240,4264 | 3958989,7454 | 0,0961                    | 0,1094   | -0,0156 |

## ESTIMACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDAD EN EL SECTOR OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA BÉTICA

|           |              |              |              |        |        |         |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------|--------|---------|
| 2015,4781 | 4977708,7535 | -365240,4252 | 3958989,7465 | 0,0977 | 0,1104 | -0,0158 |
| 2015,4808 | 4977708,7612 | -365240,4254 | 3958989,7541 | 0,0988 | 0,1108 | -0,0051 |
| 2016,4686 | 4977708,7556 | -365240,4037 | 3958989,7728 | 0,1179 | 0,1320 | 0,0010  |
| 2016,4713 | 4977708,7601 | -365240,4043 | 3958989,7716 | 0,1142 | 0,1318 | 0,0038  |
| 2016,4740 | 4977708,7589 | -365240,4041 | 3958989,7745 | 0,1172 | 0,1319 | 0,0047  |
| 2016,4768 | 4977708,7538 | -365240,4057 | 3958989,7694 | 0,1163 | 0,1299 | -0,0024 |
| 2016,4795 | 4977708,7486 | -365240,4063 | 3958989,7659 | 0,1168 | 0,1290 | -0,0086 |
| 2016,4822 | 4977708,7565 | -365240,4081 | 3958989,7719 | 0,1165 | 0,1277 | 0,0014  |
| 2018,4671 | 4977708,7266 | -365240,3656 | 3958989,7856 | 0,1477 | 0,1680 | -0,0158 |
| 2018,4699 | 4977708,7343 | -365240,3660 | 3958989,7922 | 0,1481 | 0,1681 | -0,0056 |
| 2018,4726 | 4977708,7348 | -365240,3658 | 3958989,7914 | 0,1472 | 0,1683 | -0,0057 |
| 2018,4753 | 4977708,7425 | -365240,3684 | 3958989,7994 | 0,1485 | 0,1663 | 0,0054  |
| 2018,4781 | 4977708,7367 | -365240,3676 | 3958989,7949 | 0,1486 | 0,1667 | -0,0020 |
| 2018,4808 | 4977708,7385 | -365240,3698 | 3958989,7977 | 0,1496 | 0,1646 | 0,0013  |

Tabla 17. Coordenadas asociadas a la época de observación, en el marco ITRF2014 y en el sistema geodésico local para la estación RUBI.